МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЕ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

III-6



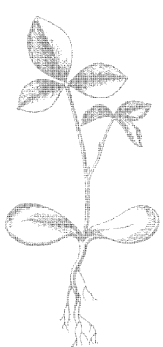
РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

MECHANICAL ENGINEERING
Encyclopaedia

Главный редактор академик РАН
К.В. Фролов



Scan AAW

МАШИНОСТРОЕНИЕ
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ
В СОРОКА ТОМАХ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ФРОЛОВ К.В.
Председатель редакционного совета

Члены совета:

Белянин П.Н. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Колесников К.С. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Адамов Е.О., Анфимов Н.А., Асташов В.К., Бессонов А.П., Бюшгенс Г.С., Васильев В.В., Васильев Ю.С., Воронин Г.П., Долбенко Е.Т., Жесткова И.Н., Кирпичников М.П., Клюев В.В., Колесников В.И., Коптев Ю.Н., Ксеневич И.П., Мартынов И.А., Митенков Ф.М., Матвеенко А.М., Новожилов Г.В., Панин В.Е., Паничев Н.А., Патон Б.Е., Пашин В.М., Платонов В.Ф., Пугин Н.А., Румянцева О.Н., Силаев И.С., Федосов Е.А., Федоров И.Б., Фортов В.Е., Черный Г.Г., Шемякин Е.И.

МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2006

Раздел III

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАШИН

Том III-6

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПЛАСТМАСС, СТЕКЛА И КЕРАМИКИ

Редактор-составитель д-р техн. наук, проф.
В.С. Боголюбов

Ответственный редактор чл-.корр. РАН
П.Н. Белянин

Редакторы тома: **Г.С. Головкин** (Технология производства изделий из полимерных композиционных материалов), **Г.В. Комаров** (Технология производства машиностроительных изделий из пластмасс), **А.Г. Кобелев** (Технология производства волокнистых композиционных материалов с металлической матрицей и изделий из них), **В.И. Галкин** (Технология производства слоистых металлических композиционных материалов и изделий из них), **В.И. Костиков** (Технология производства изделий из керамики и технического стекла), **В.С. Боголюбов** (Нанотехнологии в машиностроении)

МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2006

УДК 621.01
ББК 34.43
М38

РФФИ Издание осуществлено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 00-01-14114

Авторы: В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин, Г.С. Головкин, Б.А. Арефьев, Н.Н. Беклемишев, В.Е. Берсудский, А.А. Быков, Р.З. Валиев, В.М Виноградов, В.В. Воробей, Н.В. Выморков, В.И. Галкин, Ю.Л. Гринштейн, В.Н. Егоров, В.Ф. Забашта, А.А. Заболоцкий, А.Т. Каверов, М.Л. Кербер, А.Г. Кобелев, С.И. Козий, С.А. Колесников, Ю.Р. Колобов, Г.В. Комаров, В.И. Костиков, Г.А. Кравецкий, Г.А. Кривов, В.В. Кудинов, Е.В. Кузнецов, В.Б. Литвинов, В.И. Лысак, И.В. Малков, В.Ф. Мануйлов, Ю.А. Михайлин, С.В. Михеев, Г.А. Могильный, А.С. Овчинский, А.И. Попов, В.В. Пушин, В.А. Рач, А.Г. Ромашин, С.В. Румянцев, С.Е. Салибеков, В.И. Смирнов, В.Ф. Солинов, Ю.М. Тарасов, В.А. Титов, Л.И. Тучинский, Н.М. Чалая, Т.А. Чернышова, А.Н. Чеховой, В.М. Чубаров, А.С. Шаталин, М.А. Шерышев

Рецензенты: С.В. Бухаров, В.А. Гончаренко, А.И. Ендогур, Р.П. Келина, В.В. Коннов, Г.И. Львов, Г.А. Молодцов, В.В. Столяров, Е.Ф. Харченко, Н.А. Чичинев, И.Л. Шкарупа

Редакционный совет тома: В.С. Боголюбов, А.Г. Братухин, О.С. Сироткин, В.И. Костиков, Г.С. Головкин, Г.В. Комаров, А.Г. Кобелев, Г.А. Кривов, В.И. Галкин, В.Б. Литвинов

Ученый секретарь тома: Г.С. Головкин

Рабочая группа Редакционного совета: К.С. Колесников, П.Н. Белянин, В.В. Васильев, В.К. Асташов, А.П. Бессонов, Е.Т. Долбенко, И.Н. Жесткова, Н.Ф. Иванникова, Г.М. Москвитин

Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: М38 Машиностроение.

Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики. Т. III-6 / В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин, Г.С. Головкин и др.; Под общ. ред. В.С. Боголюбова. 2006. – 576 с.: ил.

ISBN 5-217-03017-8 (т. III-6)
ISBN 5-217-01949-2

Книга содержит сведения о технологии производства и переработки в изделия материалов различной природы и состава: пластмасс, полимерных композиционных материалов, композиционных материалов с металлической матрицей, керамики и стекла.

Рассмотрены методы и средства производства изделий, физические и химические процессы, сопровождающие формование деталей и сборку конструкций, механизмы формирования армирующих структур.

УДК 621.01
ББК 34.43

ISBN 5-217-03017-8 (т. III-6)
ISBN 5-217-01949-2

© Издательство "Машиностроение", 2006

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 12

Раздел 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 13

Глава 1.1. Основные концепции технологии производства изделий из полимерных композиционных материалов (*О.С. Сироткин, В.С. Боголюбов*) 13

1.1.1. Материаловедческие аспекты проектирования технологических процессов 14

1.1.2. Особенности и перспективы развития производств 15

1.1.3. Реализация технологических концепций в производстве машиностроительных конструкций из ПМ и ПКМ 21

Список литературы 26

Глава 1.2. Процессы изготовления и свойства связующих для полимерных композиционных материалов (*Ю.А. Михайлин, М.Л. Кербер*) 27

1.2.1. Приготовление связующих 30

1.2.2. Технологические свойства полимерных связующих 31

1.2.3. Эксплуатационные свойства полимерных матриц 34

1.2.4. Деформационная совместимость компонентов ПКМ 34

1.2.5. Влияние механических свойств полимерных матриц на прочность ПКМ 36

1.2.6. Трещиностойкость 37

1.2.7. Теплостойкость матриц и ПКМ 38

Список литературы 45

Глава 1.3. Технология производства деталей из термопластичных композиционных материалов (*Г.С. Головкин*) 45

1.3.1. Технологические свойства ТКМ 46

1.3.2. Технология изготовления препрегов ТКМ 50

1.3.3. Технология изготовления полуфабрикатов ТКМ 52

1.3.4. Технология формирования заготовок деталей из ТКМ 60

1.3.5. Технология формования деталей из ТКМ 62

1.3.5.1. Модификации стандартных способов формования 62

1.3.5.2. Новые способы формования 65

1.3.5.3. Перспективные способы формования деталей из ТКМ 68

Список литературы 70

Глава 1.4. Процессы формирования армирующих наполнителей и сложных структур из них (*В.В. Воробей*) 71

1.4.1. Формирование волокнистых наполнителей 71

1.4.2. Формирование армирующих каркасов композиционных материалов 76

1.4.3. Методы изготовления каркасов 79

Глава 1.5. Технология изготовления препрегов на основе термореактивных связующих (*В.М. Виноградов*) 82

1.5.1. Основные операции технологического процесса получения препрегов жидкофазным способом 83

1.5.2. Жидкофазное совмещение связующих с наполнителем 89

1.5.3. Оборудование для производства препрегов 95

Список литературы 104

Глава **1.6. Технологическая подготовка производства изделий из ПКМ** (*В.Ф. Забашта*) 104

1.6.1. Общие принципы, особенности и методические основы ТПП изделий из ПКМ 104

1.6.2. Обеспечение технологичности проектируемых конструкций 106

1.6.3. Разработка технологических процессов 108

1.6.4. Проектирование и изготовление средств технического оснащения 115

1.6.5. Организация и управление процессом ТПП изделий из ПКМ 123

1.6.6. Структура производственных мощностей ТПП изделий из ПКМ 127

1.6.7. Оптимизация и технико-экономическая эффективность ТПП изделий из ПКМ 128

1.6.7.1. АСТПП – основа оптимизации ТПП 128

1.6.7.2. Технико-экономическая эффективность ТПП 134

1.6.8. Техника безопасности и охрана труда в производстве изделий из ПКМ 138

Список литературы 142

Глава **1.7. Изготовление элементов конструкций из термореактивных композиционных материалов методом намотки** (*В.А Рач, И В Малков, Г.А Могильный*) 143

1.7.1. Общая характеристика и классификация видов намотки 143

1.7.2. Оборудование и оснастка 148

1.7.3. Технологические параметры процесса намотки 155

1.7.4. Методика испытаний при оптимизации конструкции намотанной детали 159

Список литературы 160

Глава **1.8. Технология и оборудование для производства изделий из углерод-углеродных композиционных материалов** 161

1.8.1. Методы и оборудование для производства углеродных волокон и тканей (*А.Т. Каверов*) 162

1.8.2. Технология изготовления заготовок для углерод-углеродных композиционных материалов (*С.А. Колесников*) 165

1.8.3. Оборудование и оснастка для карбонизации заготовок, их пропитки пеком, высокотемпературной обработки и пиролитического уплотнения деталей из углерод-углеродных материалов (*С.А Колесников*) 168

1.8.4. Способы защиты от оксидирования и эрозионных воздействий деталей из углерод-углеродных КМ (*В.И Костиков*) 171

1.8.5. Методы соединения элементов конструкций из углерод-углеродных КМ (*Г.А Кравецкий*) 171

Список литературы 175

Глава **1.9. Технология производства деталей из КМ автоматизированной выкладкой** (*А Г. Ромашин, Н.В. Выморков*) 176

Глава **1.10. Технология изготовления клееных конструкций из полимерных композиционных материалов с сотовым заполнителем** (*В.Е Берсудский, В.С. Боголюбов, Ю М. Тарасов*) ... 181

1.10.1. Виды и характеристики сотовых конструкций, типоразмеры сотовых заполнителей 181

1 10.2. Изготовление сотовых заполнителей из алюминиевой фольги и полимерных композиционных материалов 184

1.10.3. Методы и средства сборки узлов и агрегатов из ПКМ ... 189
Список литературы 193

Глава **1.11. Технология сварки деталей из полимерных композиционных материалов** (*Г.В. Комаров*) 194
1.11.1. Специфические особенности сварки полимерных композиционных материалов 194
1.11.2. Сварка нагретым газом .. 197
1.11.3. Сварка нагретым инструментом 198
1.11.4. Сварка закладным нагревательным элементом 201
1.11.5. Ультразвуковая сварка ... 206
1.11.6. Сварка трением 210
Список литературы 211

Глава **1.12. Методы, средства и технология неразрушающего контроля качества изделий из ПКМ** (*С.В. Румянцев, А.И. Попов, В.Н Егоров*) 212
1.12.1. Методы и средства НК изделий из ПКМ 212
1.12.1.1. Акустические методы и средства контроля ... 213
1.12.1.2. Радиационные методы и средства НК 218
1.12.1.3. Оптические методы и средства НК 227
1.12.1.4. Тепловые методы и средства НК 229
1.12.1.5. Радиоволновые методы и средства НК 232
1.12.2. Методы и средства НК плотности и толщины стенок деталей из ПКМ и покрытий из них 233
1.12.2.1. Акустические методы и средства 233
1.12.2.2. Радиационные методы и средства 234
1.12.2.3. Тепловые методы и средства 239
1.12.2.4. Электроемкостные методы и средства 240
1.12.2.5. Радиоволновые методы и средства 242
Список литературы 243

Глава **1.13. Технология соединений деталей из полимерных композиционных материалов** (*О.С. Сироткин, Г.В. Комаров, В.Б. Литвинов*) 243
1.13.1. Классификация соединений 243
1.13.2. Прессовые соединения ... 244
1.13.3. Замковые соединения 247
1.13.4. Механическое крепление 248
1.13.4.1. Заклепочные соединения 251
1.13.4.2. Болтовые соединения 261
1.13.4.3. Винтовые соединения 264
1.13.5. Формованные соединения 274
Список литературы 279

Раздел **2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС** 280

Глава **2.1. Технологические свойства конструкционных пластмасс** (*М.Л. Кербер*) 280
2.1.1. Термопласты 280
2.1.2. Реактопласты 285
Список литературы 291

Глава **2.2. Технология формования машиностроительных деталей из пластмасс** (*Н.М. Чалая*) 292
2.2.1. Литье 292
2.2.2. Центробежное формование 297
2.2.3. Прессование 297
2.2.4. Экструзия 299
2.2.5. Каландрование 303
2.2.6. Раздувное формование 304
2.2.7. Формование из листов и пленок 305
Список литературы 310

Глава **2.3. Технология сварки деталей из пластмасс** (*Г.В. Комаров*) 311
2.3.1. Понятия, механизмы и классификации методов сварки 311
2.3.2. Сварка нагретым газом ... 315
2.3.3. Сварка нагретым инструментом 317
2.3.4. Сварка закладным нагревательным элементом 320
2.3.5. Ультразвуковая сварка 323
2.3.6. Сварка трением 328
2.3.7. Высокочастотная сварка .. 330
2.3.8. Сварка расплавом 331
2.3.9. Лучевая прессовая сварка 332
2.3.10. Сварка растворителем ... 333
Список литературы 334

Глава **2.4. Технология склеивания деталей из пластмасс** (*Г.В. Комаров*) 334
2.4.1. Выбор клея 336
2.4.2. Технологический процесс склеивания 337
Список литературы 347

Глава **2.5. Техническое оснащение процессов переработки пластмасс** (*М А Шерышев*) 347
2.5.1. Оборудование 347
2.5.1.1. Литье под давлением 347
2.5.1.2. Прессование 351
2.5.1.3. Термоформование ... 356
2.5.1.4. Экструзия 360
2.5.2. Оснастка 363
Список литературы 370

Раздел **3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ** 371

Введение 371

Глава **3.1. Характеристика производства полуфабрикатов и изделий из ВМКМ** 373
3.1.1. Подготовительная стадия 373
3.1.1.1. Подготовка и совмещение составляющих ВМКМ (*В.М. Чубаров*) 373
3.1.1.2. Нанесение покрытий на волокна (*Т.А. Чернышова*) 373
3.1.2. Процессы предварительного совмещения составляющих 376
3.1.2.1. Механическая сборка и деформационные процессы (*В.Ф. Мануйлов*) 376
3.1.2.2. Склеивание (*С.Е Салибеков*) 377
3.1.2.3. Плазменное напыление (*В.В. Кудинов*) 377
3.1.2.4. Процессы самопроизвольной пропитки и протягивание волокон через матричный расплав (*А.А. Заболоцкий*) 379
3.1.3. Процессы формообразования полуфабрикатов и изделий из ВМКМ 381
3.1.3.1. Твердофазные процессы (*В.Ф. Мануйлов*) 381
3.1.3.2. Жидкофазные процессы (*С.Е. Салибеков*) 382
Список литературы 383

Глава **3.2. Элементы сборных заготовок** 383
3.2.1. Монослойные ленты-полуфабрикаты плазменного напыления (*В.В. Кудинов*) 383
3.2.2. Жгуты волокон, пропитанные расплавом матричной составляющей (*А.С. Овчинский*) 384
3.2.3. Тканые полуфабрикаты (*А.А. Заболоцкий*) 387
Список литературы 388

Глава **3.3. Твердофазные процессы и оборудование для компактирования и формообразования изделий из ВМКМ** 388
3.3.1. Диффузионная сварка и прессование полос и листов 388
3.3.1.1. Оборудование и оснастка (*В.М. Чубаров*) 388

3.3.1.2. Технологические режимы (*Б.А. Арефьев*) 392
3.3.2. Прокатка полос и листов 394
3.3.2.1. Прокатка ВМКМ поперек волокон (*В.Ф. Мануйлов*) 394
3.3.2.2. Прокатка ВМКМ вдоль волокон (*Б.А. Арефьев*) 397
3.3.2.3. Прокатка листов из ВМКМ с деформируемыми волокнами (*Н.Н. Беклемишев*) 398
3.3.3. Прессовые процессы изготовления труб (*В.Ф. Мануйлов*) .. 400
3.3.4. Динамические процессы компактирования изделий из ВМКМ (*Б.А. Арефьев*) 404
Список литературы 406

Глава **3.4. Жидкофазные процессы и оборудование для совмещения составляющих ВМКМ** 407
3.4.1. Технологические характеристики расплавов при жидкофазном получении ВМКМ (*Л.И. Тучинский*) 407
3.4.2. Пропитка в вакууме и при нормальном давлении (*Л.И. Тучинский*) 409
3.4.3. Процессы принудительной пропитки (*А.А. Заболоцкий*) 413
Список литературы 418

Глава **3.5. Элементы САПР технологической подготовки производства изделий из ВМКМ** 419
3.5.1. Критерии разработки процессов (*В.Ф. Мануйлов*) 419
3.5.2. Модели, применяемые при разработке процессов изготовления изделий из ВМКМ (*В.И. Галкин*) 421
3.5.3. Применение элементов САПР ТПП в производстве изделий из ВМКМ 425
3.5.3.1. Листы (*Б.А. Арефьев*) 425
3.5.3.2. Трубы (*В.И. Галкин*) 425
Список литературы 429

Глава **3.6. Финишные операции изготовления изделий из ВМКМ** 429
3.6.1. Формообразование деталей из компактных листовых заготовок 429
3.6.1.1. Расчет параметров процесса гибки волокнистых ВМКМ (*В.И. Смирнов*) 430
3.6.1.2. Особенности реализации пластических свойств при гибке листовых заготовок из ВМКМ, упрочненных непрерывными волокнами (*В.А. Титов*) 436
3.6.1.3. Типовые схемы деформирования при выполнении операций гибки (*Г.А. Кривов*) 440
3.6.1.4. Процессы, оснастка и оборудование для изготовления типовых деталей 444
3.6.2. Импульсные процессы обработки ВМКМ (*С.И. Козий*) 454
Список литературы 460

Раздел **4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ** (*А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, А.А. Быков, Е.В. Кузнецов*) 461

Введение 461

Глава **4.1. Способы и основы теории соединения металлов** 462
4.1.1. Классификация композиционных материалов и способов их получения 462
4.1.2. Физико-химические основы соединения металлов в твердой и жидкой фазах 463
4.1.3. Физическая природа образования соединения при сварке металлов взрывом 467
4.1.4. Контактные поверхности составляющих композита и способы их подготовки 469

Глава 4.2. Технология производства СКМ литьем, наплавкой и совместной горячей пластической деформацией 470

4.2.1. Литейное плакирование и наплавка 470

4.2.2. Горячая пакетная прокатка 475

4.2.3. Прессование слоистых композиционных материалов 476

4.2.4. Производство биметаллических труб и прутков 478

Глава 4.3. Холодное плакирование композиционных материалов 479

4.3.1. Схемы и способы процесса 479

4.3.2. Особенности деформации слоистых полос 480

4.3.3. Формирование структуры и свойств СКМ 484

4.3.4. Технология холодного плакирования 486

Глава 4.4. Технология производства СКМ сваркой взрывом и диффузионной сваркой 488

4.4.1. Основные схемы и параметры сварки взрывом 488

4.4.2. Классификация технологических схем сварки металлов взрывом и основные области ее применения 490

4.4.3. Особенности диффузионной сварки 493

4.4.4. Оборудование и технология диффузионной сварки 496

Глава 4.5. Термическая обработка и контроль качества СКМ 499

4.5.1. Соединения разнородных сталей 499

4.5.2. Соединения металлов, не взаимодействующих между собой, образующих между собой твердые растворы и химические соединения 501

4.5.3. Показатели качества и механические методы контроля ... 503

4.5.4. Неразрушающие методы контроля. Металлографические и структурные методы 507

4.5.5. Особенности обработки изделий из СКМ 509

Список литературы 511

Раздел 5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА 513

Глава 5.1. Технология производства изделий из керамических материалов (*А.С. Шаталин*) 513

5.1.1. Технологические и функциональные свойства керамических материалов 513

5.1.2. Особенности производства изделий из керамических материалов 518

5.1.3. Типовые технологические процессы и оборудование 520

5.1.4. Особенности организации производства деталей 527

Список литературы 528

Глава 5.2. Технология производства изделий из технического стекла (*В.Ф. Солинов, Ю.Л. Гринштейн*) 528

5.2.1. Области применения и требования к изделиям из технического стекла 528

5.2.2. Технологические свойства технических стекол 530

5.2.3. Технология производства изделий из технического стекла 532

5.2.4. Методы контроля и испытания изделий 539

5.2.5. Особенности организации производства изделий из технического стекла 541

Список литературы 543

Раздел 6. НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ 544

Глава 6.1. Общие сведения и классификация наноматериалов и нанотехнологий (*А.Н Чеховой*) 544

Глава 6.2. Физико-химические и структурные основы нанотехнологий машиностроения (*А.Н Чеховой*) 548

6.2.1. Синергетика наноструктурирования на этапе эксплуатации 549

6.2.2. Технологические особенности перспективных производственных нанотехнологий 552

6.2.3. Нанокомпозиционные полимерные материалы 555

Глава 6.3. Типовые технологии производства нанокомпозиционных материалов в условиях интенсивных пластических деформаций 556

6.3.1. Технологические особенности формирования наноструктуры в аустенитной стали при гидроштамповке и ротационной вытяжке (*А.Н. Чеховой*) 557

6.3.2. Наноструктурирование технически чистого титана (*Р.З Валиев, Ю.Р.Колобов, А.Н. Чеховой*) 558

6.3.3. Нанотехнология производства композиционного материала на основе порошка меди (*Ю.Р Колобов*) 560

6.3.4. Технологии наноструктурирования материалов с эффектом памяти формы (*В.В. Пушин*) 560

Глава 6.4. Метрология наносостояний (*А Н. Чеховой*) 563

Список литературы 568

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 570

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прогресс в судостроении, химическом машиностроении, автомобильной, авиакосмической и других отраслях машиностроения на рубеже третьего тысячелетия неразрывно связан с созданием новых материалов, наиболее перспективными среди которых являются пластические массы, композиционные материалы, керамика. Объясняется этот факт в первую очередь возможностью варьирования в широких пределах характеристиками их эксплуатационных свойств, экономией материальных и энергетических ресурсов, сокращением трудоемкости и цикла производства, упрощением технического оснащения, уменьшением производственных площадей.

С учетом своеобразия и оригинальности методов переработки многокомпонентных материалов в изделия особая роль отводится совершенствованию технологии, автоматизации производственных процессов и созданию специализированных экологически чистых производств. При этом под совершенствованием технологии подразумевается не только модернизация существующих и разработка новых прогрессивных методов и средств производства изделий из композиционных материалов, но и поиск эффективных способов постоянного улучшения их технологических свойств.

Современная автоматизация средств производства основана на компьютеризации и математическом моделировании, поэтому важным условием прогресса становится выявление и изучение физико-химических основ процессов, происходящих в композиционных материалах во время выполнения технологических операций при их изготовлении и переработке в изделия. Наряду с этим химический характер такого производства, в ходе которого происходит синтез, химические превращения, взаимодействия и деструкция с выделением побочных продуктов, делает актуальной и экологическую проблему.

Предлагаемый читателю материал отображает многолетний опыт отечественного и зарубежного машиностроения в области производства изделий из пластических масс, композиционных материалов, керамики.

В написании тома приняли участие известные специалисты научных и производственных центров Российской Федерации и Украины.

Мы выражаем надежду, что предложенный том Энциклопедии станет полезным деятелям науки, а также студентам и аспирантам высших учебных заведений, изучающим технологию производства элементов машин из композиционных материалов, и инженерам, работающим в области перспективного машиностроения.

В.С. Боголюбов

Раздел 1

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Глава 1.1

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) и пластмассы (ПМ) стали не только полноправными конструкционными материалами, широко используемыми во всех областях техники, но и наиболее перспективными среди них в обозримом будущем (табл. 1.1.1).

В настоящее время оба вида полимерных материалов составляют в общем балансе применения конструкционных материалов приблизительно 35 %. Однако уже в 2010 г. их доля превысит 40 %, а к 2020 г. прогнозируется достижение 50 %.

Столь высокие темпы роста востребованности ПКМ и ПМ объясняются несколькими объективными причинами технического, технологического и экономического характера. Технологическая востребованность обусловлена возможностью с их помощью решать постоянно усложняющиеся конструкционные и другие функциональные задачи при создании новой техники. При этом ПКМ и ПМ дополняют друг друга. Первые, являясь в основном изотропными материалами, используются прежде всего для решения проблем сопротивления конструкций интенсивным силовым воздействиям при любых видах нагружения – статических и динамических, циклических и ударных. При этом в отличие, например, от металлов ПКМ, будучи к тому же в несколько раз легче, одновременно способны обеспечивать и комплекс других эксплуатационных задач: теплофизических, хемостойких, электротехнических и др. Диапазоны технических характеристик нередко измеряются несколькими порядками величин:

1.1.1. Мировая структура применения конструкционных материалов, %

Материалы	Годы				
	1980	1990	2000	2010*	2020*
Металлы	70	57	44	35	25
ПМ	14	18	22	25	32
Композиционные**	6	12	14	17	18
Керамика***	10	13	20	23	25

* Прогноз

** Включая ПКМ, керамические и карбонитридные КМ

*** Включая пиро- и техническую керамику

Плотность, кг/м^3	900…2200
Прочность при растяжении, МПа	1…10 000
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0,01…1000
Коэффициент Пуассона	0,15…0,5
Удельная ударная вязкость, кДж/м^2	2,5…500
Температура эксплуатации, °С	–270…400
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	0,002…300
Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^{-6}$, К$^{-1}$	–0,8…1000
Удельное объемное электросопротивление, Ом · м	10^{-2}…10^{19}
Диэлектрическая проницаемость	2…10
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $10^9 – 10^{10}$, Гц · 10^{-3}	1…1000
Твердость НВ	10…500

Специфичность ПМ, по большей части изотропных, проявляется при создании изделий с рядом таких ценных технических свойств, как демпфирующие и фрикционные в широком диапазоне значений; тепло-, криогено-, влаго-, хемо-, радиационно-, огнестойкость; электро-, звуко-, теплоизоляционные или, наоборот, проводящие, а также эластичность, декоративность, минимальная (до десятков кг/м^3) плотность и другие свойства. Широкая гамма технических возможностей ПМ предопределяет наиболее ускоренные темпы их производства и применение во всем мире (табл. 1.1.2).

1.1.2. Мировое производство полимерной продукции, млн. т

Продукция из ПКМ и ПМ	2000 г.	Темпы роста с 1991 по 2000 гг., %
Всего	153...171	2
В том числе пластмассы (ПМ)	120...135	3...4

Технологические возможности ПКМ и ПМ явились не менее действенным стимулом для интенсификации их востребованности при разработке и производстве современных образцов техники. Для этих полимерных материалов характерна малооперационность технологических процессов переработки, а потому высокая производительность производства изделий, низкая трудо-, материало- и энергоемкость, сравнительно небольшие капиталовложения в средства технического оснащения, строительство и эксплуатацию производственных площадей.

Вместе с тем, стремление широко использовать ПКМ и ПМ в технике, прежде всего в машиностроении, породило комплекс принципиально новых проблем, научным решением которых призвана заниматься технология – наука о методах и средствах производства изделий из полимерных материалов. Среди наиболее важных проблем достаточно назвать неправомерность копирования конструктивных решений, ранее найденных и отработанных при создании металлопрототипов изделий, необходимость проектировать и создавать ПКМ одновременно с изделием и, наконец, учитывать зависимость свойств ПКМ и ПМ от способов и режимов формования, хранения и эксплуатации изделий. Максимальная реализация их свойств зависит от учета факторов, обусловленных органической природой, гетерогенностью состава и согласованностью структуры полимерных материалов с векторами сил внешнего воздействия.

1.1.1. МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методики конструирования и технологической подготовки производства изделий из ПМ и ПКМ имеют существенные отличия. В случае пластмасс конструктор имеет дело с материалом, состав которого не претерпевает существенных изменений в процессе формования изделия, поэтому осуществлять расчет конструкции и отрабатывать конфигурацию изделия на технологическую рациональность можно, руководствуясь лишь паспортными данными о свойствах ПМ выбранной марки. Это обстоятельство, а также наличие большой номенклатуры типовых изделий из ПМ и типовых технологических процессов их производства уже позволили в значительной мере автоматизировать процессы конструирования новых изделий и проектирования соответствующих технологических процессов.

Изделия из ПМ классифицированы по конструктивным и технологическим признакам на основе единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и технологического классификатора деталей машино- и приборостроения. Классификатор ЕСКД является информационной частью единой обезличенной системы обозначения изделий и конструкторских документов ГОСТ 2.201–80. Внедрение этого стандарта в промышленности вместе с технологическим классификатором деталей создало предпосылки для комплексного решения следующих основных задач:

анализа деталей по конструкторским и технологическим признакам;

автоматизации проектирования деталей и технологических процессов;

тематического поиска типовых и групповых технологических процессов и средств технического оснащения;

рационального выбора типоразмеров технологического оборудования.

Внедрение типовых технологических процессов, систем автоматизированного проектирования (САПР) и управления технологическими процессами (АСУ ТП) снижает трудоемкость и сроки подготовки производства. Для тех же целей создана автоматизированная информационно-поисковая система (АИПС "Пластик") на базе IBM, совместимых с ПЭВМ. Она содержит информацию по основным видам серийно производимой продукции переработки пластмасс, включая изделия и детали для автомобилей и прочих видов продукции машиностроения и других отраслей промышленности. Банк данных системы может содержать от 15 до 30 тыс. наименований продукции, выпускаемой на 500...800 предприятиях разной региональной и ведомственной принадлежности, а также справочник-ценник ПМ, адресный указатель предприятий, классификаторы оборудования, способы изго-

товления изделий и др. Кроме того, система позволяет объективно вести экономическую оценку затрат по отдельным процессам и производствам, сравнивая их с имеющимися аналогами и прототипами.

В случае ПКМ конструирование изделия осложняется одновременной разработкой состава и структуры композиционного материала. Основополагающим принципом становится представление о ПКМ как о сочетании компонентов, обеспечивающем новые качества, не присущие каждому из компонентов (матрице или наполнителю) в отдельности. Такое понимание сути ПКМ в сочетании с объективной необходимостью согласовывать требования к изделию с возможностями материала обусловливает необходимость каждый раз как бы заново создавать (проектировать, конструировать, строить) ПКМ, варьируя компоненты по свойствам, взаимодействию, схемам распределения. Для этого создателям ПКМ приходится оперировать понятиями и величинами, принятыми в микромеханике материалов.

Составными частями этого уровня являются армирующие наполнители, микронные соединительные слои матрицы, межфазные области и включения, не видимые невооруженным глазом, в виде пор, трещин, инородных фрагментов. Развитие методов механики ПКМ, в свою очередь, позволяет дать описание и сформулировать требования к структуре построения материала.

Разработка элементов конструкций из ПКМ осуществляется по нескольким специализированным направлениям, базирующимся на механических, термодинамических, гидродинамических и других закономерностях. Классификация и обобщение этих закономерностей позволяют сформулировать этапы производства изделий из ПКМ и выработать требования к средствам технического обеспечения технологических процессов и, прежде всего, к оборудованию. При этом структура производства, состав технологических процессов и оборудования существенно отличаются от традиционного металлоперерабатывающего производства.

1.1.2. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВ

Производства изделий из пластмасс (ПМ) и ПКМ несмотря на общий химический тип имеют принципиальные различия. Они проявляются в разной номенклатуре технологических способов и, следовательно, средств технического оснащения технологических процессов, а также в различной этапности процессов изготовления изделий.

Технологические методы для формования изделий из ПМ наиболее просты и экономичны. При помощи этих методов исходные ПМ, используемые в виде гранул, таблеток, шпона, можно перерабатывать в изделия непосредственно. По этой причине процессы формования, обеспечивая высокое качество продукции, достаточно производительны. В общем случае они сводятся к реализации способности ПМ заполнять формующие инструменты (формы) в вязкотекучем или эластичном состоянии с последующей фиксацией достигнутой конфигурации либо охлаждением до температуры стеклования, если ПМ термопластичный, либо переводом ПМ в отвержденное состояние, если его основой является реактопласт, приобретающий при выдержке в нагретом состоянии пространственную макромолекулярную структуру.

Выбор метода формования определяется типом ПМ и кофигурацией изделия. Современная промышленность переработки ПМ располагает широким набором методов переработки и парком оборудования, насчитывающим более 3500 типов машин и аппаратов. В тех случаях, когда можно использовать несколько различных методов формования, учитываются соображения качества и экономики. Все многообразие этих методов можно свести к следующим основным группам: каландрование, экструзия, формование оболочек на пуансонах и в матрицах, формование литьем под давлением и заливкой, вторичное формование.

Каландрование применяется для переработки резин и ПМ, причем как в классическом виде, так и в качестве непрерывных способов формования из них покрытий.

Экструзионное формование, являющееся наиболее важным промышленным методом, включает все возможные способы, сводящиеся к продавливанию расплава ПМ через фильеру. Так формуются волокна, пленки, листы, трубы, шланги, профили, изоляционные покрытия на электропровода и кабели. Все варианты экструзии являются непрерывными процессами в отличие от следующих трех методов формования, имеющих периодический характер.

Формование оболочек охватывает макание, обратное макание, напыление порошком и ротационное формование. Во всех случаях процесс сводится к формированию сравни-

тельно толстой оболочки на внешней или внутренней поверхности модели изделия.

В случаях *литья*, *прессования* и *заливки* общим является заполнение полости формующего инструмента термопластичной или термореактивной ПМ или мономером, полимеризующимся в ходе формования. Сюда относят традиционное литье под давлением, литьевое и прямое прессование, обычную заливку мономеров или низкомолекулярных полимеров.

Вторичное формование подразумевает формование изделий из предварительно отформованных из ПМ заготовок. К этой группе относится термоформование, раздув и холодное формование.

Реологические характеристики расплавов ПМ играют доминирующую роль в процессах формования. Технологические методы, наиболее полно учитывающие реологические возможности ПМ, становятся наиболее перспективными.

Технологические методы формования и концепции развития производства изделий из ПКМ отличаются по многим факторам. Наибольший опыт в этих вопросах накоплен во всем мире авиационной промышленностью, поэтому дальнейший анализ базируется на схеме рис. 1.1.1.

К числу технологических аспектов, связанных с повышением эффективности авиационных конструкций из ПКМ, относится достижение заданных стабильных механических характеристик этих материалов путем повышения степени механизации и автоматизации производственных процессов, а также применение препреговой технологии.

Интенсивное развитие в авиакосмическом и автомобилестроительном производстве получил метод трансферного формования (RTM), основанный на впрыске смолы через пористую среду волокнистой заготовки, предварительно размещенной в закрытой форме.

С учетом жидкофазного характера формования было разработано новое поколение смол, способных повысить качество ПКМ. Свойства смол исследованы с применением термального анализа и механических испытаний. Изделия, полученные методом RTM, по своим эксплуатационным характеристикам превосходят аналоги, получившие применение в авиакосмической промышленности с использованием препрегов.

На рис. 1.1.2 показаны зависимости, определяющие эффективность применения ПКМ в самолетных конструкциях. Так, уменьшение коэффициента вариации $K_в$ физико-механических свойств до 5...7 % достигается созданием технологии, оборудования и оснащения, направленных на повышение степени механизации и автоматизации серийного производства до 60...80 %, что позволяет уменьшить коэффициент запаса при проектировании конструкций до 1,5.

Технологические разработки в РФ осуществляются по четырем основным направлениям: при отработке технологических свойств материалов на стадии их создания; на стадии обеспечения технологичности конструкций в процессе их разработки; при создании и отработке технологических процессов для опытного и серийного производства, а также на этапе создания автоматизированного оборудования и механизированного инструмента.

В основе этих направлений лежит *концепция комплексной автоматизации технологической подготовки и производства авиационных конструкций из ПКМ*. В это понятие входят интегрированные системы автоматизированного проектирования состава ПКМ, технологических процессов, оборудования, оснастки, технологической подготовки производства в целом, основанные в свою очередь на базах знаний, математических моделях, банках данных и локальных САПР.

В состав этой структуры входит также разработка информационно-поисковых систем, сокращающих объем работ и время на разработку конструктивно-технологических решений и технологий при создании новых авиационных конструкций.

На рис. 1.1.3 показана схема автоматизации технологических процессов производства (ТП) конструкций и оснастки из ПКМ, представляющая собой структурированный комплекс баз данных, баз моделей, программных и системных средств для накопления, обобщения и оперативного использования технологического опыта. С помощью этой системы обеспечивается автоматизированная разработка технологических процессов. Совокупность товарного выхода может служить основой для создания автоматизированных рабочих мест технолога.

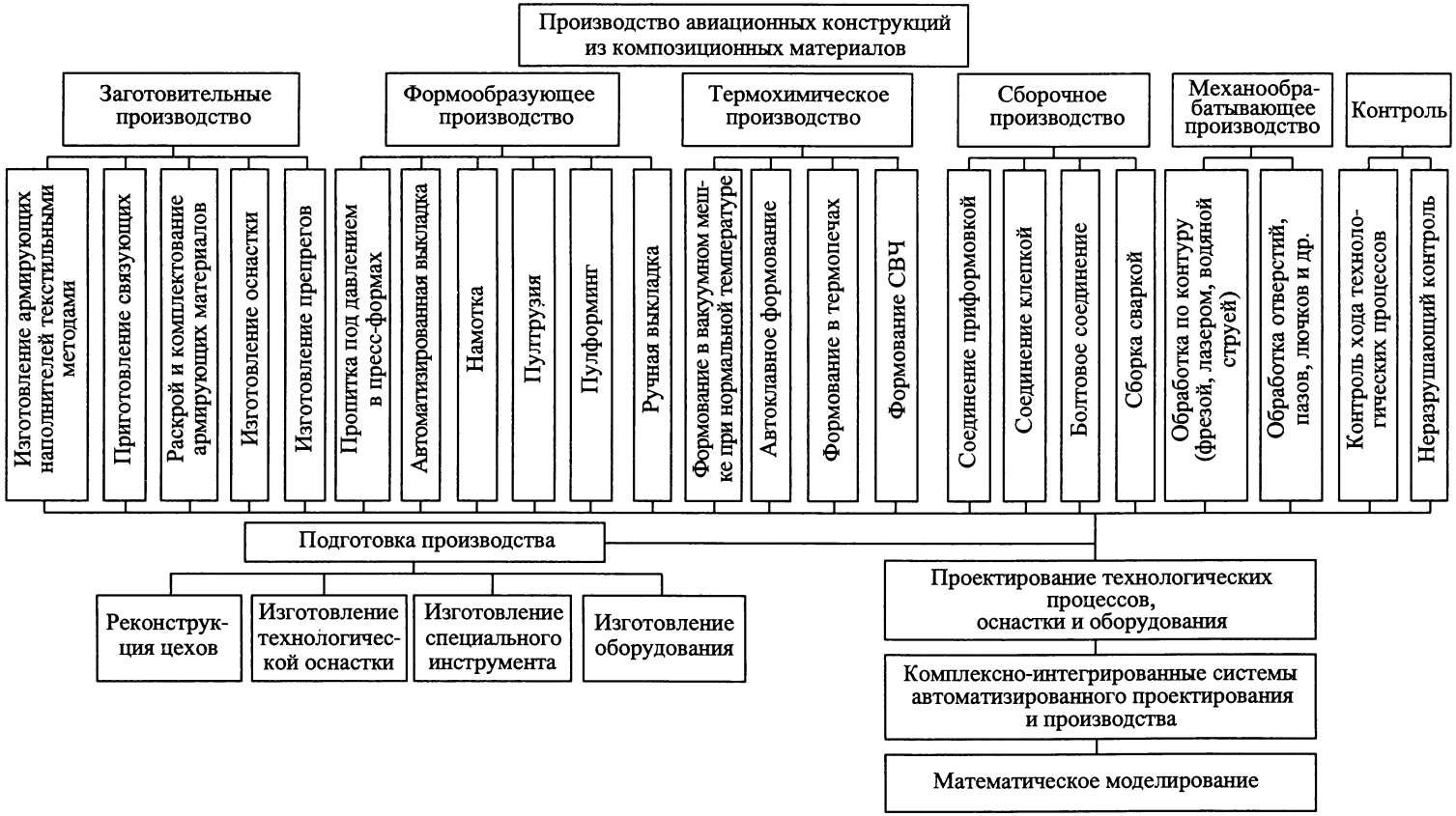


Рис. 1.1.1. Схема структуры производства авиационных конструкций из ПКМ

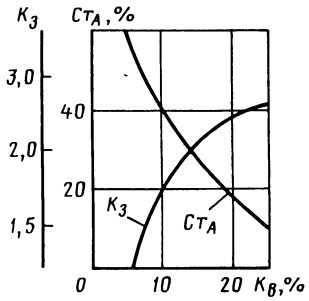


Рис. 1.1.2. Зависимость коэффициента вариации механических свойств $K_в$ и коэффициента запаса прочности $K_з$ от степени $Ст_А$ автоматизации и механизации технологических процессов

На рис. 1.1.4 показана типовая схема структуры САПР-ТП, дополненная на первом уровне пакетами прикладных программ. На втором уровне расположены схемы подсистем, содержащие конкретные элементы товарного выхода. Проведенный при создании самолетных конструкций анализ показал, что наибольшая эффективность достигается при объемах применения ПКМ, составляющих 50 % по массе и более. При этом на величину экономии массы конструкции оказывают влияние следующие основные характеристики, достижение которых осуществляется технологическими методами: уменьшение коэффициента запаса прочности $K_з$; уменьшение количества соединений и создание интегральных конструкций; рациональное конструирование под автоматические методы изготовления (увеличение технологичности конструкции).

На рис. 1.1.5 показаны результаты расчетов по прогнозу изменения структуры основных технологических процессов по мере их развития и увеличения степени автоматизации и механизации.

Намотка – наиболее автоматизированный процесс (степень автоматизации $Ст_А$ = 85 %), требующий значительно более широкого внедрения в элементы конструкций. Удельный объем этого процесса должен вырасти от 3...5 до 15...20 %. За счет этого объем применения наиболее трудоемкого процесса выкладки несколько сократится. При этом значительно возрастает $Ст_А$ выкладки благодаря использованию специального оборудования.

Постоянно возрастают и занимают все более значительное место технологии изготовления интегральных конструкций и автоматизированного неразрушающего контроля. Соответственно уменьшаются объемы сборочных работ, а степень их механизации и автоматизации возрастает. Таким образом, структура изменяется в сторону исключения некоторых ручных или маломеханизированных процессов и развития автоматизированных технологий и оборудования. В результате удельная трудоемкость изготовления уменьшится от 25...30 до 3...5 человеко-час на 1 кг конструкции.

Весьма актуальной является *концепция создания авиаконструкций интегрального типа*. К преимуществам таких конструкций относятся: уменьшение массы благодаря устранению механических соединений; снижение себестоимости путем исключения всех производственных операций, связанных с конструктивными разъемами, т.е. подгонки, сверления, сборки; сокращение технологического цикла, поскольку детали формуются одновременно с конструкцией.

Многоступенчатость традиционной технологии изготовления конструкций из ПКМ приводит к накоплению технологических дефектов и, следовательно, к значительному разбросу прочностных свойств, усложнению проектных расчетов, увеличению коэффициента запаса прочности $K_з$. *Совмещенная технология*, позволяющая получать интегральные конструкции, в основном лишена этих недостатков.

В основу разработки технологических способов изготовления положен принцип совмещенного по времени формования всех конструктивных частей узла или агрегата. При этом используют сочетание различных методов предварительного формования выкладкой, пултрузией, частичного отверждения входящих деталей (криволинейных оболочек, профилей различного сечения и т.д.). Например, при формировании панелей крыла, стабилизатора или киля моноблочного типа.

Особо важное значение в производстве изделий из полимерных композиционных материалов имеет *технологическая оснастка*. В РФ и других странах постоянно ведутся интенсивные работы по разработке специальных материалов, конструкций и процессов изготовления крупногабаритной объемной оснастки для композитного авиастроения.

Оценка реальных масштабов технологического оснащения производства определяется как количеством крупногабаритной объемной

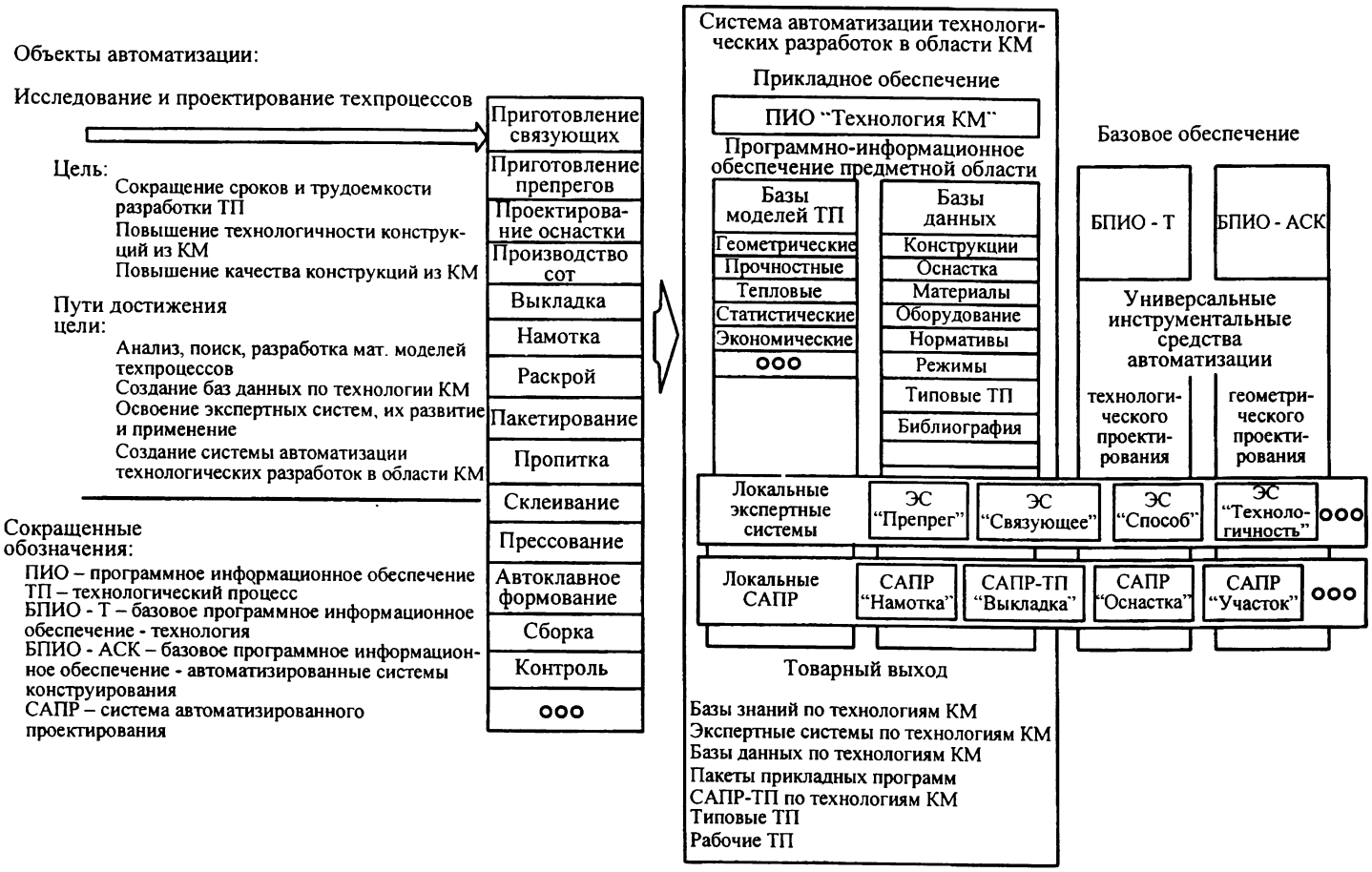


Рис. 1.1.3. Структурная схема автоматизации проектирования технологических процессов изготовления изделий и оснастки из ПКМ

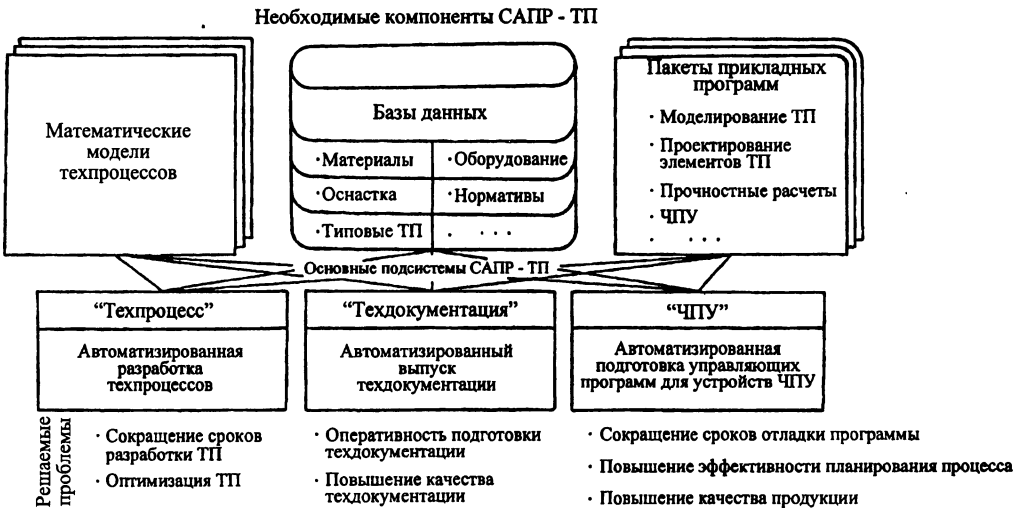


Рис. 1.1.4. Схема структуры САПР-ТП изготовлення конструкций из ПКМ

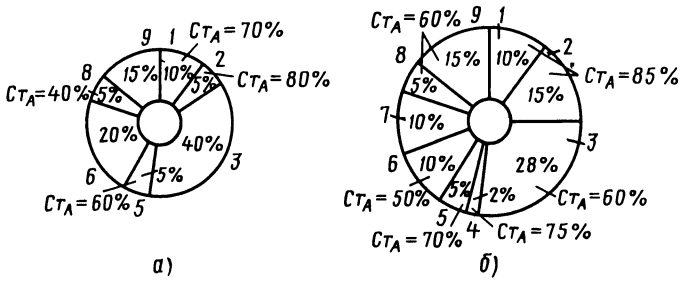


Рис. 1.1.5. Измененне структуры технологий пронзводства авиационных конструкций и степенн автоматизацни $Ст_А$:

а – $Ст_А$ – 15...25 % (1985 – 1990 гг.); *б* – $Ст_А$ = 60...70 % (2000 – 2005 гг);
1 – изготовление препрегов; *2* – намотка, *3* – выкладка; *4* – пултрузия; *5* – автоклавное формование; *6* – сборка; *7* – интегральные конструкции; *8* – механообработка; *9* – неразрушающий контроль

оснастки, так и степенью сложности ее конструкций. Так, для производства самолета среднего класса с объемом применения ПКМ 20...25 % необходимо изготовить около 2000 наименований объемной оснастки, в том числе с поверхностью сложной формы. Для изготовления этой оснастки нужно около 250 т металла и других материалов. При этом трудоемкость изготовления 1 м^2 поверхности конструкции оснастки составляет 350...400 нормочасов. От совершенства конструкции и технологии изготовления объемной оснастки зависит ее материалоемкость, цикл технологической подготовки производства, энергоемкость и технологический цикл изготовления деталей из ПКМ.

Оснастка для формообразования деталей или элементов интегральных конструкций, для сборки-склейки слоистых и сотовых панелей имеет, как правило, большие размеры и сложную форму поверхности. При ее конструировании следует учитывать, что это пространственная система, которая должна обладать свойствами управляемости температурных полей и давлений в соответствии с заданными технологическими решениями. В этих условиях значительно возрастает роль градиентов коэффициентов линейного расширения и соотношений жесткостей контактирующих оболочек оснастки и детали. Здесь исключительно важным является наличие ассортимента материалов с теплофизическими свойствами, при-

ближающимися к свойствам материалов формообразуемых деталей, и в то же время обладающих повышенной стойкостью к износу, температурным и другим циклическим нагрузкам. Неправильный выбор материалов или их сочетаний, излишняя масса конструкций делают оснастку несовершенной и могут привести к низкому качеству или браку изготовляемых деталей.

Из числа видов оснастки, используемых в авиационной промышленности РФ, наиболее перспективными являются тонкостенные конструкции с оболочками из ПКМ, подкрепленными каркасом из металлических или композитных стенок. Созданы и развиваются методы оптимального проектирования таких конструкций с помощью ЭВМ.

1.1.3. РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПМ И ПКМ

Наиболее убедительным доказательством успешной реализации рассмотренных технологических концепций могут служить объемы применения различных полимерных материалов и темпы их роста (табл. 1.1.3).

Среднегодовые темпы роста потребления ПМ (на примере полипропилена – одного из наиболее применяемых за рубежом) составили в последнее десятилетие (1990 – 2000 гг.), в %: США 5,8, Западная Европа 7,6, Япония 4,0. Однако эти цифры значительно колеблются в различных отраслях машиностроения. Даже в пределах одной отрасли применение элементов конструкций из ПМ и ПКМ может значительно колебаться (рис. 1.1.6).

Во всех этих достижениях ведущее место принадлежит технологии переработки ПМ и ПМК в изделия.

Применение ПКМ в конструкциях пассажирских самолетов. Среди различных видов полимерных материалов, применяемых в самолетостроении, ведущее место принадлежит ПКМ, обеспечивающим основные достижения как производственных, так и эксплуатационных показателей новой техники. Например, трудоемкость изготовления в среднем снижается в 1,5 – 2 раза. Масса элементов из ПКМ снижается на десятки процентов, а ресурс их работы увеличивается в 2 – 3 раза и более.

В настоящее время технология производства самолетных конструкций из ПКМ развивается опережающими темпами практически во всех промышленно развитых странах (см. табл. 1.1.3). Примеров успешного применения ПКМ насчитывается достаточно много. Приведем лишь некоторые. На самолете-гиганте "Руслан" были установлены детали и сборочные единицы из ПКМ общей массой 5,5 т, что позволило снизить массу конструкций на 1,5 т и сэкономить в течение периода эксплуатации не менее 18 тыс. т топлива. Широко представлены композиты в самолетах ИЛ-96 и Ту-204 (табл. 1.1.4 и 1.1.5).

Применение пластмасс и ПКМ в автомобилестроении. Самой крупной отраслью машиностроения в мире остается автомобилестроение. До последнего времени в конструкциях автомашин в большей мере применялись различные пластмассы (ПМ). За последние 15 лет доля ПМ в общей массе конструкции автомобиля увеличилась с 2,9 до 9,5 %, в то время как доля стали снизилась с 60,4 до 56,9 %. При конструировании новых марок автомобилей наблюдается тенденция максимального использования ПМ, чем в основном и объясняется быстрый рост объемов их потребления (табл. 1.1.6).

В настоящее время расход ПМ на один автомобиль составляет 80...120 кг. О номенклатуре применяемых ПМ дает представление табл. 1.1.7.

1.1.3. Потребление ПКМ в машиностроении стран Северной Америки, тыс. т

Отрасль машиностроения	1995 г.	2000 г	Годовой прирост, %
Авиационно-космическая промышленность	19	24	5,2
Автомобилестроение и производство других наземных видов транспорта	314	390	4,4
Судостроение	167	196	3,2

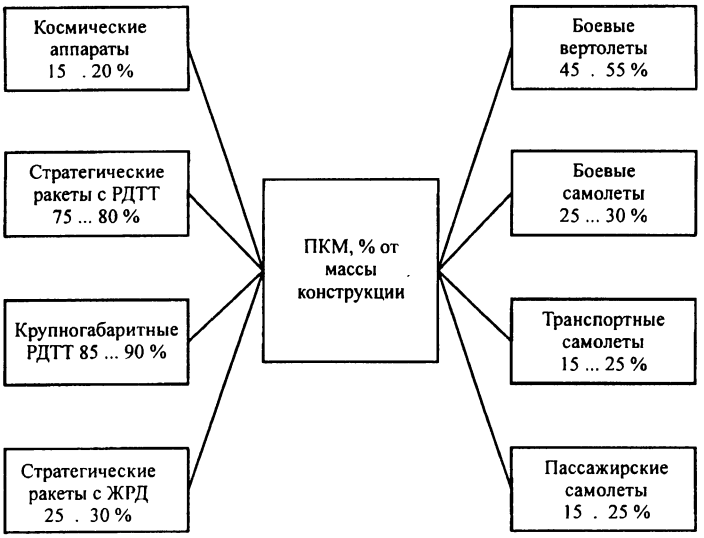


Рис. 1.1.6. ПКМ в авиационной и аэрокосмической технике

1.1.4. Области, объемы применения и виды ПКМ в элементах конструкции самолета Ил-96-300

Наименование агрегатов	Вид ПКМ	Площадь поверхности из ПКМ, м^2	Масса части конструкции из ПКМ, кг
Планер			
Агрегаты механизации крыла (элероны, интерцепторы, тормозные щитки, носовые и хвостовые части закрылков)	Углеорганопластики	100	690
Пилон (внутренние, внешние обтекатели)	Углепластики	48	230
Мотогондола (носовая часть, створки)		82	355
Конус воздухозаборника	Стеклопластики	28	85
Служебные люки		15	3
Створки шасси	Углепластики	23	120
Зализ крыла, бортовой щиток	Стеклопластики	68	165
Интерьер			
Сотовые панели и многослойные выклейки	Органопластики, стеклопластики	450	1145
Полы			
Сотовые панели	Органопластики	260	440
Перспектива			
Панели хвостовой части крыла	Углепластики на жгутовых наполнителях	70	150

1.1.5. Применение ПКМ в конструкции самолета ТУ-204

Наименование агрегата	Площадь части из ПКМ в планере, м^2	Масса части из ПКМ, кг
Планер		
Агрегаты механизации крыла	40	660
Пилон	1,5	36
Мотогондола (носовая часть, створка)	12	221
Конус воздухозаборника	4	10
Створки шасси	16	184
Зализ крыла	12	187
Агрегаты оперения:		
киль + руль направления	55	232
стабилизатор + руль высоты	25	544
Носовой обтекатель	3	34
Створки вспомогательной силовой установки	4,2	26
Интерьер		
Сотовые панели	10	32
Панели пола	113,7	746
Монолитные детали	–	498
Прочие	–	490

1.1.6. Объемы применения ПМ в зарубежном автомобилестроении (тыс. т)

Регион	1980 г	1985 г	1990 г.	2000 г.
Западная Европа	600	1000	1600	2000
США	600	770	1800	2200
Япония	–	820	970	1200

1.1.7. Типы применяемых ПМ в производстве автомобилей в Северной Америке (тыс. т)

Тип ПМ	Год	
	1995	2000
Крупнотоннажные ПМ	806	973
Полиуретаны	234	287
Полипропилены	183	234
Поливинилхлориды	108	119
Ударопрочные полистиролы	93	107
Конструкционные ПМ типа Норил	143	233
Полиэфиры термопластичные	83	104

Основными элементами автомобилей, изготовляемыми из этих ПМ, являются:

детали двигателя: шестерни газораспределения, маслоотражатель, стержни клапанов, воздухоочиститель, корпус масляного насоса, шкивы, корпусы воздушного и масляного фильтров, крышка клапанов, элементы системы зажигания, штекеры;

топливная система: баки и крышки, карбюратор, топливный насос, топливопроводы, корпус и фильтр очистки топлива, всасывающие патрубки;

детали трансмиссии;

рулевая и тормозная системы: корпус гидроусилителя, рулевая колонка, рулевое колесо, бачок для тормозной жидкости, корпус тормозных цилиндров, ручка переключения коробки передач, педали;

система обогрева и охлаждения: вентилятор двигателя и кожух, бачок радиатора, корпус терморегулятора, шланг вентиляции кабины, корпус водяного насоса, детали компрессора, крыльчатка водяного насоса;

интерьер и экстерьер: решетка радиатора, вентиляционные решетки, приборный щиток, бампер, корпус зеркала, молдинги, крылья, крышки капота и багажника, дверные панели, шумо- и теплоизоляция, блок-фары и светосигнальная арматура, каркасы сидений;

вспомогательные детали: шланги, ленточный привод стеклоподъемника, кронштейн ручки дверей, стеклоочистители, детали ремней безопасности, прокладки, мембраны, вентиляторы, пепельницы, колпаки колес.

По сравнению со стальными прототипами этих элементов на их производство затрачивается в 4 раза меньше энерго- и трудозатрат при плотности на единицу прочности в 7 – 8 раз меньше. Снижение массы автомобиля только на 1 кг приводит к экономии горючего до 1 л при пробеге 150 тыс. км. Малая плотность деталей из ПМ влияет и на снижение вредных выбросов в атмосферу.

Попытки изготовлять из полимерных материалов не только малонагруженные детали, но и несущие конструкции автомобиля потребовали применения таких ПКМ, как стекло-, угле-, органопластики, и гибридных МПКМ. В настоящее время их доля доходит в отдельных случаях до 12 % массы автомобиля. Комплексные исследования проведены, например, фирмами ФИАТ, Дженерал моторс, Форд, Фольксваген и др. Делаются попытки (и в ряде случаев достаточно успешные) создания из стеклопластиков на термопластичной основе цельноформованных бамперов и кузовов. При этом их масса снижается на 20…45 %, жесткость увеличивается на 12 %, срок службы – на 45 %, а трудоемкость производства уменьшается в 2 – 3 раза.

Применение ПКМ в судостроении. Стимулами для применения ПКМ в судостроении являются, главным образом, стремление снизить массу и решить острую проблему коррозии. Полимерные связующие ПКМ, наиболее широко применяемые в судостроении, – это ненасыщенные полимеры алкилстирольного типа, выбор которых к тому же обусловлен низкой стоимостью, вязкоупругими характеристиками и технологичностью. Кроме того, применяются галогенсодержащие полимеры с повышенной огнестойкостью и эпоксидные смолы низкотемпературного отверждения для силовых конструкций.

В качестве непрерывных наполнителей ПКМ в основном используются армирующие элементы (нити, ровница, ленты, ткани и маты) из стекловолокон боросиликатного типа, а также углеродные и арамидные органические волокна, позволяющие в наибольшей мере снижать массу корабельных конструкций. Армирующие волокна подвергают специальной обработке в зависимости от его природы и типа полимерного связующего, чтобы обеспечить надежное межфазное взаимодействие, низкопористую пропитку и снизить влияние влажности на связь волокно–полимер (табл. 1.1.8).

Выбор технологических способов для формования конструкций обусловлен, прежде всего, размерами судовых элементов. Так, крупные конструкции типа судовых корпусов обычно изготовляют "мокрой" ручной выкладкой или методом напыления с последующим отверждением ПКМ при комнатной температуре. Жизнеспособность связующих при этом может колебаться от 15 мин до 2 ч. Более мелкие узлы формуют вакуумным способом в эластичных оболочках, что обеспечивает более высокое качество и позволяет увеличивать объем армирования ПКМ. Однако в тех случаях, когда позволяют размеры конструкции и это экономически допустимо, отверждение ПКМ может осуществляться при повышенных температурах в автоклаве, а предварительное формирование заготовки – механизированным путем, например, намоткой.

1.1.8. Требуемые характеристики ПКМ для судостроения

Показатели	Условия испытаний	Виды стеклопластиков**					
		СП-1	СП-2	СП-3	СП-4	СП-5	СП-ТР
$\sigma_и \parallel$ min, МПа	Стандартные	345	255	214	159	124	221
	Мокрые*	310	228	186	138	103	200
$E_и \perp$ min, ГПа	Стандартные	17	14	10	7,6	5,9	11,4
	Мокрые	16	12	8,6	6,8	5,3	10
$\sigma_в \parallel$ min, МПа	Стандартные	255	193	138	97	62	110
	Мокрые	228	172	145	117	110	124
$\sigma_{сж} \parallel$ min, МПа	Мокрые	193	159	131	103	97	117
$V_{пор}$ max, %	–	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	4,0
Объемная доля связующего, %	–	35...43	42...52	49...59	55...65	65...75	45...56

* После двухчасового кипячения в воде.

** СП-1 на основе стеклоткани марки 181, СП-2 – стеклоткани 1000; СП-3 – стеклоткани 1044; СП-4 – стекломатов; СП-5 – стекломатов с высоким содержанием связующего; СП-ТР – тканого препрега.

Основными элементами оснастки для изготовления крупных судовых элементов служат формы ("модели"), выполняемые обычно из древесины, покрываемой слоями стеклотекстолита, что увеличивает долговечность форм до нескольких сотен циклов формования.

Наиболее часто применяются открытые или полостные формы. Для большинства деталей, например, корпусов судов, форму продольно разрезают для облегчения изъятия готового изделия. Выпуклые формы применяются реже и только для таких конструктивных элементов, внутренние поверхности которых должны быть гладкими, например, для стенок кают и трюмов лайнеров. Этот вариант более трудоемок и неэкономичен из-за необходимости обработки внешней поверхности.

Развитие судостроительной промышленности мира до 2000 г. стимулировалось ростом морских перевозок, поэтому, если темпы роста до 1995 г. были в среднем 2 % ежегодно, то в последние 5 лет XX века они составили 2,6 %. В 2001 г. водоизмещение всех судов мирового торгового флота составляло 703,3 млн. т, а общее число судов – 68582. При этом основным направлением развития судостроения является строительство крупнотоннажных танкеров для транспортировки нефти, рассчитанных на требования XXI века. Эти суда учитывают и экологические требования (двойной корпус), что предопределяет расширенное применение новейших ПКМ и современных технологических процессов.

Заключение. Повышение роли ПКМ и ПМ в разработке новой техники и реализацию технологических концепций, создаваемых в научных центрах, легко проследить и в других отраслях машиностроения – ракетно-космическом, железнодорожном, сельхозмашиностроении и др. Происходит не только распространение передового опыта, но и поиск новых технических и технологических решений. В частности, наметилась и набирает силу тенденция по замене некоторых видов отверждающихся ПКМ термопластичными КМ, новыми гибридными ПКМ, а в экстремально нагруженных конструкциях – углерод-углеродными КМ (УКМ).

Термопластичные ПКМ существенно повышают стойкость к ударным нагрузкам (на 40 %), снижают массу деталей, обеспечивают ремонтопригодность (возможность сварки), пожаробезопасность, повышают производительность производства и экологическую чистоту. Отличительной чертой, например, углетермопластов на основе полисульфона и полиэфиркетона является исключительно высокая стойкость к воздействиям радиационно-косми-

ческих факторов, а также влажной среды и перепадов температур от +150 до –270 °С, поэтому они пригодны к длительной эксплуатации в среде сжиженных газов, таких, как кислород и водород.

Наиболее перспективно создание жидкокристаллических термопластов (ЖК-Т). Они перерабатываются в виде расплавов, что дает возможность получать объемные изделия с прочностью 200...300 МПа (экструдата до 500 МПа). По удельной прочности ЖК-Т могут конкурировать с лучшими алюминиевыми сплавами, превосходя их по технологичности, трудоемкости и некоторым другим показателям. Кроме того, ЖК-Т могут использоваться и как компоненты традиционных КМ (связующее, ткань или то и другое), а также как основа для получения нового вида самоармирующихся пластмасс. В последнем случае достигается армирование на молекулярном уровне вследствие присущей ЖК-Т способности к ориентации при переработке. Разработка ЖК-Т и технологии производства из него машиностроительных элементов позволит повысить их прочность до 1800...2200 МПа, обеспечить диапазон рабочих температур от –253 до +300 °С, увеличить ударопрочность на 40 % и снизить массу изделий на 25...30 %.

Таким образом, средства, вложенные в создание и освоение новых видов ПКМ и технологических процессов, не только быстро окупаются, но и служат мощным двигателем прогресса современного машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Армированные** пластики / Под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. М.: Изд. МАИ, 1997. 404 с.

2. **Буланов И.М., Воробей В.В.** Технология ракетных и аэрокосмических конструкций их композиционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

3. **Головкин Г.С.** Конструирование композиционных пластиков // Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / Под ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. 304 с.

4. **Композиционные** материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

5. **Композиционные** материалы: Пер. с англ. В 8-ми т. / Под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М.: Машиностроение, 1978. Т. 3. Применение КМ в технике / Под ред. Б. Нотона, 1978. 511 с.

6. **Крысин В.Н., Крысин М.В.** Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

7. **Михайлин Ю.А.** Применение ПМ в автомобилестроении // Полимерные материалы. 2000. № 3 (10). С. 1, 6, 7; 2000. № 4. С. 1, 6, 7.

8. **Основы** проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов: Учеб. пособие / В.В. Васильев и др. М.: МАИ, 1985. 218 с.

9. **Основы** технологии переработки пластмасс / С.В. Власов и др. М.: Химия, 1995. 528 с.

10. **Плеханов А.А.** Метод автоматизированный выкладки оболочек из ПКМ // Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических средств: Тез. докл. ВНТК. Николаев: НКИ, 1994. С. 199 – 201.

11. **Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н.** Основы создания композиционных материалов: Учеб. пособие. М.: МИТХТ, 1986. 86 с.

12. **Современные** композиционные материалы: Пер. с англ. / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. М.: Мир, 1970. 672 с.

13. **Справочник** по технологии изделий из пластмасс / Г.В. Сагалаев и др. М.: Химия, 2000. 424 с.

14. **Справочник** по композиционным материалам: Пер. с англ. Кн. 2 / Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. 584 с.

15. **Тадмор З., Гогос К.** Теоретические основы переработки полимеров / Пер. с англ. М.: Химия, 1984. 632 с.

16. **Технология** производства летательных аппаратов из композиционных материалов: Учеб. пособие / В.Е. Гайдачук и др. Х.: ХАИ, 1989. 323 с.

17. **Хайлиулин В.И.** Технологические схемы изготовления многослойных конструкций. Казань: КГТУ, 1999. 168 с.

18. **Шалин Р.Е.** Материалы авиакосмической техники // Авиационные материалы на рубеже XX – XXI веков. М.: ВИАМ, 1994. С. 49 – 63.

19. **Экономико-статистические** данные по сварочному производству (СВЭСТА-94) // Сб. обзорно-аналит. инф. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1994. 200 с.

20. **Composite** Manufacturing Technology // Ed. by A.G. Bratukhin, V.S. Bogolyubov, Chapman and Hall, 1995. 433 p.

Глава 1.2

ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композиционные материалы (КМ) представляют собой гетерофазные системы, состоящие из двух и более компонентов, один из которых является непрерывной фазой (матрицей), а другой (или другие) может иметь вид частиц различной формы и протяженности. Компоненты КМ обладают четкой границей раздела фаз, а свойства КМ определяются объемным сочетанием компонентов и существенно отличаются от свойств каждого из них.

Полимерным композиционным материалом (ПКМ) называют КМ, в котором в качестве матрицы используются различные полимеры, а второй упрочняющий компонент (наполнитель) может иметь любую природу, в том числе и полимерную. Непрерывная матрица монолитизирует ПКМ, воспринимает внешние нагрузки и перераспределяет их на частицы второй фазы.

Функция матрицы – перераспределять напряжения между соседними частицами наполнителя и останавливать рост трещин, появляющихся при разрушении волокон. Последнее достигается благодаря пластическим (или вынужденно-эластическим) деформациям матрицы или местному отслоению волокон от матрицы. Оба эти процесса приводят к поглощению (диссипации) энергии, выделяемой при разрушении волокон и характеризуются при растяжении параметром G_{Ic}.

Достаточный уровень трещиностойкости при обычных условиях нагружения обеспечивается при значениях G_{Ic} = 250...350 Дж/м^2, а для сильнонагруженных конструкций $G_{Ic} \geq 1000$ Дж/м^2.

Эластификация полимерных матриц без снижения их прочности и модуля упругости является сложной и весьма актуальной задачей. Трещиностойкость промышленных ПКМ в связи с отсутствием таких матриц еще недостаточна. У углеволокнитов G_{Ic} = 210 Дж/м^2, у стекловолокнитов G_{Ic} = 810 Дж/м^2, у органоволокнитов G_{Ic} = 430...1130 Дж/м^2.

Матрица защищает наполнитель от вредного воздействия окружающей среды и в первую очередь – от влаги. При водопоглощении 5...8 % (по массе) прочность и модуль упругости снижаются на 15...20 %, а теплостойкость (температура стеклования T_c) – на 50...100 °С.

При выборе матрицы следует уделять внимание соотношению ее термоупругих свойств и наполнителей, что определяет вязкость разрушения, трещиностойкость и монолитность ПКМ.

Роль матрицы особенно велика при создании функциональных ПКМ, обладающих повышенными требованиями к таким свойствам, как радиопрозрачность, химическая стойкость, термостойкость и т.д.

Межфазный слой, сформированный на поверхности наполнителя, представляет собой часть объема матрицы, свойства в котором под влиянием физического и химического взаимодействия с поверхностью наполнителя существенно изменились. Межфазный слой оказывает значительное влияние на когезионное и адгезионное разрушение ПКМ в объеме и на границе раздела, на характер и значения напряжений, возникающих в матрице, а также на стойкость ПКМ к воздействию эксплуатационных факторов (температуры, влажности, химической стойкости и т.д.).

Формирование межфазного слоя происходит при контакте связующего с наполнителем, и решающая роль при этом принадлежит смачивающей способности связующего, которая определяется соотношением поверхностных энергий компонентов. Количественная оценка свойств межфазного слоя затруднена и обычно проводится по косвенным показателям. С учетом влияния межфазного слоя в формировании комплекса свойств ПКМ разработаны многочисленные приемы, способствующие его формированию:

обработка поверхности наполнителя различными химическими реактивами;

травление плазмой;

нанесение тонких поверхностных слоев, способствующих химическому взаимодействию матрицы с наполнителем (аппретирование);

введение в связующее веществ, улучшающих смачивание им поверхности наполнителя.

Для совершенствования ПКМ необходимы матрицы с разрушающим напряжением до 250 МПа, деформационной теплостойкостью 200...300 °С, низким водопоглощением (≤1 %).

Теоретическая прочность матриц может быть рассчитана по уравнению

$$\sigma = \left(\frac{2\gamma_F E}{\pi a_0}\right)^{0,5} = y\left(\frac{G_{Ic} E}{a_0}\right)^{0,5},$$

где γ_F – удельная поверхностная энергия, удельная энергия роста трещит; для полимеров $\gamma_F = 10^2 \ldots 10^3$ Дж/м^2; E – модуль Юнга, МПа; a_0 – длина дефекта, трещины, межатомное расстояние; y – геометрические параметры испытуемого образца; $G_{Ic} = 2\gamma_F$ – энергетический параметр трещинодвижущих сил, скорость (интенсивность) высвобождения упругой энергии при увеличении дефекта, Дж/м^2; индекс "Ic" – условия роста трещины с ее раскрытием при растяжении.

Теоретическая прочность пропорциональна $1/a_0$, что предопределяет использование легких элементов для производства материалов с высокими механическими свойствами. Теоретическая прочность связи углерод–углерод составляет 10...25 ГПа для большинства полимеров. Прочность π-связи (в карбо- и гетероциклах) C = C, C ≡ C – 210...250 кДж/моль. Однако практическая прочность полимеров из-за дефектов строения обычно составляет лишь 2,5...3,8 % теоретической.

Механические свойства волокон из материалов различных классов (полимеры, углерод, керамика, стекло, кварц, металлы) ввиду масштабного эффекта повышения качества существенно ближе к теоретическим (табл. 1.2.1). При прогнозировании прочности и модуля упругости (и многих других свойств ПКМ) используют правило аддитивности:

$$\sigma^+ = k_1(k_2\sigma_м V_м + k_2\sigma_н V_н),$$

где σ^+ – разрушающее напряжение при растяжении; k_1 – комплексный коэффициент, характеризующий особенности КМ; k_2 – коэффициент, характеризующий тип деформирования; $\sigma_м$ и $\sigma_н$, $V_м$ и $V_н$ – соответственно разрушающее напряжение при растяжении и объем матрицы и наполнителя.

1.2.1. Теоретические (индекс "т") и практические (индекс "пр") значения модуля упругости E и разрушающего напряжения при растяжении σ объемных материалов и волокон

Материал	$\sigma_т^+$, ГПа	$E_т$, ГПа	$\sigma_{пр}^+$, ГПа	$E_{пр}$, ГПа
1. Полиэтилены	27...35	240...350		
ПЭВП (формованные изделия)			0,02...0,04	0,4...1,0
ПЭВП (волокно)			0,45...0,80	3,0...8,5
Сверхвысокомолекулярный ПЭ ($T_{пл}$ = 147 °С, $T_р$ = 100...120 °С)				
Волокна:				
спектра 900 (диаметром 38 мкм)			2,65	120
спектра 1000 (диаметром 27 мкм)			3,10 (до 4)	175
опытные			3,88...6	200
опытные по гель-технологии			4	250
ПЭ-КВЦ			3...4	50...100
ПЭ-монокристаллы			22	–
2. Полипропилены (ПП)	16	40...50		
Формованные изделия			0,03...0,04	1,1...1,4
Волокно ($T_{пл}$ = 170 °С)			0,3...0,7	3,3...10
Волокно по гель-технологии			3,42	21...26 (до 36)

Продолжение табл. 1.2.1

Материал	$\sigma_т^+$, ГПа	$E_т$, ГПа	$\sigma_{пр}^+$, ГПа	$E_{пр}$, ГПа
3. Полиамиды алифатические	27	230		
Формованные изделия (ПА-6, ПА-66, ПА-12, ПА-610)			0,07...0,08	1,0...2,6
Волокна (капрон, нейлон)			0,5...0,95	2...4,5
4. Полиамиды ароматические (волокна)	30	350		
СВМ			3,8...4,2	120...130
Терлон			3,6...3,8	85...120
Армос			4,5...5,0	145...170
ВМН-88			3,7...4,5	157...167
Кевлар-49 (К-49, Т969, Т981)			2,8...4,0	125...140
Кевлар PRD-149 (ρ = 1,39 г/см^3, ε = 4,4 %, КИ = 25)			2,4...4,2	160...180
TECHNORA HM-50 (ТФК, п-ФДА и 3,4-ДАДФЭ, 2 : 3 или 1 : 1)			3,1	71
ТВАРОН, АРЕНКА 900, 930 (фирма "Енка", Нидерл, ρ = 1,44 г/см^3)			2,5...3,0 (до 3,6)	70...130 (до 150)
5. Поли-п-фениленбензтиазол (волокно ПФБТ, ρ = 1,58 г/см^3, ε = 0,9 %)			2,5...3,0 (до 3,6)	300...330
6. Углеродные материалы				
Алмаз	200	1220		
Графитовые кристаллы (идеальная плотность 2,27 г/см^3)	140	1061		
Стеклоуглерод	300		0,1...0,24	32
Промышленные волокна: УКН-5000П	25...70	1060	3,5	220...250
Кулон (нить)			3,0...4,0	350...450
ВЭН-280			2,5...2,8	600...700
ЭЛУР-П			2,0...2,5	180...200
7. Стекло	10...14	140		
Промышленные волокна			2,4...5,0	51...116 (до 140)
8. Кварц	25	160		
Волокна 99,9 % SiO_2			2...3 (до 6)	74
9. Металлы (изотропные)			0,1...2,2	40...300
Вольфрам, проволока 10...250 мкм, волочение / 50 мкм			4,02 / 3,3	402 / 410
Стальное волокно, корд. 50...100 мкм, волочение / сталь ВНС-9, 100...300 мкм			4,02/3,5...3,8	176 / 200
Титан, 100...250 мкм, волочение			0,55...1,67	120...137

При таком подходе свойства ПКМ (прежде всего прочностные) определяются свойствами наполнителя, тем более, что его объем в зависимости от плотности упаковки частиц наполнителя может составлять для волокон одного диаметра от 0,52 (хаотически ориентированная упаковка) до 0,907 (гексагональная упаковка).

Применяемые в настоящее время связующие для ПКМ можно классифицировать следующим образом:

по молекулярной массе (ММ) – мономеры, олигомеры, полимеры (ММ свыше 10^4);

по характеру химических превращений в процессе формования – термопластичные (без изменений химического строения), термореактивные (претерпевающие химическое сшивание молекул) и их смеси;

по механизму реакций, приводящих к формированию пространственной структуры:

полимеризационные (ненасыщенные олигоэфирмалеинаты, олигоэфиракрилаты и т.д.);

поликонденсационные (фенолоформальдегидные, кремнийорганические, карбамидные и др.);

по реакции полиприсоединения (олигоэпоксидные, олигоуретановые и т.д.);

по реакции циклотримеризации (полибензоксазолы, полибензтиазолы и др.);

по форме использования:

жидкофазные растворы (в том числе смесей, олигомеры, расплавы (в том числе смесей), дисперсии (суспензии, эмульсии, латексы);

твердофазные порошки, волокна, пленки.

1.2.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ СВЯЗУЮЩИХ

При использовании в качестве связующих термопластичных полимеров для регулирования скорости и качества пропитки связующим наполнителя в его состав может входить значительное число компонентов – растворители, разбавители (в том числе активные), пластификаторы, поверхностно-активные вещества (смачиватели), аппреты, стабилизаторы (для защиты от термической и термоокислительной деструкции) и др. Учитывая, как правило, невысокое содержание связующего в ПКМ, важнейшей задачей при приготовлении связующего является равномерное распределение всех компонентов в объеме связующего.

Использование в качестве связующего термореактивных олигомеров и смол предполагает включение в их состав веществ, которые позволяют регулировать технологические свойства на стадии как пропитки (в первую очередь реологические), так и отверждения (скорость и глубина отверждения, степень конверсии реакционноспособных групп, экзотермический эффект). К их числу относятся разбавители, загустители, инициаторы, ускорители полимеризации, катализаторы поликонденсации и другие вещества в соответствии с особенностями конкретного вида связующего. Поэтому процессы приготовления этих связующих достаточно сложны, многостадийны и требуют особого внимания для получения высоких характеристик ПКМ.

Для приготовления связующих в виде растворов (пропитка, намотка) используют аппараты с мешалкой, снабженные рубашкой или змеевиком для подогрева. Готовые растворы фильтруют для удаления примесей, нерастворившихся частей полимера и вакуумируют для удаления пузырьков растворенного или окклюдированного воздуха. При использовании растворов достижение низкой пористости и высоких показателей затруднено невозможностью полного удаления растворителя при сушке препрега.

Использование связующих в форме расплава предполагает применение либо котла-плавителя, либо экструдера, обеспечивающего равномерную подачу расплава (при необходимости – под давлением). Если в качестве связующего используется смесь термопластов или смесь термопластичного полимера с жидкокристаллическим полимером, то предварительное смешение целесообразно проводить в смесителе тяжелого типа (например, типа Бенбери).

Использование смеси термопластов, как правило, сопровождается снижением вязкости, особенно при использовании жидкокристаллических полимеров или олигомеров. В этом случае приготовление смеси может быть совмещено с нанесением связующего на наполнитель.

Дисперсии, как правило, поставляются в готовой форме и не нуждаются в предварительной специальной подготовке, за исключением регулирования вязкости.

Использование термопластичных связующих в форме пленок и волокон для применения в процессах намотки предполагает предварительную реализацию в них необходимой степени ориентации для предотвращения чрезмерной усадки в процессе последующей монолитизации.

В порошкообразной форме используются как термопластичные связующие, так и термореактивные: как при смешении с наполнителем, так и при нанесении на поверхность наполнителя в электростатическом поле. При этом для получения высокого качества пропитки порошки должны иметь узкое распределение по размерам частиц. Полимер в форме порошка может быть получен на стадии синтеза (при суспензионной полимеризации), сушкой конденсационных растворов в псевдоожиженном слое и твердофазным измельчением с последующей классификацией на фракции.

Приготовление связующих на основе реакционноспособных олигомеров является наиболее сложным. В состав таких связующих входят химически активные продукты (инициаторы, ускорители, катализаторы, ингибиторы), обеспечивающие протекание процесса отверждения и позволяющие регулировать его скорость и полноту протекания. Возможность преждевременного взаимодействия некоторых из компонентов обусловливает необходимость предварительного приготовления двух (или более) рабочих смесей, обладающих достаточной стабильностью. Окончательное приготовление связующего в этом случае осуществляется непосредственно перед его использованием для пропитки наполнителя тем или иным способом.

При использовании ненасыщенных олигоэфиров одна из смесей включает олигоэфир (как правило, уже содержащий мономер – стирол или метилметакрилат), тиксотропный наполнитель (загуститель), инициатор полимеризации (перекись бензоила, гипериз). Другая смесь содержит олигоэфир, тиксотропный наполнитель, ускоритель полимеризации (нафтенат кобальта) и другие модифицирующие добавки (например, тиокол).

Концентрации инициатора и ускорителя подбирают таким образом, чтобы после смешения равных объемов смесей в связующем было достигнуто необходимое соотношение всех компонентов. Такой порядок приготовления связующего объясняется тем, что после смешения химическая реакция начинается при комнатной температуре практически сразу, что ограничивает жизнеспособность связующего (время до потери текучести) и возможность его использования. Кроме того, процесс отверждения сопровождается значительным выделением теплоты, что ограничивает объем единовременно приготовляемого связующего: приготовление слишком большого количества при медленном расходовании чревато саморазогревом, потерей технологических свойств и опасностью самовозгорания.

Аналогичные предосторожности требуются при приготовлении связующих на основе фенолоформальдегидных, эпоксидных, кремнийорганических и других олигомеров, отверждение которых требует использования отвердителей. Тщательное смешение компонентов должно осуществляться непосредственно перед использованием связующего для приготовления полуфабриката или изделия из ПКМ.

Использование в качестве связующего термопластичных и термореактивных полимеров, получившее распространение в последние годы, сочетает процесс синтеза полимера с его наполнением. В этом случае часто полимер в поверхностном слое химически связан с поверхностью наполнителя, что способствует повышению прочностных характеристик таких материалов.

1.2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Изготовление ПКМ начинается со связующих, при этом решающими являются их вязкостные характеристики. Условия последующих операций и формования определяются физическим состоянием и химическим составом связующих и композиций на стадиях перевода связующего в твердое состояние (кристаллизация, стеклование, отверждение, вулканизация).

Реологические свойства связующих оказывают существенное влияние на выбор параметров формования и на организацию технологического процесса получения изделий (табл. 1.2.2). Гарантией хорошего смачивания наполнителя связующим является условие $\gamma_F >> \sigma_{пов}$, т.е. соотношения поверхностных энергий наполнителя и связующего. Разнообразные взаимные влияния наполнителей и связующих, которые начинаются уже в процессе смачивания, приводят к существенным изменениям кинетики процесса отверждения термореактивных связующих и условий кристаллизации термопластичных, структуры и свойств матрицы, наполнителя и ПКМ в целом. Прочность ПКМ в значительной степени определяется технологическими свойствами связующего, его смачивающей и адсорбционной способностью по отношению к наполнителю.

1.2.2. Оптимальные значения динамической вязкости связующих и уровень оптимальных давлений, прикладываемых в области гелеобразования термореактивных связующих для различных технологических приемов

Технологический прием	Динамическая вязкость связующего, Па · с	Давление, МПа
1. Пропитка	0,05...0,07	Контактное
2. Пропитка под давлением	До 0,5	До 0,1
3. Центробежное литье (RTM) (формование)	0,1...0,3	Низкое
4. Пултрузия	0,4...0,8	0,2...5,0
5. Роллтрузия	0,5...1,0	До 30
6. Намотка жидкофазная (использование расплава)	0,1...1,0	0,05...1,0
7. Намотка твердофазная (использование расплава)	0,8...2,0	1,0...3,0
8. Вакуумное формование	2,0...5,0	1,0
9. Термокомпрессионное формование	0,5...1,0	1...1000
10. Автоклавное формование	3,0...5,0	1,0...5,0
11. Прессование	8,0...9,0 (до 10^2)	0,5...100
12. Спекание без давления	10^7...10^9	–

Качество пропитки наполнителя определяется также вязкостными характеристиками связующих на стадии совмещения (пропитки) компонентов ПКМ (табл. 1.2.3, 1.2.4).

Уровень применяемых давлений на стадии изготовления полуфабрикатов (препрегов) и на стадии формования определяется используемым методом формования, вязкостью связующего, природой и текстурой используемого наполнителя.

Регулирование вязкости достигается:

применением загустителей (для полиэфирных, эпоксидных), разбавителей (для эпоксидных);

неполным удалением растворителей;

применением эластификаторов и пластификаторов (снижение вязкости расплава);

применением смесей олигомеров различной молекулярной массы, предварительного отверждения (для фенолоформальдегидных), смесей жидкокристаллических полимеров (при оптимуме мезофазы динамическая вязкость жесткоцепных термопластов снижается при температуре плавления 200...400 °С с 10^4...10^6 Па · с до 10^2...10^3 Па · с).

Слишком низкая вязкость на стадии формования приводит к значительному вытеканию связующего из полуфабриката (препрега) даже без давления, а повышенный уровень вязкости расплава затрудняет процесс уплотнения. Для уплотнения термопластичных связующих монолитизации структуры ПКМ обычная вязкость расплавов 10^2...10^4 Па · с приемлема. Исключение составляют теплостойкие и наиболее перспективные полиарилены с динамической вязкостью свыше 10^5 Па · с. Однако с точки зрения пропитки наполнителей практически все термопласты имеют слишком высокую вязкость, что затрудняет получение качественных изделий.

Регулирование вязкости расплава термореактивных связующих осуществляется с учетом химизма и кинетики реакции отверждения.

Уплотнение полуфабрикатов на основе олигоэфирных связующих, отверждающихся по механизму радикально-цепной полимеризации, проводят при температуре разложения инициатора (перекисей и др.), что обычно соответствует температуре отверждения, вязкость регулируется использованием загустителей. При переработке олигоэпоксидных связующих (ступенчатый процесс полиприсоединения) процесс ведут ступенчато при $T < T_{отв}$, так как при $T_{отв}$ вязкость высока, текучесть мала, что требует повышения давления. Температура уплотнения (~ 20...200 °С) определяется вязкостью расплава связующего, которая сильно зависит от состава, типа олигомеров, их молекулярной массы, вида отвердителя, разбавителя, загустителя.

1.2.3. Значения динамической вязкости, Па · с, термореактивных связующих на стадиях пропитки и формования

Связующие	При температуре 20 °С (пропитка)*	При температуре отверждения (формование)
Олигоэфирные	1 (25 % стирола) 0,5...2,5 (28...45 % стирола)	1...2
Олигоэпоксидные	$0,1...1,5 \cdot 10^3$	1...10
Растворы фенолоальдегидных олигомеров	0,04...10	$10^3...10^5$
Растворы имидных олигомеров	0,5...2,5 (растворы БМИ, АПИ, PMR)	1,5...10^3 (100...150 °С) БМИ $10^3...10^4$ (100...150 °С) $10^3...10^5$ (220...270 °С) АПИ, PMR $10^5...10^6$ (300...320 °С)

* Оптимальные значения для пропитки 0,1...1,0 Па · с (15.. 85 с по ВЗ-4). Вязкость термопластов 10^2 .10^9 Па · с.

1.2.4. Значения динамической вязкости термопластичных связующих на стадии формования (в скобках – скорость сдвига, $с^{-1}$)

Термопласт	*Т*, °С	Динамическая вязкость расплава, Па · с	Термопласт	*Т*, °С	Динамическая вязкость расплава, Па · с
ПЭВП 21008-075	220 250	10^3 (10) $9 \cdot 10^2$ (10) $(3...4) \cdot 10^2$ (10^2)	Арилокс	315 330	10^3 (10^2) 10^2 (10^2)
ПП 0,5П	200 250	10^3 (10^2) $6 \cdot 10^2$ (10^2)	ПЭЭК	390	10^2 (1...10)
Полистирол ПСМД	220	$8 \cdot 10^2$ (10^2)	ПА-6	250 270	10^2 (10^2) $6 \cdot 10$ (10^2)
ПММА (литьевой ЛПТ)	190 250	$5 \cdot 10^3$ (10^2) $4 \cdot 10^2$ (10^2)	ПА-12	260	$4 \cdot 10^2$ (10^2)
Фторопласт-4	350	10^{10}	ПА-66	250	10^2 (10^2)
ПВХ	200	$6 \cdot 10^3$ (10^2)	Фенилон	320 430	10^6 (1) 10^3 (1)
ПФА СФД-А	170 200	10^5 (10^2) $8 \cdot 10^2$ (10^2)	ПИ ПМ-67	400... 450	$10^8...10^9$ ($10^{-2}...10^{-3}$)
ПК дифлон	220	$10^3...10^5$ (10^2)	ПФС райтон	315 345	10^3 (10) 10^2 (1)
ПЭТФ	270	10^2 (1...10)	Полисульфон ПСН, удел	300 350	$9 \cdot 10^2$ (10^2) $3 \cdot 10^2$ (10^2)
ПБТФ	230 270	10^3 (10^2) 10^2 (10^2)			

Для ПКМ на основе фенолоальдегидных связующих ФФС (поликонденсация с выделением большого количества летучих) процесс уплотнения обычно проводят при $T = T_{отв}$. Вязкость расплава связующего регулируется степенью предотверждения. Без предотверждения, которое начинается уже при температуре удаления растворителей, вязкость настолько мала, что происходит вытекание связующего (нарушение соотношения матрица–наполнитель, смещение армирующих наполнителей).

Для ПКМ на основе имидных связующих (практически освоена два класса: бисмалеимидные БМИ типа ПАИС, МФ, ТП, более 30 составов зарубежных фирм, и связующие на основе смесей мономеров АПИ-2,3, PMR-15, LARC-160, Авимид) процесс организуется в зависимости от типа связующего. Для БМИ-связующих, аналогично ФФС, уплотнение и отверждение проводят при $T = T_{отв}$, так как БМИ-связующие содержат отвердители, которые выступают и как удлинители цепи между узлами сетки. Такие составы имеют высокие значения вязкости (см. табл. 1.2.3), точки гелеобразования их находятся близко к температуре перехода в вязкотекучее состояние, процесс идет без выделения летучих (кроме некоторых ТП). Для осуществления течения расплава олигоимида жесткоцепной структуры без нарушения его сплошности необходимы скорости сдвига порядка $10^{-1}...10^{-2}$ $с^{-1}$ и напряжения сдвига $10^2...10^4$ Па.

Для связующих АПИ, PMR-15 процесс уплотнения и отверждения разделяют. Вязкость имидизированных олигоимидов АПИ, PMR-15 (ММ-1500) выше 10^6 Па · с. Устойчивое течение расплава наблюдается при высоких напряжениях сдвига (выше 10^2 МПа) и скоростях сдвига меньше 10^{-3} $с^{-1}$. Уплотнение проводят при $T << T_{отв}$ (реология расплавов близка к показателям для ФФС и БМИ) и 0,5...0,7 МПа.

Эластичные пленки фторсодержащих поликонденсационных имидных связующих Авимид, NR-150, PMR-T, АПИ-Ф не препятствуют выходу летучих при отверждении и позволяют получить наиболее термоустойчивые ($T_с$ = 370...400 °С) матрицы для высоконаполненных низкопористых (объем пор 1 %) ПКМ многофункционального назначения.

1.2.3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ

Природа дефектов в полимерных матрицах различная и во многом определяется составом и технологией изготовления связующих, а в случае термореактивных матриц – условиями формирования матрицы с пространственной структурой при отверждении. При традиционном использовании смесей олигомеров в сочетании с компонентами, оптимизирующими технологические и эксплуатационные свойства, полимерные сетки весьма дефектны, могут иметь микрогелевую структуру (особенно кремнийорганические) с высоким уровнем остаточных напряжений, низкими показателями прочности и модуля упругости (табл. 1.2.5).

Использование химически индивидуальных олигомеров позволяет повысить прочность матриц до 500 МПа, что необходимо для ПКМ с высокопрочными и высокомодульными волокнами для деформационной совместимости их компонентов, но пока это с трудом согласуется с технологическими и экономическими требованиями. Из-за полидисперсности и дефектности структуры прочность промышленных термопластов со степенью кристалличности до 30 % не превышает 150 МПа, что в 200 раз ниже прочности связи С–С. Кристаллизация, переход к полиариленам и полигетероариленам позволяет существенно повысить упругопрочностные свойства ПКМ, но переработка термопластов с вязкостью $10^4...10^8$ Па · с при 300...380 °С затруднительна.

1.2.4. ДЕФОРМАЦИОННАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ КОМПОНЕНТОВ ПКМ

Наряду с физико-химической совместимостью компонентов (смачивание, адгезия, теплофизические свойства и др.) в ПКМ не менее важное значение имеет их деформационная совместимость. Даже при простейшем виде деформирования – растяжении однонаправленных ПКМ вдоль волокон – в объеме материала возникает сложнонапряженное состояние. Наличие прочной связи между компонентами ПКМ обусловливает появление в матрице и на границе раздела радиальных, тангенциальных и осевых напряжений. Понятие монолитности ПКМ предполагает сплошность компонентов, отсутствие нарушения связи на границе раздела при деформировании ПКМ до тех пор, пока не разрушатся волокна.

Свойства	Тип матрицы									
	ЭДТ-10	ЭДТ-69Н	ЭТФ	ЭП	5-211-Б	УП-2130	ЭНФБ	ЭХД	УП-2227	ВС-2526
ρ, г/см^3	1,23...1,3	1,21	1,23	1,22	1,22...1,38	1,23	1,2...1,35	1,24	1,25	–
σ^+, МПа	75	–	62	40	80	100...120	61	70	–	88...94
σ^-, МПа	76...160	82	136	126	75...150	350	78...165	200	80	–
$\sigma_{ви}$, МПа	116	–	67	93	95	170...180	–	90	–	180...185
$\sigma_т$, МПа	50	–	45	38	55	–	–	–	–	–
μ	0,4	–	0,35	0,36	0,35	–	–	–	–	–
$\tau_{сд}$, МПа	51	–	34	26	–	120	70	–	–	–
E^+, ГПа	2,6...3,6	–	3,15	3,9	3,3...3,58	40	3,6...3,7	–	3,8	3,7...4,0
G, МПа	950	4,0	1200	1350	1250	–	–	–	–	–
ε^+, %	2,8...3,8	2,9	2,0	1,7	2,1...0,35	3,0	2,0...2,6	3,5	2,7	1,5...3,0
$a_к$, Дж/м^2	160	–	70	50	120	–	–	120	–	180...250
ВП за 30 ч и влажности 65 %, %	1,8	1,2	–	–	1,3	–	1,5	–	1,7	2,5...4,0
$\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	65	–	72	69	72	–	–	–	–	63

Примечание. ЭДТ-10 при 170 °С, 5 ч; ЭДТ-69Н при 125 °С, 3 ч.

Принятые обозначения: σ^+ – разрушающее напряжение при растяжении; σ^- – разрушающее напряжение при сжатии; $\sigma_{ви}$ – разрушающее напряжение при изгибе; $\sigma_т$ – предел текучести; μ – коэффициент Пуассона; $\tau_{сд}$ – разрушающее напряжение при сдвиге; E^+ – модуль упругости при растяжении, G – модуль сдвига; ε^+ – относительное удлинение при растяжении; $a_к$ – ударная вязкость по Шарпи без надреза; ВП – водопоглощение; α – температурный коэффициент линейного расширения.

1.2.6. Рассчитанные показатели свойств матриц, обеспечивающие монолитность однонаправленных волокнитов

Компоненты	σ^+, МПа	E^+, МПа	ε^+, %	τ, $\tau_{сц}$, МПа
Волокна	2350 / 4200	75 000 / 95 000	3 / 3,5	–
Матрица	140 / 250*	4500 / 5700	4,5 / 5,25	94 / 168*

* Труднодостижимый показатель

Примечание. В числителе приведены свойства волокон и матриц типа 1, в знаменателе – типа 2.

Для ПКМ необходимы матрицы и наполнители с конкретно задаваемым соотношением упругопрочностных свойств. Независимо от вида нагружения условия сплошности описываются системой числовых неравенств между механическими характеристиками волокон и матриц, прочностью их сцепления при сдвиге и отрыве, обеспечивающих их совместную работу в ПКМ с учетом объемов наполнителя и матрицы.

Требования к свойствам матриц из условий монолитности ПКМ (табл. 1.2.6) превосходят уровень свойств промышленных термореактивных матриц (см. табл. 1.2.5).

Свойства термопластичных матриц ближе к рассчитанным показателям идеального матричного материала, однако реализовать их в ПКМ сложно, поскольку по технологическим причинам не обеспечивается требуемая прочность сцепления $\tau_{сц}$ и необходимая прочность, особенно на границе контакта термопластичная матрица–наполнитель.

1.2.5. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ НА ПРОЧНОСТЬ ПКМ

Практически все параметры деформирования ПКМ зависят от параметров не только наполнителя, но и матрицы, а также прочности ее сцепления с наполнителем:

$$l_{кр} \sim 1 / G_м \sim \tau_{сц},$$

при $l > l_{кр}$ осуществляется эффективное перераспределение напряжений деформирования от матрицы к волокну, волокно не теряет адгезионной связи с матрицей, а деформируется, обеспечивая упрочнение гетерофазной системы ПКМ. Исчерпание прочности волокон позволяет достичь теоретического передела прочности ПКМ при выполнении двух условий: отсутствия продольного растрескивания и низкой концентрации напряжений вблизи дефектов.

Адгезионная прочность связи со стеклянным волокном составляет для полиэфирных матриц 9,8...14,7 МПа, фенолоальдегидных, эпоксифенольных 14,7...24,5 МПа, кремнийорганических 14,6...18,6 МПа. Решающим является соотношение между когезионным и адгезионным взаимодействием, которое наиболее благоприятно в случае эпоксидных и полиимидных матриц, обеспечивающих наиболее высокие деформационные свойства ПКМ. Когезионная прочность из-за высокой напряженности (по разным причинам) фенольных, кремнийорганических и полиэфирных матриц ниже прочности полиэпоксидных и полиимидных матриц.

Напряжения, возникающие в матрицах при их отверждении, естественно, проявляются и в межфазном слое ПКМ, вследствие чего приведенные выше значения адгезионной прочности следует характеризовать как соотношение когезионных и адгезионных взаимодействий. Удельный вклад адгезионной и когезионной прочности матрицы в прочность ПКМ при растяжении превышает удельный вклад деформативности матрицы соответственно в 11,1 и 3,0 раза. В зависимости от соотношения между прочностью матрицы $\sigma_м$, волокон $\sigma_в$ и прочностью их сцепления $\sigma_{сц}$ на границе раздела при каждом виде деформирования возможны три случая разрушения ПКМ:

1) когезионное по матрице ($\sigma_в > \sigma_{сц} > \sigma_м$);

2) когезионное по волокну ($\sigma_м > \sigma_{сц} > \sigma_в$);

3) адгезионно-когезионное по межфазной границе и по матрице ($\sigma_в > \sigma_м \geq \sigma_{сц}$).

Разрушение и рост исходной трещины (дефекта) начинается, если напряжение у вершины трещины достигает предела прочности материала матрицы. Распределение напряжений у вершины трещины существенно зависит от того, является ли матрица упругой или пластичной. В случае термопластичных и термо-

реактивных матриц в вершине трещины наблюдается зона пластической деформации. В зоне пластичности матрица передает волокну сдвиговые напряжения, равные пределу ее текучести при сдвиге.

Оптимальные значения предела текучести матрицы уменьшаются при увеличении модуля упругости волокон. Использование матриц с повышенными прочностными и адгезионными характеристиками приводит к хрупкому разрушению.

Прочность при сжатии σ^- находится в прямой зависимости от прочности сцепления матрицы с волокном. Прочность при сжатии полимерных матриц вследствие специфического строения полимеров выше σ^+ и $\sigma_{ви}$, но сжатие ПКМ описывается спектром механизмов разрушения, в каждом из которых роль матрицы различна. Для противостояния разрушению при сжатии нужны матрицы с высокими значениями модуля сдвига $G_{сд}$ и прочностью $\sigma^+ \geq 200$ МПа.

Прочность ПКМ при межслойном сдвиге, растяжении и сжатии поперек волокон зависит от соотношения жесткости матрицы и волокон, механизма разрушения, прочности сцепления.

Для повышения конструкционных свойств ПКМ необходимо учитывать соотношения упругопрочностных свойств волокон и матриц, особенно при нагружении ПКМ в трансверсальном направлении и при сдвиге.

Увеличение пористости от 1 до 9 % снижает $\sigma_{ви}$ ПКМ в 1,5 – 2 раза. Ползучесть ПКМ уменьшается с увеличением модуля длительной упругости матрицы.

1.2.6. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Повышение модуля упругости армирующих наполнителей (волокон) обусловливает необходимость применения матриц с резко улучшенной деформативностью, ударной вязкостью и трещиностойкостью. Характеристики ударной вязкости $a_к$ матриц и ПКМ качественными параметрами по Изоду (Дж/м) и по Шарпи (Дж/м^2) с надрезом и без надреза образцов следует считать устаревшими (как и теплостойкость матриц и ПКМ по Мартенсу, $T_м$). Для характеристики ударной вязкости и трещиностойкости используют параметры: удельную поверхность разрушения γ_F, коэффициент интенсивности (силовой параметр) K_c и энергетический параметр G_c:

$$\sigma_{кр} = y\sqrt{2E\gamma_F / c},$$

где y – константа, являющаяся функцией формы и размера образца; $c = \pi a$; a – характерный линейный размер опасного дефекта (трещины).

Более удобен для расчетов коэффициент интенсивности

$$K^2 = y\sigma C,$$

где $C = \pi a$, a – длина трещины.

При достижении K критического значения K_c, происходит разрушение:

$$K_c^2 = EG_c; \quad G_c = 2\gamma_F.$$

Трещиностойкость ПКМ симбатно коррелируется с трещиностойкостью матриц. Для практических целей используют показатели трещиностойкости, характеризующие остаточную прочность ПКМ при сжатии после ударной нагрузки с энергией 3,3; 4,5; 6,7; 9,0 кДж/м ($CA1_{3\ 3}$; $CA1_{4\ 5}$; $CA1_{6\ 7}$; CAl_9; – стандарт 72Ю фирмы Боинг, США) и 265 Дж/м^2 (стандарт фирм Боинг и Нортроп).

Повышение трещиностойкости матриц и ПКМ является весьма актуальной задачей. Многие способы повышения пластичности жестких матриц (структурная модификация, пластификация и др.) приводят к снижению прочности и модуля упругости, теплостойкости, влагостойкости и др. Наиболее перспективна модификация матриц, резко повышающая трещиностойкость за счет создания гетерофазных дисперсий эластификацией стеклообразных матриц термопластами и эластомерами, в которых эластичная фаза с оптимальными размерами частиц равномерно распределена по объему стеклообразной фазы, физически и химически взаимодействует с ней. При таком подходе G_{Ic} термореактивных матриц можно повысить до 150...200 Дж/м^2 (ПМ-63 с межгелевым пластификатором поликарбонатом), до 350...400 Дж/м^2 (олигоэфирлатексные дисперсии с карбоцепными каучуками и привитыми термопластами с пониженной усадкой), до 5000...7000 Дж/м^2 (эпоксиуретановые гетерофазные дисперсии с модулем упругости 2,5...3,5 ГПа) без снижения прочности и теплостойкости, с приближением к высшим показателям трещиностойкости термопластов (табл. 1.2.7).

1.2.7. Трещиностойкость полимерных матриц

Матрица	G_{Ic}, Дж/м^2	Матрица	G_{Ic}, Дж/м^2
Термопластичные матрицы		**Бисмалеинимидные матрицы**	
Торлон 4000Т	3900	К 601	140
ПИ 2080	920	С 796 / ТМ123	580
Полисульфон Р1700	1700	Матриид 5292	250
Полиэфирсульфон 3600С	1100	1М-АД94-306	330...370
ПЭИ Ултем	1000...19 000	Дисбимид RTM	500
Авимид N (NR-150)	2400	F-178	104
Авимид К-2	1400...1700	С 796/ТМ 123/ПГ	1000
Авимид К-3	1900		
Полиэпоксидные матрицы		**Полиимидные матрицы**	
ЭД-20 + ГМДА	200...575	PMR-15	230...285
ЭД-20 + ДЭТА	130...250	Скайбонд	410
ЭД-20 + этилендиамин	280...600	Теримид 600	210
ЭД-20 + МФДА	120...240	Теримид 602	610...815
ЭД-20 + МЭА	48	LARC-13 эласт.	390
ЭД-20 + ТГФА	36...48	PMR-15 + NR-150	400
ЭД-20 + УП 606/2	200...250	АПИ-2	200
ЭД-20 + УП 605/3	84	АПИ-2 + СКН	350
ЭХД + ДАДФСН (ВС 2526)	38		
SR-5208 (МУ 720)	82		
ВС-2561	19,8 (K_{Ic})		
ЭДТ-10	29,6 (K_{Ic})		
Эпоксиполиуретановые*	~5000		

* Гетерофазная дисперсия, опытная разработка МАТИ.

1.2.7. ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ МАТРИЦ И ПКМ

Теплостойкость – деформационная устойчивость полимеров и ПКМ при нагреве может быть повышена путем создания полимеров, оптимально сочетающих жесткость цепей и силу межмолекулярных взаимодействий (что обеспечивает требуемую технологичность). Температуры стеклования T_c, плавления $T_{пл}$, температура теплостойкости матричных полимеров непосредственно связаны с подвижностью сегментов (табл. 1.2.8).

Термостойкость – химическая устойчивость полимеров при нагреве, когда тепловая энергия (произведение константы R и температуры) $RT_{дестр}$ превышает энергию диссоциации $U_{дисс}$, т.е. $RT_{дестр} > U_{дисс}$, полимер или полностью разрушается, или энергия RT стимулирует процессы стабилизации с образованием новых термически устойчивых структур (кокс). Процессы термодеструкции и пиролиза используются для получения пиролизованных материалов, волокон и в саморегулирующихся

1.2.8. Температуры стеклования полимерных матриц

Матрица	T_c, °С	Матрица	T_c, °С
Термопластичные матрицы		**Бисмалеинимидные матрицы**	
Полисульфон Р1700	190	К 601	290...315
Полиэфирсульфон	230...245	С 896	285
Полиарилсульфон 360	285	F 178	350
ПИ 2080	310	Матримид 5292	290...350
Торлон 4000Т	260	С 183	260...295
Авимид N	340...370	К 353	285
Авимид К-2	280	Н 795	290
Авимид К-3	250	5245 С	230
Матримид 5218	320	С 65 FWR	265
ПЭИ Ултем 1000	220	Дисбимид RTM	250
Термореактивные матрицы		ВТ	230...310
Эпоксидные (ТМА)	125	V 378 А	370
ЭДТ-69Н	100	К 711	280
ЭДТ-10	150	**Полиимидные матрицы**	
УП 2217	160	PMR-15	330...390
ЭХД-МК	150	Теримид 600	315
УП-352	160	Теримид 602	330
УП-318	70	LARC-13 эласт.	280
ЭНФБ	160	Скайбонд, СП	300...400
ВС-2526, 2561	200...210	АПИ-1,2,3	300...400

процессах тепло- и массообмена при воздействии на материалы высокотемпературных высокоскоростных газовых потоков (одноразовая абляционная теплозащита).

Температура термоокислительной деструкции непосредственно связана с горючестью полимеров и материалов на их основе, которая требует решения вопросов огнестойкости, дымообразования и токсичности продуктов горения (FST-свойства, flammability, smoke, toxity). Горючесть и дымовыделение при горении полимеров и ПКМ могут быть снижены при использовании принципов, как обеспечивающих высокую тепло- и термостойкость, так и учитывающих специфику горения, например, введение антипиренов и антипирирующих атомов и звеньев непосредственно в цепи или, чаще, низкомолекулярных антипиренов, разлагающихся с выделением негорючих газов и паров.

Для ряда конструкций (строительство, салоны гражданских самолетов, космических станций, судостроение) используют конструкционные материалы, удовлетворяющие требованиям по огнестойкости.

Для оценки огнестойкости используется более 30 стандартов. Огнестойкость в реальных условиях (пожароопасность) требует комплексной оценки (табл. 1.2.9). Для перевода эпоксидных матриц в категорию самозатухающих используют галогенсодержащие соединения (в составе ЭДТ-69Н бромсодержащая смола УП-631У; отвердители типа хлорэтокси-, аминоэтокси-, анилизофосфазенов в связующих ХЭФ-8,5; -10; -17; хлорсодержащее связующее ЭХД).

1.2.9. Пожароопасность матриц и ПКМ

Матрица	Критерии оценки пожароопасности					
	Легкость поджигания	Скорость распространения пламени	Выделение тепла	Токсичность продуктов горения	Дымообразование	Легкость самозатухания
ПТФЭ	1	1	1	4	1	1
Поливинилиденфторид	2	2	4	3	2	2
Полиэтилены	3	3	3	2	2	3
Полиамиды (фенилон, Номекс)	2	2	2	4	2	4
Полисульфоны	2	2	4	4	4	4
ПФО	2	2	4	4	4	4
Полифосфазены	1	1	1	4	4	1
Полиуретаны	3	3	3	3	3	3
Полисилоксаны	2	2	4	2	2	4
Полиэфиры ненасыщенные	3	3	3	4	3	3
ФФС	1	1	1	1	4	1
Стеклопластики						
Эпоксидные	3	3	3	4	2	2
Фенольные	2	2	2	4	2	2
Кремнийорганические	1	1	1	1	1	1
Полиамидные	1	1	1	4	4	1
Малеинимидные	1	1	1	2	2	1

Примечание. 1 – материал полностью удовлетворяет требованиям пожаробезопасности; 2 – удовлетворяет частично; 3 – не удовлетворяет; 4 – необходимы модификации.

Термоустойчивые материалы должны сочетать высокую тепло-, термо- и огнестойкость. Чаще используют критерии, характеризующие деформационную теплостойкость. В России это теплостойкость при разных нагрузках ($T_{4,6}$; $T_{18,5}$; T_{50}), по Вика $T_В$, по Мартенсу $T_М$. В зарубежной практике дя характеристики деформационной теплостойкости (Heat deflection temperature, HDT) используют большое число стандартов.

При разработке перспективных матриц стремятся учитывать сложный комплекс требований к ним: новые типы эпоксидных (если требуемая теплостойкость не превышает 150 °С), малеинимидных и полиимидных матриц для теплостойких конструкционных ПКМ (их свойства составляют 80...100 % эпоксидных, табл. 1.2.10, 1.2.11).

Водопоглощение матриц определяется полярностью звеньев полимера, плотностью сетки, дефектами и особенностью структуры матрицы на микро- и макроуровне. Высокая влагоемкость эпоксидных материалов определяется высокой концентрацией ОН-групп и третичного азота (отверждение аминами, ускорители с третичным азотом). Высокими показателями водопоглощения характеризуются также ПКМ на основе полиэфирных, феноло-

1.2.10. Огнестойкость ПКМ, перспективных для использования в судостроении (испытания по стандарту MIL-STD-2202)

Связующее в ПКМ (1)	Плотность подведенного теплового потока, кВт/м^2	Время, с, до начала горения	Плотность теплового потока, выделяющегося при горении, кВт/м^2	Плотность теплового потока, кВт/м^2, выделяющегося после горения в течение			Сгоревшая зона, м^2/кг	Плотность дыма D_s/D_{max}	Состав продуктов горения*	$\frac{\sigma_{ви,ост}}{\sigma_{ви}}$, %**	Скорость распространения пламени***
Метод определения	ASTM E-162	ASTM E-1354 (калориметр)	ASTM E-1354	60 с	180 с	300 с	–	ASTM E-662	CO/CO$_2$/ HCN/HCl	ASTM E-662	ASTM E-162
Размер образцов	150 × 460 × × 5 мм	ASTM P-190	–	ASTM E-1354			–	76 × 76 × × 5 мм	ASTM E-662	12,7×76×5 мм	150 × 460 × × 5 мм
Винилэфирное (типа ПН)	25	203	188	109	129	118	827	460 / 580	230 / 0,3 / – / –	14	27
	50	61	199	135	151	122	1107				
	75	34	300	198	186	147	1316				
	100	21	256	221	200	139	1173				
Эпоксидное	25	535	39	26	33	30	470	60 / 170	283 / 1,5 / 5 / –	7	11
	50	105	178	153	130	98	580				
	75	60	217	199	145	93	728				
	100	40	232	204	130	93	541				
Бисмалеинимидное	25	503	128	57	99	105	324	30 / 120	300 / 0,1 / 7 / Следы	22	17
	50	141	176	144	160	161	546				
	75	60	245	178	201	199	604				
	100	38	285	217	236	219	816				
Фенолоальдегидное	25	Не горит	0	0	0	0	–	5 / 25	300 / 0,1 / 1 / 1	–	4,5
	50	210	47	31	40	38	176				
	75	55	57	25	37	40	161				
	100	25	96	91	84	70	620				

Продолжение табл. 1.2.10

Связующее в ПКМ (1)	Плотность подведенного теплового потока, кВт/м^2	Время, с, до начала горения	Плотность теплового потока, выделяющегося при горении, кВт/м^2	Плотность теплового потока, кВт/м^2, выделяющегося после горения в течение			Сгоревшая зона, м^2/кг	Плотность дыма D_s/D_{max}	Состав продуктов горения*	$\frac{\sigma_{ви,ост}}{\sigma_{ви}}$, %**	Скорость распространения пламени***
Полиимидное	25	Не горит	0	0	0	0	–	1 / 15	200 / 0,1 / Следы / 2	46	2,5
	50	175	40	18	28	27	170				
	75	75	78	46	45	49	131				
	100	55	85	73	60	60	113				
Полифенилен-сульфид	25	Не горит	0	0	0	0	–	10 / 80	70 / 0,5 / 2 / 0,5	36	7,5
	50	105	52	3	16	25	585				
	75	57	71	37	53	56	575				
	100	30	183	81	81	106	749				
Полиэфирэфир-кетон (ПЭЭК)	25	Не горит	0	0	0	0	–	2 / 3	Следы / Следы / – / –	75	3,5
	50	307	14	10	8	8	69				
	75	80	54	29	29	30	134				
	100	42	85	59	55	56	252				

* CO_2 – объемная доля, остальные % в ppm (частей на миллион, млн$^{-1}$)
** После нагрева потоком 25 кВт/м^2 в течение 20 мин
*** Допустимый предел по MIL-STD-2202 (FSI) – 20

Примечания: 1 Все исследованные материалы – стеклопластики, на основе ПЭЭК – углепластик

2 Плотность дыма и горючих продуктов при нагреве образцов тепловым потоком 25 кВт/м^2, D_s – после горения 300 с горения, D_{max} – максимальная плотность (допустимый предел по MIL-STD-2202 $D_s = 100$)

1.2.11. Свойства перспективных термореактивных матриц для ПКМ

Матрицы	Температура переработки, °С	Водопоглощение за 24 ч, %	Трещиностойкость, G_{Ic}, Дж/м^2	Температура стеклования, °С	Температура длительной эксплуатации, °С**
Эпоксидные					
1. Диановые на основе диглицидиловых олигомеров (ЭД, ЭДТ-10)	20…180	9,5…12	60…200	160 80	100 80
2. На основе тетраглицидиловых олигомеров (ЭХД, ВС 2526, 5208, МУ 720)	120…200	6,5…8,0	100…400	200 160	120 100
3. Экспериментальные, в том числе эластифицированные	120…200	1…2	До 7500	200…300 150…250	150…160 120
Малеинимидные (БМИ)					
4. БМИ, отверждаемые аминами (ПАИС, ТП, ИД)	180…250	4…6,5	60…200	250…350 160…180	150 120
5. БМИ, отверждаемые аллильными соединениями	160…220	1,5…3,0	200…600	250…350 200…250	200…220 180…200
6. Эластифицированные БМИ, отверждаемые аллильными соединениями	160…220	1,5…3,0	До 1000	200…290 200…250	180…200 180…200
Полиимидные (мономерного типа)					
7. На основе смесей мономеров (PMR, АМИИ-2,3)	280…340	1…2	80…200 (400…600)*	340…360 320…340	250…300 до 250
8. Фторсодержащие (авимиды, PMR-T, АПИ-Ф)	300…370	0,5…1,5	До 2500	250…400 240…370	250…300 250…300

* Составы 1 и 4 приведены для сравнения – эластифицированные АПИ-М, LARC-PR40.

** Температура сохранения 50 % начальных свойств после 2000 ч.

Примечание В числителе – для сухой среды, а знаменателе – после равновесного водопоглощения.

1.2.12. Химическая стойкость ненаполненных теплостойких термопластов

Торговая марка	Вид полимерного связующего	Гидравлическая жидкость	Спирты, гликоли	Хлорированные углеводороды	Простые эфиры	Кетоны	Сложные эфиры	Ароматические углеводороды	20%-ный раствор H_2SO_4	Набухание в воде, %
Udel 1700	Полисульфон	+	0	++	–	+	+	+	0	0,86
Vietrax PES 4100	Полисульфон	+	0	++	0	+	+	+	0	–
Radel A-400	Полисульфон	+	0	++	–	+	+	+	0	1,3
Vietrax PEEK 45y	Полиэфирэфиркетон	0	0	0	–	0	0	0	0	0,5
Ryton PPS	Полифениленсульфон	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4
Ryton PAS-2	Полиариленсульфон	–	0	+	–	+	0	0	–	–
Torlon	Полиамидоимид	0	0	0	0	0	0	0	0	2,0…5,0
Torlon AIX	Полиамидоимид	–	–	–	–	–	–	–	–	1,8
Ultem 1000	Полиэфиримид	0	0	++	0	+	+	0	0	1,2
LARC-TPI	Полиимид	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Avimid K-111	Полиимид	0	0	0	–	0	–	–	–	2,2
Xyder RT-300	Ароматический полиэфир	0	0	0	–	0	0	0	0	0,2

Обозначения: "+" – действует или адсорбируется, "++" – растворяется, 0 – влияние не обнаружено; "–" – данных нет

формальдегидных, полиамидных связующих. Водопоглощение матриц снижается с повышением их трещиностойкости и устранением на микроуровне дефектов, стимулирующих осмотический механизм насасывания воды. При уменьшении концентрации третичных атомов азота в эпоксидных и малеинимидных матрицах (замена аминных отвердителей на аллильные) равновесное водопоглощение снижается в 2 – 5 раз.

Химическая стойкость матриц вносит существенный вклад в химическую стойкость ПКМ и определяется их физической и химической структурой настолько, что, например, изменение массы эпоксидных углепластиков под воздействием жидких сред зависит даже от типа отвердителя. Особенно высока химическая стойкость новых типов термоустойчивых полиариленов (полисульфоны Udel 1700, PES4100, A-400; полифениленсульфиды PPS, PAS-2), полигетероариленов (полиамидимид Torlon, полиэфиримид Ultem, полиимиды LARC, К-Ш) и ароматических полиэфиров (PEEK, Xyder) (табл. 1.2.12).

Радиационная стойкость матриц несмотря на высокую чувствительность ковалентных связей к излучениям, может быть повышена в случае полимеров, содержащих сопряженные связи, сомкнутые в циклы. После воздействия излучения мощностью 100 Гр (10 000 Мрад) свойства полиариленов и полиимидов практически не изменяются (20 лет в условиях ближнего космоса). Полиимидные КМ после радиационного воздействия при –196 °С в 5 – 10 раз прочнее эпоксидных. Благодаря низкому водопоглощению и высокой огнестойкости малеинимидные КМ заменяют эпоксидные в наиболее прогрессивных конструкциях.

Большой ассортимент полимерных связующих позволяет провести их целенаправленный выбор для ПКМ с заданными свойствами. ПКМ являются наиболее прогрессивными материалами с выдающимися конструкционными свойствами, их усталостная прочность достигает 70 % (металлы не более 30 %) предела прочности.

Удельная прочность стеклопластиков в 2 – 4 раза выше, органопластиков в 3,5 – 7,5 раз выше, углепластиков в 1,6 – 4 раза выше удельной прочности стали. Удельный модуль упругости стеклопластиков близок к E^{+}/ρ алюминия, органопластиков в 1,5 – 2,6 раз выше E^{+}/ρ алюминия. Прочность при растяжении однонаправленных стекло-, органо- и углепластиков близка к прочности стали. Модуль упругости углепластиков равен модулю упругости стали, а модуль упругости стекло- и органопластиков превышает модуль упругости сплавов алюминия и магния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Армированные** пластики / Под ред. Г.С. Головкина. М.: МАИ, 1997. 404 с.

2. **Лапицкий В.А.** Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. Киев: Наукова думка, 1986. 96 с.

3. **Михайлин Ю.А., Мийченко И.П., Первушин Ю.С.** Требования к матрицам конструкционных полимерных композиционных материалов: Учеб. пособ. Уфа: УГАТУ, 1996. 70 с.

4. **Справочник** по КМ / Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988.

5. **Седов Л.Н., Михайлова З.В.** Ненасыщенные полиэфиры. М.: Химия, 1978. 253 с.

6. **Термоустойчивость** пластиков конструкционного назначения / Под ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1980.

7. **Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В.** Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 230 с.

Глава 1.3

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

На общем фоне интенсивного роста производства полимерных материалов (ПМ) отчетливо проявляется тенденция опережающего развития термопластичных композиционных материалов (ТКМ), армированных непрерывными волокнами: стеклянными, органическими и др. Их ежегодные темпы прироста в промышленно развитых странах достигают 10...15 % при одновременном снижении доли таких распространенных отверждающихся ПМ, как фено- и аминопласты. Причинами являются не только высокие показатели функциональных свойств ТКМ, комплексно удовлетворяющих практически всему спектру технических требований, но и технологические свойства, обеспечивающие более высокую производительность, низкую трудоемкость, мало- и безотходность, экологическую чистоту промышленного производства.

Объективной предпосылкой для ускоренного расширения областей применения ТКМ является постоянно растущая номенклатура термопластичных связующих, которая, будучи и без того более многочисленной, чем номенклатура промышленно используемых отверждающихся смол, в последнее время дополняется разновидностями полиарамидов, полисульфонов, жидкокристаллических полимеров, а также полиэфирэфиркетоном, линейным полиимидом и другими термопластами. Они значительно расширили потенциальный диапазон варьирования эксплуатационных характеристик ТКМ, например, по прочности до 10 ГПа, по модулю упругости до 1000 ГПа, по диапазону температур эксплуатации от –270 до 400 °С.

Вместе с тем широкой реализации ТКМ при создании новой техники препятствуют сложные проблемы, возникающие при переработке в полуфабрикаты и готовые изделия. Это касается не только ТКМ, связующие которых из-за высокой молекулярной массы или стерических препятствий для перемещения макромолекул утратили способность к плавлению и нередко даже к эффективному растворению, но и ТКМ с плавкими и растворимыми связующими. В последнем случае проблемы вызваны тем, что стандартные промышленные способы формования деталей, разработанные ранее применительно к отверждающимся композиционным материалам (КМ) и, следовательно, основанные на их технологических возможностях, не пригодны для обработки ТКМ без соответствующей модернизации. В этой связи цель данного раздела рассмотреть специфику производства деталей из ТКМ, возможности модернизации известных и разработки новых технологических способов.

1.3.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТКМ

Непрерывно армированные термопласты с объемной долей армирующей фазы до 50...70 % ($V_а$ = 0,5...0,7) обладают рядом технологических преимуществ перед аналогичными армированными реактопластами. К превосходящим технологическим свойствам относятся неограниченная жизнеспособность сырья и полуфабрикатов ТКМ, повышенный коэффициент использования материала (КИМ) как следствие возможности вторичной переработки отходов, многократное сокращение циклов

1.3.1. Удельные энергозатраты на производство 1 кг материалов и изделий из них в мировой практике

Материалы	Энергозатраты, кВт/ч	
	Материал	Изделие
Титан	189,5	1543,2
Алюминий	48,5	392,4
Сталь	35,2	200,4
Эпоксиуглепластик	33,0	72,7
Поликапроамидный стеклопластик	10,0	14,0

формования изделий из-за ненадобности отверждения связующего и, как следствие, сравнительно низкая энергоемкость обработки ТКМ (табл. 1.3.1).

Дополнительные технологические возможности обеспечиваются повышенной деформативностью и податливостью ТКМ, которые предопределили возможность применения для них таких прогрессивных способов производства деталей, как гибка, штамповка, осадка, рулонирование. Одновременно пластичность и химическая активность матриц ТКМ предопределяют технологическую способность деталей соединяться методами сварки в расплаве и химической сварки, обеспечивая быструю сборку узловых конструкций.

Поэтому детали из ТКМ характеризуются повышенной ремонтопригодностью, а их производство мало- или безотходностью и, как следствие, рентабельностью и экологической чистотой. Последний факт приобретает все более доминирующее значение, поскольку из 150 – 170 млн. т мировой полимерной продукции значительная доля приходится на термопластичные изделия.

Однако перечень технологических свойств ТКМ не ограничивается только положительными примерами. Достаточно отметить тот факт, что создание КМ на основе ряда современных линейных полимеров затруднено или пока просто невозможно из-за неплавкости такого рода "термопластов". В частности, не размягчаются вплоть до температуры деструкции ($T_д$) такие привлекательные по своим эксплуатационным характеристикам линейные полимеры, как поли-*п*-фениленсульфон ($T_д$ > 773 К) и поли-*п*-оксибензоат со степенью кристалличности около 90 % ($T_д$ = 823 К).

Сложности обработки подобных "термопластов" не всегда преодолимы, поэтому иногда поступаются уровнем эксплуатационных свойств, снижая, например, молекулярную массу (ММ) и тем самым добиваясь способности плавиться. Типичным примером может служить полифениленоксид, обладающий такой способностью при ММ от 25 000 до 35 000 и выпускаемый под марками арилокс (РФ), С-1001 (США) с модификациями специально для литья под давлением под марками норил, норил 300, N 300 (США). Но и при этом даже исключительно высокая вязкость расплава ПФО создает значительные трудности для обработки, требуя повышенных температур (свыше 563 К) и давлений (до 140 МПа).

Армирование таких термопластов волокнистыми наполнителями создает дополнительные сложности при обработке ТКМ в детали, для преодоления которых необходимо дальнейшее снижение ММ с негативным влиянием на теплостойкость и механические свойства. Однако эти потери в разной мере удается компенсировать для ТКМ путем введения армирующей фазы. На примере регулирования теплостойкости это показано в табл. 1.3.2.

Технологическим свойством, принципиально отличающим ТКМ от отверждающихся аналогов, является низкая липкость препрегов, полуфабрикатов и пленочных связующих при нормальных температурных условиях. Липкость, необходимая для взаимной фиксации этих элементов при формировании заготовок деталей, может проявляться только при размягчении термопластичных связующих, т.е. в зависимости от их химического состава и строения при температурах нагрева, измеряемых сотнями градусов.

Для большинства составов ТКМ характерна и ограниченная смачивающая способность термопластичных связующих по отношению к армирующим волокнам (табл. 1.3.3).

1.3.2. Изменение теплостойкости (К) термопластичных стеклопластиков под нагрузкой 1,8 МПа при различных объемах V_a армирования*

V_a, %	ПА6	ПА6,6	ПА6,10	ПБТ	ПЭТ	ПАц	ПФСу	ПП	ПК	ПСу	ПФО
0	343	338	338	328	358	383	410	336	413	445	403
30	483	523	463	483	513	433	533	428	422	456	428
50	493	533	488	498	528	448	543	443	423	463	438

* ПА – полиамид, ПП – полипропилен, ПК – поликарбонат, ПБТ – полибутадиентерфталат, ПЭТ – полиэтилентерфталат, ПАц – полиацетали, ПФО – полифениленоксид, ПСу – полисульфон, ПФСу – полифениленсульфид

1.3.3. Краевые углы смачивания (градусы) волокон расплавами термопластов при 503 К

Термопласт	Поверхностное натяжение расплава термопласта $\gamma_L \cdot 10^{-3}$, Н/м (180.. 290 °С)	Армирующие волокна ТКМ				
		Стеклянные	Графитированные	СВМ	Фенилон	Аримид
ПП	22,5...18,2	3	0	1	2	7
ПЭТ	60 (265...290 °С)	–	87 (270 °С)	–	–	–
ПА6	36,1...26,0	60	84	40	50	72
ПА12	28,9...22,3	7	–	3	4	13
ПА6,6	–	–	86	–	–	–

Если принять во внимание, что смачивание призвано обеспечивать требуемую поверхность контакта между компонентами, а эта поверхность в 1 $см^3$ ТКМ, например, с $V_а = 0,6$ и диаметром армирующих волокон 7 мкм достигает 3400 $см^2$, то становится понятной острая необходимость совершенствования этого технологического свойства ТКМ. Там, где смачивающая способность связующих оказывается недостаточно высокой, возникают дополнительные сложности с пропиткой и адгезионным взаимодействием на поверхности армирующих волокон. Исключение могут представлять ТКМ с компонентами, имеющими достаточно близкое химическое сродство, например, полиамидное связующее – полиарамидные армирующие волокна. Дополнительным эффектом в межфазной зоне таких ТКМ может стать эпитаксия линейных макромолекул связующего, непосредственно прилегающих к поверхности наполнителя.

Суть явления состоит в ориентации макромолекул связующего и кристаллообразовании под влиянием фибриллярной структуры синтетических армирующих волокон. Результатом является своеобразное наращивание объема волокон, наиболее прочная связь в межфазной зоне (табл. 1.3.4) и повышение характеристик механических свойств ТКМ выше показателей, рассчитываемых по закону аддитивности.

Проблему повышения адгезионной прочности на границе раздела волокно–связующее в ТКМ пытаются решать традиционными методами – физической и химической модификацией поверхности армирующей фазы. Однако, как показывают результаты различных исследований, лучшие результаты могут быть достигнуты при нестандартных решениях. Например, ударопрочность стеклопластика на основе полиолефинов возрастает в 2,5 раза, если на волокно, аппретированное алкилсиланом, нанести промежуточный слой из тройного блок-сополимера: полистирол-полибутадиен-полистирол. Аналогично возрастает ударопрочность, а также прочность при сдвиге стеклопластиков на основе ПА6,6, если создается промежуточная фаза из блок-сополимера полиэфирполиамида.

Серьезным недостатком технологических возможностей термопластичных связующих является вязкость их расплавов, которая на несколько порядков превышает аналогичную характеристику олигомерных отверждающихся связующих (табл. 1.3.5).

Высоковязкие расплавы термопластов – основное препятствие для изготовления монолитных ТКМ, пористость которых может превышать 15 % (об.). Попытки добиться более эффективной пропитки армирующих элементов ТКМ с помощью растворов термопластов также не обеспечивают необходимого снижения пористости до допустимого уровня – не более 3 % (об.), поскольку необходимую для этого вязкость имеют только низкоконцентрированные растворы (не более 5...6 %), и требуется многократная пропитка с промежуточными продолжительными (для удаления растворителя) выдержками. Однако и при этом условии пористость остается значительно выше допустимой.

1.3.4. Прочность связи (МПа) термопластичных связующих с армирующими волокнами в ТКМ

Связующее	Армирующие волокна							
	Стеклянные	ПС	ПКА	Фторлон	Аримид	Фенилон	СВМ	Кевлар 49
ПЭВП	11,4	–	–	–	–	–	–	8,2
ПП	9,0	–	–	–	10	12	16	–
ПС	–	–	6,0	1,4	–	–	–	–
ПММА	–	–	–	1,16	–	–	–	–
ПКА	22	5,8	–	4,3	36	45	49	–
ПА-12	20...25	–	–	–	31	40	45	47,6
ПК	–	–	–	–	–	–	–	9,3
Фторлон	–	1,14	3,6	–	–	–	–	–

1.3.5. Динамическая вязкость расплавов термопластов при максимальных температурах переработки

Термопласт	Марка	Температура термостабильности в течение 15 мин, К	Вязкость расплава (Па · с) при скоростях сдвига	
			10^0, $с^{-1}$	10^1, $с^{-1}$
ПС	ОН	553	1100	320
ПК	ПК-1	553	1500	1500
	ПК-2		625	625
	ПК-3		320	320
	Макролон-310		650	650
ПММА	–	503	2300	1400
ПСу	А	613	425	415
	Р-1700		790	790
	Р-3500		1700	1520
ПЭНП	ПЭНП-10803-020	553	1050	405
ПЭВП	ПЭВП-21008-075	553	2700	620
ПА-12	ПА-12-10	558	342	–
ПА-6	ПА-6-210-310	543	120	120
ПФ	–	493	1050	1050
ПЭТ	Марка Б	543	200	200
ПБТ	–	543	270	270
ПФО	–	553	8000	8000
Полиарилат	ДВ-105	683	5000	5000
ПАСу	–	643	50 000	–
Полиарамид	Фенилон С	663	300 000	–
ПФСу	–	588	–	2500
ПЭСу	–	623	–	2000
ПЭИ	–	623	–	2000
ПЭЭК	–	663	–	350
1-полимер (сополимер ПА)	–	573	–	900

Принятые сокращения: ПФ – полиформальдегид; ПАСу – полиарилсульфон, ПЭИ – полиэфиримид, ПЭЭК – полиэфирэфиркетон.

Таким образом, реализовать преимущества ТКМ при создании конкретных изделий удается только тогда, когда в распоряжении имеются технологические способы, позволяющие обеспечить заданную монолитность и достаточную межфазную прочность ТКМ. Решение задач по преодолению неблагоприятных технологических свойств или, наоборот, по наиболее эффективной реализации положительных технологических качеств начинается с первых же этапов технологических процессов переработки ТКМ в детали. В технологических процессах производства деталей из ПКМ первым этапом является совмещение компонентов – изготовление препрегов или полуфабрикатов.

1.3.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ ТКМ

Эта технология, по сути, воспроизводит стандартные технологические приемы, основанные на жидкофазном совмещении (пропитке) волокнистых армирующих наполнителей со связующими, поэтому остановимся лишь на отличительных нюансах, обусловленных рассмотренной выше спецификой технологических свойств ТКМ. Несмотря на неблагоприятные исходные возможности высоковязких расплавов и низкоконцентрированных растворов термопластичных связующих для эффективной пропитки армирующей фазы, сторонники традиционной технологии обработки ТКМ продолжают решать эту проблему еще на подготовительном этапе. Смысл в том, чтобы на последующем этапе формования решать только одну задачу – соединять отдельные слои препрега (по существу готового ТКМ), добиваясь общей монолитизации изделия.

Растворный способ совмещения, осуществляемый протяжкой армирующих элементов (нитей, жгутов, лент, тканей) через ванны с раствором связующего с последующим удалением растворителя, считается наиболее высокопроизводительным и для производства препрегов ТКМ. Однако данный способ, как и пропитка суспензиями, признан бесперспективным для ТКМ, поскольку растворители термопластов, нередко высококипящие и токсичные, плохо удаляются из препрегов. Кроме того, даже при пропитке низкоконцентрированными растворами (обычно не более 6 % по массе) удается наносить на волокна лишь 8...15 % полимера, причем внутрь жгутов проникает всего 2...4 %. В результате даже после двух-четырехкратной пропитки сохраняется высокая пористость не только в препреге, но и в готовом ТКМ, достигая 12...14 %, что предопределяет низкую реализацию механических свойств. При этом пористость может достигать десятков процентов, если армирующие нити имеют большую линейную плотность и многократную крутку.

Стремление избежать недостатков растворного способа и радикально решить проблему пропитки термопластичными связующими привело к попыткам использовать для этого мономеры, обеспечивающие монолитность ТКМ после их полимеризации. Однако реализация ***мономерного способа пропитки*** армирующих наполнителей пока далека от промышленных масштабов, поскольку нуждается в предварительном решении ряда научно-технических задач, к числу которых относят: выбор компонентов с учетом технологичности ТКМ и эксплуатационных требований к изделию; изучение кинетических и реокинетических закономерностей образования полимера; анализ течения "реокинетической" реакционной массы; изучение кинетических процессов формирования свойств ТКМ (кристаллизация, эволюция остаточных напряжений и т.д.).

До решения комплекса перечисленных задач пористость ТКМ после полимеризации матричного мономера остается пока на уровне 8...12 %. В итоге среди жидкофазных способов совмещения компонентов ТКМ при изготовлении препрегов первенство отдается расплавному способу, который наиболее исследован и лишен недостатков, связанных с использованием растворителей.

Решение проблем применения ***расплавного способа*** производства препрегов ТКМ связано с поиском технологических приемов, компенсирующих чрезвычайно высокую вязкость (см. табл. 1.3.5) пропитывающей термопластичной массы. Так, при "кабельном" способе совмещения компонентов, принятом в электротехнической промышленности, эффективная пропитка достигается лишь при протягивании через расплав термопластов моноволокон большого диаметра (не менее 100 мкм), например, борных. Пропитка же комплексных нитей и ровингов с большим количеством тонких армирующих волокон (6...8 мкм) невозможна, так как пористость препрегов достигает 20...30 %. Отсюда многочисленные попытки принудительного вдавливания (импрегнирования) термопластичных расплавов в армирующие элементы.

На продолжительность расплавной пропитки влияет ряд параметров: состав жидкой фазы и степень вакуумирования армирующего наполнителя, химический состав и физическое состояние поверхности волокон, первоначальная вязкость расплава термопласта, внешнее давление, схема и плотность укладки волокон. Поэтому среди способов принудительной пропитки предпочтение отдано непрерывным способам, обеспечивающим производство, например, ленточных препрегов со скоростью 0,3 м/мин. Для этого используют протяжку препрегов через угловую головку экструдера, каландры или систему перегибных неподвижных роликов и полуроликов, предусматривающую многократное вдавливание расплава полимера ("градиент давления") внутрь жгутов.

Соответствующие результаты представлены в табл. 1.3.6, причем для каландрования и для протяжки через неподвижные ролики использовались полуфабрикаты препрегов, предварительно полученные "кабельным" способом.

Как следует из приведенных данных, пористость препрегов удается многократно снизить, вплотную приблизив ее к пределу (2...3 %). Это достигнуто без предварительной модификации поверхности армирующих волокон, которая не сказывается на качестве пропитки при изготовлении препрегов, хотя в ряде случаев, например, аппретирование может положительно влиять на общий результат переработки ТКМ в детали. В итоге достигнутые результаты расплавной пропитки оказались достаточными для промышленного применения в производстве препрегов, например, на основе полиэфирэфиркетона марки APC-2 и углеродного волокна. Фирма ICI нашла возможность пропускать через ванну с расплавом термопласта разрозненные углеродные волокна, достигая полной гомогенизации волоконно-матричной системы.

Вместе с тем у всех вариантов расплавной технологии изготовления препрегов ТКМ имеется серьезный недостаток – неоднократный высокотемпературный нагрев термопластичных связующих с продолжительной выдержкой в расплавной ванне или материальном цилиндре экструдера. Например, температура нагрева полипропилена в экструдере составляет 250...280 °С, полисульфона – 320... 340 °С, а на перегибных роликах до 440 °С. С учетом последующего интенсивного нагрева, необходимого для обработки препрегов в заготовки и готовые детали, создается реальная опасность термоокислительной деструкции связующего и снижения качества ТКМ, поскольку максимальное время термостабильности расплавов термопластов даже при литье под давлением не превышает 15 мин. Кроме того, снижению физико-механических характеристик ТКМ объективно способствует механическая деструкция армирующих волокон, возникающая при изготовлении и дальнейшей обработке препрегов в результате сжатия между валками, перегибов и трения, вызывающих разрывы, сколы и дробление волокон особенно в местах их пересечения в крученых нитях, жгутах и тканях.

Недостатки способов изготовления препрегов ТКМ, основанных на жидкофазном совмещении компонентов, обусловили разработку ***способов твердофазного совмещения*** армирующих волокон и связующего, для которых не требуется применение высоких давлений, а также повторяющегося и продолжительного плавления термопластов. Так, одним из новейших способов получения волокнистых ТКМ с равномерной пропиткой является протягивание сухого армирующего жгута через ванну с сухим порошком термопласта (диаметр частиц в среднем составляет 100 мкм), который при помощи струи воздуха, подаваемой снизу ванны, вступает в контакт с волокном. Этот метод, известный как обработка материалов в псевдоожиженном слое, довольно широко используется в химической технологии. При ударах частиц порошка о волокна

1.3.6. Характеристики качества ленточных препрегов из стекложгута (СВ) и термопластичных связующих (полипропилена и полисульфона), изготовленных на установках с принудительным импрегнированием

Вид установки		Состав препрега	Пористость, %	Прочность при растяжении, МПа
Экструдер с уголковой головкой		ПП – СВ	25...40	1000...1200
После экструдера	Каландр с двумя нагревательными валками d = 110 мм	ПП – СВ	10...15	1900...2000
	Каландр с системой (10 – 12) валков d = 40 мм, установленных в трубчатом нагревателе	ПП – СВ ПСу – СВ	5...6 2...3	2100...2300 < 3000
Система неподвижных обогреваемых роликов и полуроликов с фильерной подачей расплава связующего		ПП – СВ	2...3	2700...3000

возникают заряды статического электричества, повышающие адгезию полимерной матрицы к поверхности волокон. Например, пропитка жгутов из графитового волокна на одной из фирм США описанным способом проводится со скоростью до 18 м/мин, т.е. во много раз быстрее, чем это удается осуществлять при обычной пропитке.

Однако, строго говоря, при твердофазном совмещении компонентов ТКМ уместнее говорить не о препрегах, характеризуемых непрерывностью матричной фазы, а о полуфабрикатах ТКМ, в которых армирующие волокна могут чередоваться с дискретными матричными элементами в виде не только термопластичных порошков, но также пленок или волокон. Методы изготовления таких полуфабрикатов весьма специфичны, поэтому должны быть рассмотрены отдельно.

1.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ТКМ

Сущность твердофазного совмещения компонентов заключается в предварительном приближении к поверхности наполнителя элементов термопластичного связующего (исходных матричных элементов) таким образом, чтобы при последующем плавлении во время обработки полуфабриката ТКМ в изделие протяженность течения их расплава была минимальной, а пропитка наполнителя достигалась энергетически более выгодно – при наименьшем температурно-механическом воздействии. Эффективность достижения этих условий варьируется в широком диапазоне, будучи обусловленной составами и различными возможностями способов изготовления полуфабрикатов ТКМ (рис. 1.3.1).

Наиболее сложно достигать равномерного диспергирования при использовании матричных порошков, независимо от вида термопласта – полиолефинов, полиамидов, полиэфиров, полисульфонов и других, включая сополимеры. Поэтому используется широкий спектр физических методов воздействия как на порошкообразные частицы, так и на армирующие волокна, например, ультразвуковое и вибрационное воздействие, центробежные, гравитационные и электростатические силы, газопламенное напыление, водное суспензирование и воздушное барботирование. Однако неустойчивость протекания процессов совмещения компонентов, различное влияние поляризуемости и размеров полимерных частиц, смачиваемости ими армирующих элементов и нестабильности состава полуфабрикатов при дальнейшей обработке не всегда позволяют порошковым способам твердофазного совмещения компонентов ТКМ иметь превосходство над расплавным совмещением. Так, даже при удовлетворительном качестве распределения термопластичных частиц в армирующих жгутах, достигаемом, например, с помощью электростатического поля, которое "распушивает"

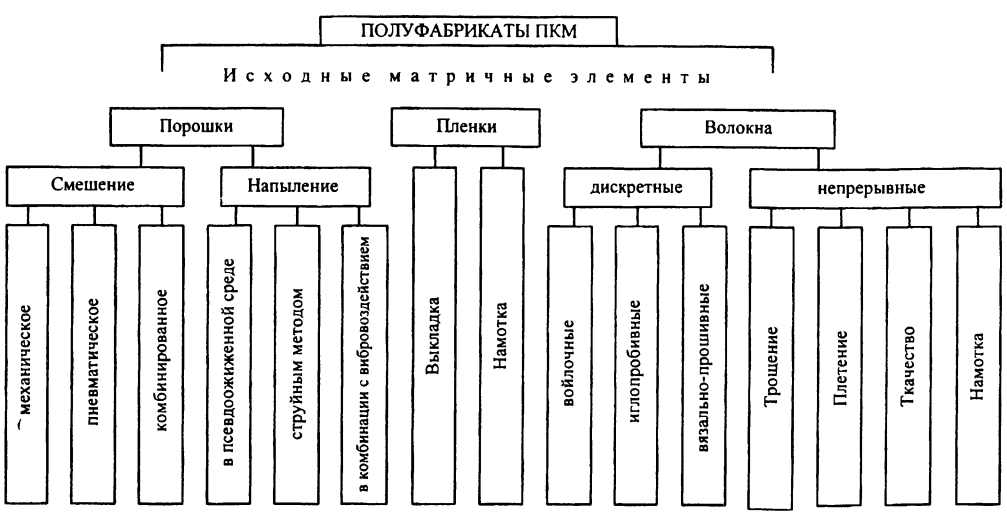


Рис. 1.3.1. Виды твердофазных матричных полуфабрикатов и способы их совмещения с волокнистым наполнителем ПКМ

углеродные волокна, и "псевдокипения" полисульфонового порошка, пористость детали из полуфабриката ТКМ может колебаться в широком диапазоне (10...25 %) даже при небольшом объеме армирования (30 %). Одним из объяснений этому факту может стать специфика смачивания волокнистых армирующих наполнителей расплавами порошкообразных термопластов, содержащих большое количество воздушных включений.

Способы изготовления полуфабрикатов ТКМ с применением матричных пленок (обычно толщиной 50...100 мкм) имеют преимущество, главным образом, при сочетании с ровингами, хотя находят применение и при сочетаниях с тканями. Давления, необходимые для переработки таких полуфабрикатов в детали, различаются в десятки раз и в последнем случае достигают 10 МПа.

Основное преимущество пленочных полуфабрикатов ТКМ – в точном обеспечении задаваемого соотношения компонентов, но удовлетворительное качество пропитки (пористость менее 10 %) достигается лишь в тонких слоях. Однако обработка армирующих волокон, улучшающая смачиваемость расплавами пленок, может значительно сократить остаточную пористость. Например, после оксидирования поверхности углеродной ленты она более равномерно покрывается расплавом полисульфоновой пленки, и пористость детали снижается до 8 %, а при дополнительном аппретировании составом марки ДМ-2 пористость составляет всего 2 %.

В отечественной промышленности наибольшее применение нашли полуфабрикаты различных термопластичных углепластиков. В них в наибольшей мере можно сохранить целостность и, следовательно, свойства хрупких углеродных волокон в процессе обработки. О том, насколько это возможно в конкретных составах полуфабрикатов данного вида, можно судить по данным табл. 1.3.7, где представлены физико-механические характеристики трех видов поликапроамидных (ПА-6) углепластиков в сравнении с характеристиками известного отвержденного углепластика марки КМУ-3л, изготовляемого из расплавного препрега. Полуфабрикаты ТКМ были изготовлены послойным чередованием различных углеродных лент с пленками из ПА-6, толщина которых подбиралась таким образом, чтобы обеспечить заданный объем армирования соответствующего углепластика в готовом изделии. Формование осуществлялось прессованием при температуре, на 30...40 °С превышающей температуру плавления ПА-6, при давлении 1,2 ± 0,2 МПа в течение 10 мин.

Пленочный способ изготовления полуфабрикатов ТКМ имеет также и другое преимущество, позволяя заранее формировать любую заданную схему армирования конкретного изделия. Возможности этого представлены в табл. 1.3.8 на примере пленочных полуфабрикатов углепластика с матрицей из поликапроамидной пленки марки ПК-4 (ТУ 6-05-1775–76). Аналогичным образом изготовляют и обрабатывают полуфабрикаты ТКМ, в которых используют пленки из полиамидов ПА-6,6 и ПА-12, полиолефинов, поливинилхлорида и других термопластов с оптимальной вязкостью расплава при режимах обработки, как и для порошковых полуфабрикатов, приблизительно равной 150 Па · с.

К недостаткам пленочного способа изготовления твердофазно-сочетаемых полуфабрикатов ТКМ относится весьма ограниченная возможность сокращения пути течения расплава матричных пленок при пропитке волокнистых наполнителей. Этот технологический параметр, обусловливающий степень достигаемой монолитности детали, зависит в данном случае только от толщины ровницы, жгута, ткани или мата, которые контактируют с матричными пленками. Для эффективного заполнения межволоконного пространства увеличивают толщину этих пленок, что повышает жесткость полуфабрикатов ТКМ, затрудняя их выкладку по криволинейным поверхностям, и требует более высоких давлений при формовании изделий. Стремление избавиться от этих недостатков привело к применению твердофазных матричных элементов в виде термопластичных волокон.

Технология изготовления полуфабрикатов ТКМ с применением матричных волокон разработана с учетом теоретической зависимости протяженности течения расплава связующего от степени сближения и равномерности чередования матричных и армирующих волокон. Этот принцип наглядно проявляется при анализе моделей "волоконной технологии", изображенных на рис. 1.3.2 и воспроизводящих равнообъемные элементарные ячейки полуфабрикатов ТКМ разного типа. В модели (рис. 1.3.2, *а*), отображающей механизм пропитки армирующего наполнителя (белое поле) при жидкофазном совмещении

1.3.7. Физико-механические характеристики однонаправленных поликапроамидных углепластиков при 20 °С

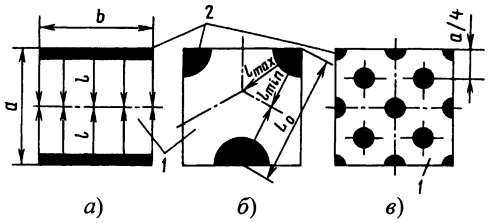
Показатели свойств	Марка углеродной ленты			Отвержденный углепластик КМУ-3л
	ЭЛУР-0,1П ТУ 6-06-31-212–78	ЛУ-0,2П ТУ 6-06-31-481–80	"Кулон" ТУ 6-06-31-485–84	
Объемная доля армирования, %	60	61	59	55
Плотность, кг/м^3	1400 (0,7)	1420 (0,7)	1510 (1,3)	1400
Сопротивление срезу, МПа:				
поперек волокон	75	78,8 (10)	80	–
вдоль волокон	40	–	30	–
В осевом направлении				
Разрушающее напряжение, МПа:				
при растяжении	685 (1,5)	588 (3,6)	587 (2,7)	650
при сжатии	340	210 (19,5)	–	400
при изгибе	1320 (13,2)	1070 (4,2)	859 (2,4)	1000
при сдвиге	31	28	–	29
Модуль упругости, ГПа:				
при растяжении	128,5 (1,1)	135,1 (2,1)	151,1 (5,2)	120
при изгибе	100 (1,5)	97,5 (8,2)	89,7 (7,4)	100
В трансверсальном направлении				
Разрушающее напряжение, МПа:				
при растяжении	38	44	49	14
при сжатии	130	133 (7,1)	–	–

Примечание. В скобках указаны коэффициенты вариации показателей свойств, %.

1.3.8. Влияние схемы армирования полуфабрикатов на прочность и жесткость углепластиков на основе ПА-6

Марка углеродной ленты	Направления армирующих волокон	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Разрушающее напряжение, МПа
ЛУ-0,2П	0°	135,1 (2,1)	588 (3,6)
	90°	5,8	44
	±45°	39,2	100
	0°, 90°, ±45°	51,68	159
	0°, ±60°	61,3	143
"Кулон"	0°	151,1 (5,1)	587 (2,7)
	90°	9,8 (3,2)	49 (1,6)
	±45°	45,1 (12,2)	153 (5,7)
	0°, 90°, ±45°	82,2 (6,0)	209 (4,5)
	0°, ±60°	60,6 (3,6)	188 (2,1)

Примечание. В скобках – коэффициенты вариации, %.



а) *б*) *в*)

Рис. 1.3.2. Модели перемещения связующего в волокнистый наполнитель:
а – от поверхности, *б* – от мест плавления поверхностно расположенных частиц;
в – от регулярно и равномерно расположенных волокон при постоянном соотношении фаз ПКМ;
1 – заготовка из армирующих волокон;
2 – матричный полуфабрикат

компонентов или после плавления матричной пленки, связующее поступает с поверхности наполнителя и проходит максимально возможный путь *l*. В модели на рис. 1.3.2, *б* этот параметр заметно сокращается, но минимума протяженность пути течения связующего достигает только в модели (рис. 1.3.2, *в*), где использованы матричные волокна наименьших диаметров, что позволяет распределять их по сечению полуфабриката с наибольшей периодичностью.

Методы, приближающие структуру полуфабриката ТКМ к последней модели, в наибольшей мере способны (при прочих равных условиях) предопределить практически беспористые готовые изделия. Расчеты показывают, что в полуфабрикатах с объемной долей армирования до 70 % величина *l* может быть сокращена более чем на 80 %. Это означает, что при одинаковой продолжительности пропитки (выдержки при формовании) необходимое давление можно снизить до 25 раз. На практике сокращение параметра *l* оценивается прежде всего снижением пористости ТКМ с обычных 10...14 % до 0,25...2,0 % с соответствующим повышением физико-механических свойств готового изделия.

Среди различных методов изготовления полуфабрикатов ТКМ, в наибольшей мере способных удовлетворять теоретическому условию максимального сокращения *l*, практическое применение нашли намотка и ткачество. Намотка, осуществляемая подачей на оправку одновременно матричных и армирующих волокон (нитей), обеспечивает наиболее плотную взаимную укладку, необходимое чередование и возможность подбора волокон с оптимальным соотношением диаметров. А возможность обеспечить любой натяг волокон предотвращает их извитость и отклонение от заданного вектора анизотропии структуры полуфабриката ТКМ. Все это – залог достижения максимальных коэффициентов реализации физико-механических свойств армирующей фазы (табл. 1.3.9). В таблице приведены физико-механические показатели ТКМ, изготовленных из намоточных полуфабрикатов, сочетающих матричные капроновые нити (линейная плотность – 80 текс) с армирующими полиарамидными нитями (СВМ и фенилон), натянутыми с напряжением $0{,}3\sigma^+$, и стеклонитями с натяжением $0{,}1\sigma^+$.

Как следует из табл. 1.3.9, реализация свойств армирующих волокон тем выше, чем прочнее адгезионное взаимодействие компонентов ТКМ, ответственное за качество перераспределения напряжения от внешней нагрузки через матрицу на армирующие волокна. В данном случае такими ТКМ являются композиции типа "поликапроамид – полиарамид"

1.3.9. Коэффициенты реализации прочности и модуля упругости однонаправленных ТКМ

Армирующее волокно	Объем армирования	Плотность, кг/м^3	Прочность при растяжении σ^+, МПа	Коэффициент реализации прочности волокна	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Коэффициент реализации модуля упругости волокна
Фенилон (29,5 текс)	0,6	1270	490	1,2	7,7	1,03
СВМ (29 текс)	0,55	1270	1100	0,96	50	1,04
Стеклянное (диаметр 20 мкм)	0,5	1750	1000	0,82	35	0,83

(ПА-6 – фенилон и ПА-6 – СВМ) с высоким химическим сродством матрицы и волокнообразующих полимеров. При этом данные волокна были натянуты сильнее, а усадка, проявившаяся в горячем расплаве матричных волокон, способствует взаимному смещению волокон в комплексных армирующих нитях и тем самым облегчает проникновение расплава связующего в межволоконное пространство, обеспечивая наиболее полную пропитку ТКМ.

Недостатками намоточного способа совмещения волоконных компонентов в полуфабрикатах ТКМ являются ограниченность применения в деталях, близких по конфигурациям к телам вращения, а также невозможность их применения для производства типовых полуфабрикатов.

Тканые полуфабрикаты ТКМ лишены названных недостатков, поэтому они получили наибольшее применение. Этому способствует и то обстоятельство, что их производство может осуществляться всеми современными машинными способами ткачества, вязания и плетения на стандартном оборудовании с высокой степенью автоматизации. Следовательно, обеспечивается возможность вынесения операции изготовления тканых полуфабрикатов за пределы основного технологического цикла производства деталей из ТКМ, и она может осуществляться на специализированных предприятиях текстильной промышленности, что, по данным специалистов, позволяет повышать производительность труда в 2 – 5 раз, сокращать энерго-, трудо- и фондозатраты до 60...80 %, высвобождая до 25 % производственных площадей и до 10 % операторов.

Разработанный расчетный аппарат позволяет проектировать необходимый состав и структуру тканых полуфабрикатов ТКМ, исходя из задаваемых эксплуатационных свойств изделия и режимов его формования. Взаимосвязь этих параметров показана в виде номограммы на рис. 1.3.3, где тканый полуфабрикат (ТП) характеризуется такими структурными показателями ткацкого производства, как соотношение числа армирующих и матричных нитей $n_а / n_{мо}$ в основе ТП, соотношение их диаметров $d_{мо} / d_а$, плотность $n_о$ укладки нитей по основе, количество $n_{му}$ и диаметр $d_{му}$ матричных нитей по утку, а также заданными свойствами пластиков (объемом $V_а$ армирования, коэффициентом K_σ реализации прочности, толщиной δ монослоя ТП после плавления матричных волокон и технологическими параметрами обработки ТП в детали (T, P, t). Номограмма состоит из основного поля с левой (конструкторской) и правой (технологической) частью и двух дополнительных шкал. Шкала A предназначена для определения диаметра $d_{мо}$ матричных нитей по основе ТП, а шкала B – для определения количества $n_{му}$ матричных уточных нитей.

Задаваясь объемом $V_а$ армирования ТКМ и коэффициентом $K_{\sigma\varphi}$ реализации прочности армирующих волокон, определяют угловой параметр φ, характеризующий допустимую искривленность армирующих нитей основы нитями утка в полуфабрикате ТКМ. Затем по шкале B, предварительно выбрав минимальный диаметр $d_{му}$ из числа серийно выпускаемых термопластичных нитей, находят их необходимое количество $n_{му}$.

По технологическим параметрам переработки (температуре, давлению, времени) ТП в деталь определяют протяженность l течения расплава матричного полимера при пропитке армирующих нитей. Исходя из ориентировочного значения кажущейся толщины δ монослоя ТП после плавления матричных волокон, по каталогам выпускаемых нитей задается диаметр $d_а$ армирующей нити. Соблюдая условие $d_а > d_{мо} > d_{му}$, по каталогам выбирается диаметр $d_{мо}$ матричной основной нити. По шкале A номограммы устанавливается соотношение $d_{мо} / d_а$ диаметров матричной основной и армирующей нитей. Его значение и заданная степень $V_а$ армирования позволяют установить соотношение $n_а / n_{мо}$ (верхнее поле номограммы). По протяженности l течения расплава матричных волокон и соотношению $n_а / n_{мо}$ определяется плотность укладки нитей по основе (верхнее правое поле). В результате удается установить проектные параметры ТП – это $d_{му}$, $n_{му}$, $d_{мо}$, $n_{мо}$, $d_а$ и $n_а$.

На основе типовой методики проектирования ТП разработано, изготовлено и апробировано в производстве свыше 40 разновидностей тканых полуфабрикатов различного состава, в частности, ТОПАФ, ТОСВМ, ТОПАТ (ткани ориентированные полиамидные, армированные волокнами соответственно фенилон, СВМ, терлон с объемной долей армирования в диапазоне 30...70 % на основе связующего с вязкостью расплава 10^3 Па · с. Варианты ТП имеют два типа размещения армирующих

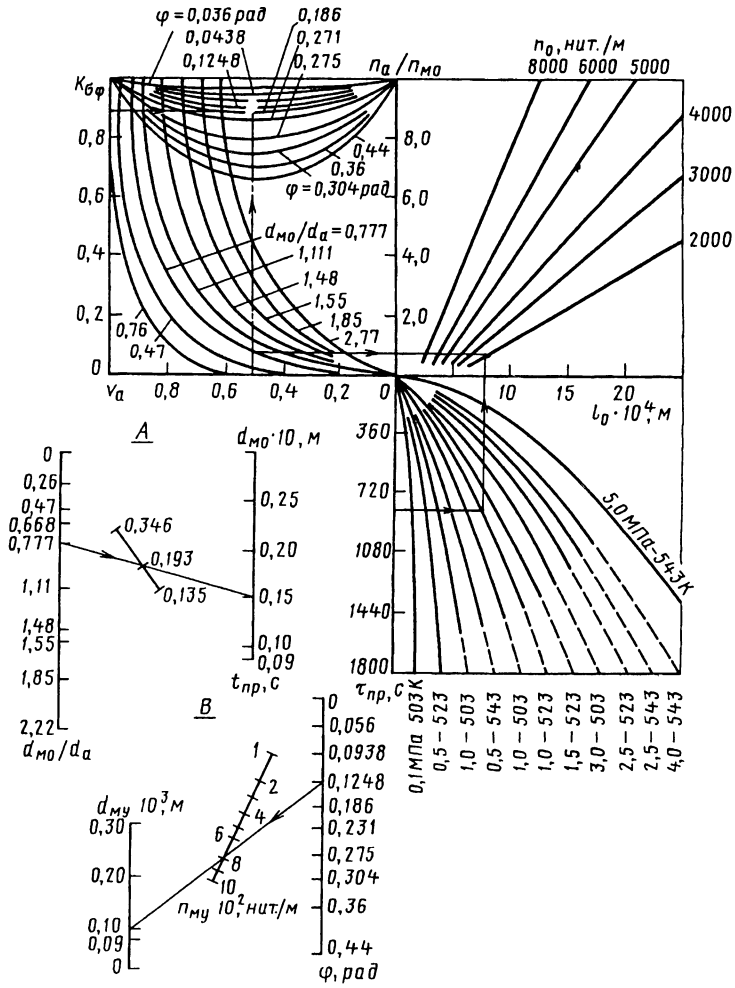


Рис. 1.3.3. Номограмма для определения конструкционных параметров ТП по заданным эксплуатационным характеристикам композитов и технологическим параметрам обработки

нитей – основный и уточный. Причем последний более технологичен, поскольку позволяет упростить процесс набора основы, снизить трудоемкость этой ручной операции, заменив ее механизированной операцией прокладывания утка. Прочность при растяжении ТП в 1,2 раза выше в случае размещения армирующих нитей по основе, чем по утку. Это объясняется различным натяжением нитей при ткачестве. Конструктивные особенности и свойства оптимизированных тканых полуфабрикатов типа ТОПАФ и ТОПАСВМ представлены в табл. 1.3.10.

На основе этих ТП изготовлены пластики ПАП-Ф и ПАП-СВМ (пластики армированные полиамидные соответственно фенилоновые и СВМ). Образцы пластиков получены прессованием при $T = 250 \pm 5$ °С, $p = 1 \ldots 2$ МПа, $t = 5 \ldots 10$ мин/мм толщины. Как следует из табл. 1.3.11, прочность при растяжении образцов пластика ПАП-Ф, полученных из различных вариантов полуфабриката ТОПАФ, колеблется от 126 до 296 МПа, значения модуля упругости – от 5449 до 7999 МПа; у образцов ПАП-СВМ соответственно $\sigma^+ = 720 \ldots 806$ МПа и $E^+ = 40\,700 \ldots 45\,000$ МПа, а рост коэффициентов реализации составил 1,2 – 1,5 раза. Эти данные подтверждают высокую эффективность способов изготовления тканых полуфабрикатов ТКМ различного состава.

1.3.10. Конструктивные особенности и свойства оптимизированных ТП ТОПАФ и ТОПАСВМ

Марка ТП	Нити		Плотность укладки по утку, нит/см	Соотношение нитей в утке, $n_а \cdot n_м$	Объемная доля армирующих нитей, %	Масса 1 м^2, г	Разрушающая нагрузка полоски ткани (50 мм), Н	
	Основа	Уток					по основе	по утку
ТОПАФ-9	к – 0,2 мм (58 текс)	ф – 29 текс, к – 0,2 мм (58 текс)	ф – 24, к – 16	1,5	32,7	140	354	2660
ТОПАФ-12	к – 0,2 мм (50 текс)	ф – 29 текс, к – 0,09 мм (11 текс)	ф – 30, к – 30	1,0	57,1	155	231	2118
ТОПАФ-13	к – 0,2 мм (50 текс)	ф – 29 текс, к – 0,2 мм (50 текс)	ф – 30, к – 30	1,0	29,4	265	189	4400
ТОПАФ-14	к – 0,13 мм (40 текс)	ф – 29 текс, к – 0,2 мм (50 текс)	ф – 30, к – 10	3,0	54,2	175	152	2214
ТОПАФ-17	к – 0,13 мм (36 текс)	ф – 29 текс, к – 0,09 мм (7 текс)	ф – 32,5, к – 32,5	1,0	67,3	137	296	2148
ТОПАСВМ-7	к – 0,12 мм (11 текс)	СВМ – 29,4 текс, к – 0,12 мм	СВМ – 26, к – 26	1,0	51,4	180	176	8350
ТОПАСВМ-8	к – 0,12 мм (34 текс)	СВМ – 29,4 текс, к – 0,09 мм	СВМ – 31,5, к – 31,5	1,0	67,1	143	220	9200
ТОПАСВМ-9	к – 0,12 мм (34 текс)	СВМ – 29,4 текс, к – 0,12 мм (34 текс)	СВМ – 32, к – 32	1,0	62,3	165	300	7610

Примечания · 1 Принятые сокращения: ф – нить фениловая, к – мононить капроновая, СВМ – нить СВМ.
2. Плотность укладки по основе во всех вариантах одинакова и составляет 4 нит/см.

1.3.11. Коэффициенты реализации прочности и модуля упругости армирующих волокон в органопластиках ПАП-Ф и ПАП-СВМ на основе оптимизированных ТП

Марка ТП, параметры армирующих нитей, МПа	ТП			ПКМ			Коэффициенты реализации механических свойств армирующих волокон			
	φ_1, φ_2, рад	φ_3, рад	$d_{мо} \cdot 10^3$, м	$\sigma^+_{эксп}$, МПа	$E^+_{эксп}$, МПа	$V_п$, %	K_σ	K_E	$K_{\sigma\,эксп} / K_{\sigma_р}$	$K_{E\,эксп} / K_{E_р}$
ТОПАФ-9 $\sigma_р = 550$, $E_р = 14\,000$	0,0628	0,188	0,303	154,8	5589,0	2,2	0,865	0,9	0,994	1,18
ТОПАФ-12 $\sigma_р = 530$, $E_р = 12\,000$	0,0476	0,1746	0,281	250,3	7126,0	3,13	0,85	0,915	0,973	1,07
ТОПАФ-13 $\sigma_р = 530$, $E_р = 12\,000$	0,0663	0,1746	0,281	126,0	5449,0	1,32	0,907	0,927	0,891	1,39
ТОПАФ-14 $\sigma_р = 530$, $E_р = 12\,000$	0,0448	0,1563	0,251	254,0	6635,0	3,07	0,865	0,929	1,02	1,026
ТОПАФ-17 $\sigma_р = 530$, $E_р = 12\,000$	0,0212	0,1489	0,239	296,0	7900,0	2,8	0,863	0,944	0,961	0,995
ТОПАСВМ-7 $\sigma_р = 2100$, $E_р = 105\,000$	0,035	0,0845	0,135	733,6	45 000,0	2,0	0,762	0,838	0,964	0,986
ТОПАСВМ-8 $\sigma_р = 2100$, $E_р = 105\,000$	0,0304	0,1446	0,232	806,0	45 800,0	3,1	0,587	0,671	0,975	0,964
ТОПАСВМ-9 $\sigma_р = 2100$, $E_р = 105\,000$	0,0315	0,1446	0,232	720,0	40 700,0	2,4	0,591	0,657	0,931	0,94

Примечание. Крутка армирующих нитей во всех вариантах равна 100 кр/м.

Действительно, расчетный метод позволяет определять проектную структуру ТП не только органопластиков, но и стекло- и углепластиков. Все они характеризуются высокой технологичностью – имеют неограниченный срок хранения, легко раскраиваются на заготовки, пригодны как для выкладки, так и для намотки. Однако в последнем случае эффективность по сравнению с намоточными ТП несколько ниже.

1.3.4. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТКМ

Неэффективность для ТКМ технологий в том виде, как они были разработаны и применяются при переработке отверждающихся КМ, достаточно убедительно проявляется уже начиная с формирования заготовок деталей выкладкой или намоткой. Общими причинами являются принципиальные различия технологических свойств и различия в видах исходного сырья и полуфабрикатов.

Формирование заготовок деталей выкладкой препрегов и полуфабрикатов ТКМ затруднено, прежде всего, из-за отсутствия липкости при нормальной температуре. Кроме того, препреги ТКМ отличаются чрезвычайно низкой деформативностью, почти лишающей их драпировочных возможностей, особенно при выкладке пакетов по поверхностям со сложной конфигурацией. Это обстоятельство преодолевается как конструкторскими, так и технологическими мерами. Например, при конструировании выкладочных оправок необходимо предусматривать плавные переходы с радиусами кривизны не менее 10 мм. Типичными технологическими мерами являются более детальный раскрой листовых препрегов на криволинейных участках (вырезы, вставки, надрезы и т.п.) и сборка пакетов из предварительно формованных слоев препрега. Оба этих решения повышают трудоемкость процесса выкладки, но в последнем варианте требуется также организация самостоятельной технологической операции формования послойных заготовок со всеми дополнительными материально-техническими затратами.

Тканые полуфабрикаты ТКМ, изготовляемые по волоконной технологии, обладают достаточно хорошей драпируемостью, но недостаток в том, что образованный ими пакет заготовки в 4 – 5 раз может превосходить толщину стенки детали. Это чревато опасностью нарушить заданную в заготовке схему армирования, тем самым снизить коэффициент реализации свойств армирующих волокон и ухудшить качество внешней поверхности детали. Исключить перечисленные последствия удается сочетанием различных приемов сборки пакета заготовки, что позволяет уменьшить ее толщину. В частности, практикуется послойное уплотнение полуфабрикатов специальными прикаточными термонагревателями. Например, при выкладке слоев тканого полуфабриката ТОФК, состоящего из армирующих фенилоновых и матричных поликапроамидных нитей (50 : 50), уплотнение осуществляется при 420...450 °С в течение 10...12 с. При этом одновременно решается и задача послойной фиксации слоев заготовки, которая из-за отсутствия липкости в иных случаях обеспечивается с помощью липких лент, контактных быстродействующих клеев или точечной сварки в расплаве.

Возможность "горячего" наращивания пакетов ("приформовки" слоев) при формировании заготовок до заданной толщины получила свое развитие и за рубежом, но для изготовления плоских или малоизогнутых деталей из ТКМ. Так, фирмой ICI разработан технологический процесс изготовления длинных прямых деталей с постоянным сечением (стрингеров, нервюр, швеллеров) с помощью валков. В ином случае последовательного наращивания слоев изделия достигают прессованием с прогревом в специальной термокамере в течение 30 мин, получая деталь длиной до 8 м типа лопасти воздушных винтов. В США введена линия по изготовлению листовых ТКМ, на которой производится автоматическая обработка листовых препрегов на основе ПА, ПЭТ и других термопластов, армированных тканью. После прогрева препреги подаются в горячую форму с последующим охлаждением, причем все режимы тщательно выдерживаются.

Таким образом, критическое переосмысление технологических возможностей полуфабрикатов ТКМ позволяет находить новые высокоэффективные способы изготовления деталей из ТКМ.

Этот вывод подтвердился и в отношении ***способа изготовления заготовок намоткой***. Применительно к ТКМ способ претерпел ряд изменений, которые, прежде всего, были обусловлены расширением номенклатуры исходных полуфабрикатов, т.е. помимо препрегов стали применять тканые полуфабрикаты и

непосредственно сочетаемые при намотке армирующие и матричные нити. Различное состояние получаемых заготовок дало основание для их классификации на заготовки с преднамоточной и посленамоточной пропиткой. В последнем случае пропитка совмещается с процессом формования заготовки в деталь.

Способ изготовления заготовок ***с преднамоточной пропиткой*** армирующих нитей, жгутов, ровницы или тканей, подаваемых на вращающуюся оправку в виде соответствующих препрегов, наиболее изучен и апробирован в производстве деталей из ТКМ. В результате из двух традиционных вариантов намотки ("сухой" и "мокрой") предпочтение отдано "сухому способу" как наиболее технологичному для обеспечения заданного качества заготовок по содержанию пор после пропитки препрегов.

Способ изготовления заготовок ***с посленамоточной пропиткой*** согласно названию предусматривает в качестве первой основной операции технологического процесса намотку заготовок из армирующих волокон, не пропитанных связующим. Наиболее изученным вариантом последующей пропитки является "волоконный способ", предусматривающий чередование армирующих волокон термопластичными матричными волокнами. В последние годы ведутся исследования в области пропитки намотанных заготовок мономерами и газофазным осаждением с последующей полимеризацией при формовании. Эффективность пропитки заготовок расплавами матричных волокон (низкая пористость) достигается при формовании деталей под давлением прессованием, термокомпрессией и другими способами.

Намотка заготовок непосредственно волокнами, минуя изготовление препрегов и тканых полуфабрикатов, представляется более эффективной, поскольку характеризуется комплексом технических, эксплуатационных и технологических преимуществ. Среди технологических преимуществ следует отметить более высокую податливость элементарных волокон по сравнению с препрегами, допустимые радиусы изгиба которых не позволяют осуществлять намотку на оправки с острыми углами, например, на плоские оправки. При этом раздельная укладка армирующих и матричных волокнистых элементов (моноволокон, комплексных нитей или жгутов) оставляет возможность оперативного изменения объемного соотношения фаз ТКМ в зависимости от требований к свойствам деталей.

Независимая намотка армирующих волокон создает также благоприятную возможность для более равномерного и сильного натяжения (до 40...50 % разрушающего напряжения комплексных нитей или жгутов), необходимого для компенсации того ослабления первоначального натяга, которое наблюдается при плавлении матричных волокон. В противном случае возможно сползание армирующих волокон и, как следствие, нарушение заданной схемы армирования, искажение анизотропии и снижение свойств ТКМ в изделии.

Дополнительное противодействие проявлению этих факторов оказывает роликовая прикатка волокнистых заготовок во время намотки. Прикатка горячим роликом, уплотняя структуру заготовки за счет перепрофилирования матричных (трансверсально податливых) волокон, фиксирует схему армирования и сокращает свободное пространство волоконной заготовки, тем самым эффективно снижается пористость (иногда менее 1 %) в готовой детали.

Для волоконной намотки характерна высокая скорость (в среднем 15...20 м/мин), причем производительность может быть многократно увеличена использованием тканых полуфабрикатов с заданным составом и текстурой распределения армирующих и матричных нитей, учитывающей требования по сокращению путей течения расплава связующего. Наконец, важным технологическим преимуществом является снижение материалоемкости производства деталей из ТКМ, поскольку отсутствуют отходы и потери, характерные для производства препрегов. Экономии материалов способствует и тот факт, что волокна при этом не подвергаются интенсивному термомеханическому воздействию, сохраняя в заготовке исходный уровень физико-механических свойств и потому обеспечивая более высокую эксплуатационную надежность готовым деталям. В частности, это выражается в повышении коэффициентов реализации прочности, например, армирующих полиарамидных волокон, на 5...10 % и модуля упругости – на 1...3 % вследствие того, что при намотке под действием натяжения увеличивается степень молекулярной ориентации волокнообразующих полимеров.

Рассмотренные технологические и эксплуатационные преимущества намотки заготовок волокнами обусловливают и экономическое преимущество. В полной мере они проявв-

ляются с учетом энергетических и капитальных затрат на выполнение заключительной операции – формования деталей из волоконных заготовок. Однако еще большая экономия достигается при отказе от формирования заготовок как самостоятельной операции. На этом основании при намотке, как и при выкладке, в связи с тем, что монолитизация заготовок из ТКМ не сопровождается процессом отверждения и потому не требуется дополнительной специальной операции для этого, наблюдается тенденция к совмещению операций технологического процесса – формованию деталей непосредственно из препрегов и полуфабрикатов ТКМ.

1.3.5. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТКМ

Специфика технологических свойств ТКМ, армированных непрерывными волокнами, обусловила существенную коррекцию перечня стандартных способов формования изделий из КМ. Практически не применяются такие способы, как автоклавное формование, формование пропиткой волокнистых заготовок под давлением и в вакууме. И, наоборот, вошли в практику способы формования деталей, которые были ранее либо невозможны для отверждающихся КМ, либо имели другое назначение. Одновременно и универсальные способы формования при использовании их для обработки ТКМ изменили пределы своих возможностей, и потребовалась методическая и техническая модификация.

1.3.5.1. МОДИФИКАЦИИ СТАНДАРТНЫХ СПОСОБОВ ФОРМОВАНИЯ

Для обработки ТКМ нашли применение прессование, термокомпрессионное формование и пултрузия.

Прессование деталей из ТКМ – типичный пример способа формования, который не только изменился по техническому оснащению и технологическим режимам управления, но и значительно расширил возможности для реализации свойств ТКМ в деталях.

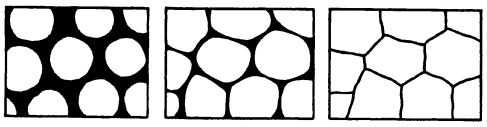
Так, повышенные температуры обработки ТКМ (в 1,5 – 2 раза) обусловили не только установку более мощных электронагревателей, но и изготовление формующих частей пресс-форм из жаростойкой коррозионно-стойкой стали, способной длительно работать при температурах не менее 300 °С и давлениях до 2,5 МПа. При этом материал пресс-форм должен выдерживать циклические смены температур в связи с необходимостью интенсивного охлаждения ТКМ в конце каждого периода формования для извлечения готовых деталей. Одновременно в конструкции пресс-форм должны быть предусмотрены малоинерционные нагреватели и система охладительных водоподающих каналов.

Хотя общий цикл прессования деталей из ТКМ в десятки раз короче, чем при обработке отверждающихся КМ, необходимо более многоступенчатое регулирование температурно-напряженных условий. Необходимость в этом обусловлена рядом объективных факторов – закладкой слоистых заготовок из ТКМ в холодную пресс-форму, изначальной жесткостью (низкой податливаемостью) препрегов ТКМ, низкой теплопроводностью тканых полуфабрикатов ТКМ, необходимостью извлекать готовые детали только после перевода связующего в стеклообразное или хотя бы в эластичное состояние и др.

Примером многоступенчатого технологического режима формования изделий из ТКМ может служить регламент для поликапроамидного углепластика марки УПА-6 с $V_a = 0{,}6$: размещение пакета материала в холодной пресс-форме; уплотнение пакета под давлением, равным 0,1...0,2 МПа; подъем температуры в формующей полости пресс-формы до 250 °С; повышение давления до 0,5...1,0 МПа с выдержкой для осадки; повышение давления до 1,0...2,0 МПа; технологическая выдержка из расчета 4...5 мин/мм; охлаждение под давлением до 30 °С; извлечение готового изделия.

Формующие поверхности пресс-форм обрабатывают смазкой К-21 с последующей термообработкой через каждые 4 – 5 запрессовок.

Возможность при прессовании варьировать давление в большом диапазоне значений расширило применимость этого способа формования за пределы обработки ТКМ с обычными объемами армирования (до $V_a = 0{,}5...0{,}65$). Прессование стало применяться для обработки высоко- и предельно армированных органопластиков, у которых армирующие органические волокна (полиарамидные, полиэфирные и др.) характеризуются высокой трансверсальной податливостью, позволяющей при сжатии их деформировать в заготовках ТКМ и менять профиль поперечного сечения так, чтобы достигалась более компактная укладка (рис. 1.3.4), увеличивая V_a до 1,0 при соответствующем изменении физико-механических свойств.



а) *б*) *в*)

Рис. 1.3.4. Типичные схемы распределения армирующей фазы в оргаиопластиках различного типа:
а – нормально армированных ($V_а$ = 0,50 ÷ 0,65);
б – высокоармированных ($V_а$ = 0,85 ÷ 0,95);
в – предельно армированных ($V_а$ = 1,0)

Оптимальными становятся те режимы прессования, при которых одновременно проходят и успевают завершиться процессы перепрофилирования волокон и монолитизации их в составе ТКМ. В высокоармированных органопластиках монолитизация достигается с помощью связующего, вводимого в волокнистый наполнитель однократным окунанием в количестве 8...10 % (об.) и распределяемого по объему при равномерном сжатии прессуемого пакета. В предельно армированных органопластиках тот же эффект достигается с полностью перепрофилированными волокнами с помощью сварки в расплаве или химической сварки. В последнем случае сварка осуществляется с участием предварительно наносимого на поверхность волокон "присадочного реагента" в виде низкомолекулярных бифункциональных соединений типа диангидридов органических кислот, пероксидов и др. Их подбор зависит от химического состава и реакционной способности волокнообразующих полимеров (табл. 1.3.12).

Как следует из табл. 1.3.12, уровень давления при прессовании для одного и того же вида армирующего волокна зависит прежде всего от заданной величины $V_а$ (степени перепрофилирования и, следовательно, трансверсальной деформации волокон), а температура и продолжительность выдержки (без учета времени для охлаждения готовых изделий) – от кинетики процессов монолитизации ТКМ.

Термокомпрессионное формование. Формование деталей под давлением терморасширяющихся эластичных элементов в жестких ограниченных оболочках призвано повысить рентабельность производства крупногабаритных деталей по сравнению с автоклавным формованием и обеспечить бóльшую надежность со снижением брака по сравнению с формованием эластичными мембранами.

Основной проблемой термокомпрессионного формования для изготовления деталей из ТКМ является высокая температура обработки. Как правило, она превышает 200 °С и может достигать 300 °С и более (см. табл. 1.3.5).

Из серийно выпускаемых в России эластомеров, пригодных для применения в качестве формующих элементов, только резины на основе силоксановых каучуков обладают свойствами, удовлетворяющими технологическим требованиям по теплостойкости, долговечности и величине температурного коэффициента линейного расширения. Варьируя составы резин, на их основе удается обеспечивать необходимые значения температурного коэффициента линейного расширения, заданной теплопроводности и высокой стабильности размеров при многократном использовании. Так, если при температурах до 200 °С удовлетворительное качество эластичных формующих элементов (ЭФЭ) обеспечивается резиной на основе силиконового каучука СКТВ-1, то дальнейшее повышение теплостойкости обеспечивается специальными видами ее обработки.

1.3.12. Технологические режимы прессования деталей из органопластиков различного типа

Тип органопластика	Состав		$V_а$	Режимы прессования			Трансверсальная деформация волокон, %
	Волокно	Матрица		T, °С	p, МПа	t, мин/мм	
Нормально армированный	СВМ	ПКА	0,54	230	1,5	1,0	0
Высоко-армированный	СВМ	ПФО	0,92	243	7,4	2,0	9,2
Предельно армированный	СВМ	Сварка в расплаве	1,0	280	15,0	5,0	> 12,0
	ПФО (ММ = 100 тыс)	Химическая сварка	1,0	210	32,0	5,0	

В результате удается перерабатывать в детали современные тканые полуфабрикаты с матричными волокнами из различных волокнообразующих термопластов (полиолефинов, полиамидов, полиэфиров). Например, ТКМ, в которых матрица образуется расплавом капроновых волокон, а армирующая фаза состоит из нитей СВМ, терлон или фенилон, формуются при температуре 250 °С, давлении 1,0 МПа и времени выдержки 10 мин/мм толщины изделия.

Использование термокомпрессионного способа позволило изготовлять равнотолщинные детали с качественно отформованными вертикальными и наклонными стенками. Уровень физико-механических характеристик ТКМ с типичными объемами армирования на 15...20 % выше, чем при прессовании, благодаря более равномерному распределению давления в формуемой заготовке, передаваемого от ЭФЭ. Способ получит дальнейшее развитие по мере совершенствования возможностей ЭФЭ в соответствии с растущими требованиями со стороны современных ТКМ.

Прецеденты такого совершенствования уже известны. В частности, специалистами фирмы United Technologies Chemical Systems Division (США) разработан новый вариант термоформования деталей из ТКМ, названный Therm-x (SM). Отличие состоит в том, что вместо ЭФЭ из монолитной резины использован свободно перемещающийся порошок из силиконового эластомера. По мнению разработчиков, применение подвижного порошка исключает появление градиентов избыточного давления. При этом заготовка детали для защиты поверхности от механического контакта с рабочей средой обертывается пленкой. Режим нагрева регулируется с помощью компьютерной программы. Фирма имеет опыт обработки углепластиков на основе ПЭЭК, поскольку максимально допустимая температура формования может достигать 816 °С. Диаметр формующей камеры равен 5,1 м, а возможное давление 20 700 кПа.

Формование пултрузией. Пултрузионный способ переработки ТКМ претерпевает едва ли не наиболее радикальные изменения, обусловленные отличием технологических свойств этих КМ от отверждающихся, вовлечением в обработку высокотемпературных и тугоплавких линейных полимеров, увеличением объемов и разнообразием схем армирования термопластов. Стремление к достижению новых качественных показателей нередко обусловливает ужесточение режимов пултрузии ТКМ, например, максимальный уровень давления вырос с 1,7 до 8,8 МПа, температура вслед за температурами плавления термопластичных связующих – со 160 до 400 °С, но при этом и производительность процесса увеличилась на порядок по сравнению с переработкой реактопластов, достигнув 10 м/мин.

Пултрузией изготовляют до 40 % мирового производства деталей из ТКМ, поэтому в совершенствование и модернизацию этого способа формования вовлечен большой круг различных специалистов. За последние 15 лет ими определен перечень основных задач материаловедческого, технологического и конструкторского плана. Изыскания в материаловедческом направлении показали, что применение традиционных нитей, жгутов, лент, тканей в качестве исходных армирующих материалов не позволяет полностью использовать преимущества пултрузии, поэтому возникла потребность в разработке специальных полуфабрикатов, проектируемых под конкретный тип профильных деталей. Однако высокая вязкость расплавов термопластов затрудняет пропитку таких профильных полуфабрикатов по всему сечению.

Попыткой избежать отмеченных недостатков явилось применение "волоконной технологии". При этом для исключения существенного недостатка комплексных жгутов, образуемых системой матричных и армирующих нитей с увеличенным размером по отношению к сечению формующей фильеры, предусматривается возможность предварительного (перед фильерой) уплотнения жгутов благодаря трансверсальной податливости термопластичных матричных волокон. Другим направлением реализации возможностей "волоконной технологии" является применение гибких нитей из тугоплавких полимеров для фиксации схемы армирования, осуществляемой обмоткой или сшивкой жгутов (пакетов).

Технологическое направление развития пултрузии ТКМ основано на учете того факта, что процесс, непрерывно совершаемый в различных зонах установки, разделен в пространстве. Отсюда предопределенность и взаимозависимость параметров каждой зоны, причем общим показателем для всех зон формования обычно принимается скорость движения материала, определяемая скоростью пропитки.

Стремление увеличить эту скорость обусловливает необходимость увеличивать длину зоны пропитки, а это ведет к росту сопротивления движению пакета в фильере и повышению тянущего усилия. Отсюда преимущество волоконных полуфабрикатов, сформированных по принципу сокращения путей течения расплава матричных волокон. Установлено, что в волоконных полуфабрикатах, предназначенных для обработки пултрузией, необходим избыток термопластичных волокон до 5...15 % расчетного содержания, а взаимообусловленные температуры отдельных зон фильеры должны устанавливаться в соответствии с данными табл. 1.3.13.

Производительность пултрузии волоконных полуфабрикатов ТКМ находится в пределах 0,1...1,5 м/мин для типовых профилей общепринятых размеров. Тянущий узел должен создавать усилие в зависимости от состава ТКМ и размеров сечения в диапазоне 250... 100 000 Н.

Конструкторское направление развития технологии пултрузии обусловлено результатами материаловедческих и технологических изысканий. Конструкторская модификация установок, обусловленная технологической спецификой ТКМ, коснулась практически всех узлов, начиная с пропиточной ванны, необходимость в которой для твердофазно совмещенных полуфабрикатов исчезает. Однако обычно модификациям подвержены элементы формующего узла, поскольку приходится учитывать резко возрастающие температуры формования (см. табл. 1.3.13), эрозионный и коррозионный износ. Перепады температур в сотни градусов на длине в несколько миллиметров приводят к сложному напряженно-деформированному состоянию конструкции головки и относительному поперечному смещению элементов формующего канала, который может достигать в длину 1,0 м и более, поскольку только охлаждающая (калибрующая) зона иногда достигает 0,5 м.

Из мировой практики известно, что конструкторская отработка формующих узлов для пултрузии ПКМ из-за многообразных и нередко противоречивых требований является весьма трудоемкой и дорогостоящей (2...5 тыс. долларов США). А в тех случаях, когда головки укомплектованы сменными узлами нагрева и охлаждения, устройствами регулирования натяжения и тепловых режимов по зонам, цена возрастает до 8...12 тыс. долларов США. Однако это обстоятельство из-за постоянно увеличивающейся потребности в профильных деталях из ТКМ не останавливает дальнейшее применение и совершенствование данного способа формования.

1.3.5.2. НОВЫЕ СПОСОБЫ ФОРМОВАНИЯ

Высокая технологичность ТКМ позволяет постоянно создавать новые способы формования изделий, причем не только преобразуя для этого некоторые способы формирования заготовок, но и заимствуя наиболее прогрессивные способы металлообработки.

Формование намоткой. Намотка, созданная и традиционно применяемая для формирования заготовок из ПКМ, стала еще одним эффективным способом формования деталей из ТКМ. При этом используется "сухая" намотка, осуществляемая по двум вариантам – препрегами и твердофазным сочетанием матричных и армирующих элементов (волокно –

1.3.13. Влияние вида термопластичного связующего ТКМ на температуры в граничных зонах пултрузионной фильеры

Полимер матричного волокна	Рекомендуемые температуры на границах зон фильеры, °С				
	$T_{\text{входа}}$	$T_{\text{I–II}}$	$T_{\text{II–III}}$	$T_{\text{III–IV}}$	$T_{\text{на выходе}}$
ПП	120	215	230	210	60
ПКА	120	250	260	225	70
ПЭТ	150	250	270	200	120
ПСу	180	300	310	285	130
ПЭЭК	250	400	425	360	180

Примечание. $T_{\text{I–II}}$, $T_{\text{II–III}}$, $T_{\text{III–IV}}$ – температуры на границах зон фильеры пултрудера

волокно, пленка–волокно). Во всех случаях используются стандартные намоточные установки, дополненные вспомогательными узлами (нагревательными устройствами, шпулярниками и др.).

При формовании изделий *намоткой препрегами* задача сводится к соединению плотно прилегающих слоев в монолитный ТКМ. Разогрев препрега в местах, отмеченных на схеме рис. 1.3.5, осуществляется практически всеми известными видами нагрева, включая лазерный. Однако наиболее доступным и простым в конструктивно-технологическом отношении остается газовый теплоноситель, обычно воздух. Температура в зоне *в* должна быть достаточной для кратковременного завершения процесса сварки в расплаве. Например, при монолитизации препрегов с составом стеклонить–полипропилен температура в зоне сварки достигает 250 °С (при температуре плавления ПП 160 °С), а в зоне *с* – 100...120 °С. Этот режим, поддерживаемый горячим воздухом с температурой 400 °С, обеспечивает скорость намотки v, равную 0,3 м/мин.

Более интенсивный теплоотвод позволяет резко ускорить процесс намотки, в частности при использовании CO_2-лазера, до 5...7 м/мин, а с помощью газовой горелки – до 10 м/мин, причем при предварительном прогреве препрега (зона *а*) – даже до 30 м/мин. Давление p при этом со стороны прикаточного ролика *5* варьировалось в диапазоне 5...12 МПа. Аналогичная скорость достигнута и при намотке препрегов на основе полисульфона и ПЭЭК. Однако отмечается, что интенсификация намотки препрегами оказывает отрицательное влияние на качество ТКМ. Пористость кольцевых образцов колеблется от 6 до 10 % (при исходной пористости препрега в 2 – 3 раза ниже), а прочность снижается в 1,2 – 1,5 раза.

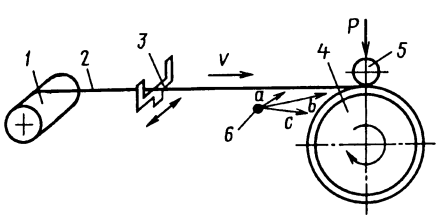


Рис. 1.3.5. Обобщенная схема намотки препрегов ТКМ:
1 – бобина, *2* – препрег; *3* – приспособление для укладки, *4* – оправка, *5* – прикаточный ролик; *6* – источник нагрева препрега предварительно (*а*), в зоне сварки (*в*) и нижних слоев (*с*)

Среди других недостатков намотки деталей препрегами отмечается, что из-за нестационарности теплового режима намотки затруднено регулирование процесса кристаллизации термопластов, таких, как ПЭЭК или ПА, поэтому необходим повторный нагрев уже намотанных деталей (термообработка) с регулируемым режимом последующего охлаждения ТКМ. Однако результатом становится дальнейшее снижение производительности, увеличение технологического цикла и, как следствие, рост себестоимости продукции.

При формовании деталей *намоткой полуфабрикатами* с твердофазным совмещением компонентов ТКМ наилучшие результаты достигнуты при одновременной намотке заданно чередуемых матричных и армирующих волокон. При этом одновременно выполняются две задачи – пропитка армирующей фазы и монолитизация ТКМ в изделии, благодаря чему совмещенный процесс формования (рис. 1.3.6) получил название "одностадийной намотки".

Скорость намотки $v_н$ обусловлена допустимой пористостью ТКМ, т.е. скоростью пропитки, достигаемой при выбранных температурно-напряженных параметрах режима формования. К температурным параметрам относятся температура горячей струи воздуха $T_а$, температура $T_ф$ фиксирующего *8* и $T_п$ прикаточного *9* роликов, создающих давление $p_ф$ и $p_п$. К параметрам давления относится также сила натяжения N комплексной ровницы *5*. Численные значения этих параметров зависят от состава ТКМ. Например, установлены технологические параметры одностадийной намотки изделий из поликапроамидного стекло-

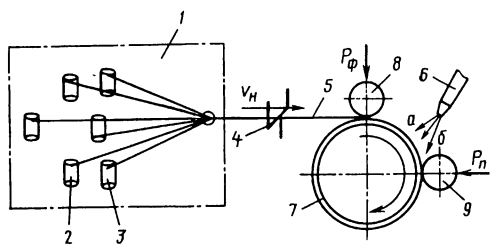


Рис. 1.3.6. Принципиальная схема одностадийной намотки:
1 – шпулярник; *2* – бобина с матричным волокном, *3* – бобина с армирующими нитями; *4* – раскладчик, *5* – волокнистый полуфабрикат (комплексная ровница), *6* – воздушный нагреватель, *7* – теплоизолированная оправка, *8* – фиксирующий ролик, *9* – прикаточный ролик

пластика ($v_а$ = 0,52): $v_н$ = 0,26 м/мин, N = 10 Н, $T_ф$ = 210 °С, $T_п$ = 350 °С, $T_в$ = 500 °С, $p_ф$ = = 150 Н, $p_п$ = 600 Н.

Аэродинамическая обработка армирующих волокон непосредственно перед прикаточным роликом *9* позволяет добиться эффективной очистки их поверхности от замасливателя и других адсорбентов, способствуя эффективному смачиванию расплавом связующего и образованию низкопористого ТКМ (объем пор 3 %), что наряду с сокращением общего периода нагрева обеспечивает повышение (по сравнению с аналогичными ТКМ из препрегов) прочности при растяжении и изгибе на 20...30 %, модуля упругости на 15 %, плотности на 5...6 %.

По технико-экономическим показателям намотка комплексной ровницей превосходит намотку препрегами – по трудоемкости в среднем на 20 %, по себестоимости выполнения операции в 2 – 3 раза.

Формование деталей из листовых заготовок ТКМ. Способ формования деталей из листовых материалов, широко применяющийся в металлообработке и в производстве деталей из полимерных материалов (ПМ), в том числе из дисперсно армированных ПМ, до недавнего времени был недоступен для непрерывно армированных ТКМ. В настоящее время разработаны различные варианты реализации этого способа. При этом листовые заготовки из ТКМ существуют в трех вариантах по степени монолитности: полностью уплотненные (беспористые), частично уплотненные и неуплотненные пакеты из нескольких слоев полуфабриката, уложенных по заданной схеме армирования для последующего уплотнения во время термоформования.

Из многочисленных способов и вариантов переработки термопластичных листовых заготовок для ТКМ наибольшее применение нашла штамповка, а среди промышленных способов нагрева заготовок – радиационный нагрев. Длина волны инфракрасного излучения нагревательными панелями зависит от типа термопластичной матрицы. Для предотвращения ее термоокислительной деструкции возможно использование среды инертного газа. Перемещение листового материала и готовых деталей полностью автоматизируется, поэтому полный цикл завершается менее чем за 1 мин.

Наиболее высокая производительность формования и лучшее качество деталей достигаются при использовании монолитных листовых заготовок, изготовляемых по "волоконной технологии" из тканей с петельной структурой и в которых армирующие нити находятся в избыточно извитом состоянии, а матрица, образованная плавкими волокнами, обеспечивает вязкую деформативность при формовании (табл. 1.3.14).

Наличие большого количества извитых армирующих волокон предопределяет принципиальное отличие температурных условий переработки листовых заготовок. Опасность нарушения целостности заготовок, отделения волокон от матрицы при их распрямлении не позволяет осуществлять переработку при температурах эластического состояния термопластичной матрицы, поэтому необходимо переводить ее в начальную фазу вязкотекучего состояния. В результате процесс переработки не сопровождается ни ломкой армирующих волокон, ни разрывами матрицы, а степень вытяжки зависит от возможностей заготовки, задаваемых еще при ткачестве "волоконного" полуфабриката, по высоте и ширине петель армирующих нитей. В частности, листовые заготовки, отпрессованные из тканей (см. табл. 1.3.14) при 260 °С под давлением 1,5 МПа в течение 15 мин, удается качественно переработать, например, вакуумным способом при 250 °С со скоростью вытяжки 0,01 м/с и при выдержке в форме до 3 мин.

1.3.14. Типичные характеристики петельных тканей с матричными и армирующими нитями

Нити в основе		Нити в утке	Плотность ткани, нить/см		Высота петли, мм	Ширина петли, мм	Степень извитости, %
петельная	корневая		основа	уток			
Терлон*	Капрон**	Капрон	40	5	3...3,5	5	50
Терлон*	Капрон**	Капрон	40	5	4...4,5	5	100
Терлон*	Капрон**	Капрон	40	5	5,5...6	5	100

* Терлоновые нити с линейной плотностью 29,6 текс (ТУ 6-06-31-531–86).

** Капроновые нити с линейной плотностью 33,3 текс (ТУ 6-06-583–77).

При серийной штамповке с применением жестких и эластичных пуансонов достигнуты более высокие результаты. Например, в зарубежной автомобильной промышленности при циклах продолжительностью 1 мин и менее уже достигнута производительность до 1000 деталей в сутки.

1.3.5.3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТКМ

Магнитно-импульсное формование. МИФ – высокоэнергетический способ, при котором запасенная конденсаторами энергия при разряде расходуется на полезную механическую работу по деформированию технологического элемента, монолитизацию препрега, а часть – на нагрев материалов и рассеяние. Известно применение МИФ для изготовления труб из ТКМ. Технологический процесс состоит из операций изготовления полуфабриката, его намотки на оправку, нагрева заготовки до температуры вязкотекучего состояния связующего и формования в индукторе магнитно-импульсной установки (МИУ).

Перспективным препрегом считается тканый полуфабрикат марки ТОФК-1 (ТУ 596-176–83), наматываемый на алюминиевую оправку с разделительной фторопластовой пленкой. Угол намотки 55° при уплотнении пакета на 15...17 %. На заготовку надевается продольно разрезанная резиновая труба толщиной 1 мм, позволяющая равномерно распределить давление формования и обеспечить гладкую поверхность детали. Подготовка пакета-заготовки завершается намоткой с нахлестом двойным слоем алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм.

Пакет нагревают в термошкафу до 250... 270 °С и помещают в индуктор МИУ. При разряде батареи конденсаторов на индуктор алюминиевая фольга деформируется, создавая давление формования, например, 180... 190 МПа при удельной запасенной энергии $(1,1...1,2) \cdot 10^9$ Дж/м^3. Этого давления достаточно, чтобы обеспечить полную пропитку армирующей фазы расплавом термопласта вязкостью до 750 Па · с.

Способ МИФ для труб из ТКМ имеет ряд преимуществ по производительности, энергоемкости, номенклатуре типоразмеров (табл. 1.3.15), а также по возможности механизации и автоматизации производства.

Аналогичная эффективность достижима и при изготовлении других элементов техники.

Вакуумное формование в эластичной оболочке. Перспективность ВФЭО непрерывно армированных ТКМ обусловлена необходимостью производства из них средне- и крупногабаритных сложноконтурных деталей, недоступных или нерентабельных для прессования, термокомпрессионного и других промышленно освоенных способов формования. Однако реализация известных преимуществ ВФЭО (простота технического оснащения, сравнительно небольшие капитальные вложения, низкие энерго- и трудозатраты) при обработке ТКМ становится проблематичной. Для этого существует комплекс причин, важнейшими из которых являются:

сложность пропитки волокон высоковязкими расплавами термопластов;

нелипкость, жесткость и нередко большая объемность полуфабрикатов;

1.3.15. Сравнительные технико-экономические показатели МИФ труб из ТКМ

Показатели способов формования	Технологический способ		
	МИФ	автоклавный	прессовый
Продолжительность формования труб длиной 1 м, ч	1,12*	2,15	4,25
Расход электроэнергии на формование 1 м трубы, кВт · ч	5,32**	12,72	10,5
Предпочтительный диаметр трубы, мм	10...200	100...250	10...100
Максимальная длина трубы, м	Нет предела	6,0	1,0

* При ВЧ-нагреве 0,25 ч/м, а при непрерывном производстве 0,033...0,066 ч/м.

** При ВЧ-нагреве 2,5 кВт · ч/м.

неблагоприятные теплофизические свойства немонолитизированных заготовок, затрудняющие прогрев и увеличивающие продолжительность формования;

повышенные температуры обработки (в среднем 250...340 °С), сужающие выбор материалов для эластичных оболочек (мешков, диафрагм) и резко сокращающие их эксплуатационный ресурс.

Попытки преодолеть эти проблемы связаны в первую очередь с рациональным выбором полуфабрикатов для формирования заготовок. Из многочисленных современных вариантов принципиально различные возможности дают предварительно монолитизированные и "волоконные" полуфабрикаты. Причем первые из них апробированы в двух различных исполнениях – эквидистантно отражающих форму детали и плоско-листовых. Во всех случаях пропитка и допустимая пористость ТКМ обеспечиваются еще на стадии их формования – обычно прессованием.

Листовые полуфабрикаты, воспроизводящие конфигурацию детали (или части ее поверхности), собирают в пакеты, и полученные таким образом заготовки подвергают ВФЭО. Режимы формования зависят от состава ТКМ и толщины пакета (числа слоев). Например, при восьми слоях листовых полуфабрикатов полисульфоновых ТКМ ВФЭО осуществляется при 315 °С в течение 30 мин. При этом тепловая энергия затрачивается в основном только на проведение сварки в расплаве по поверхности прилегания полуфабрикатов ТКМ.

Плоско-листовые полуфабрикаты приобретают нужную конфигурацию непосредственно в процессе ВФЭО. Таким образом, сварка в расплаве должна предворяться по существу листовой штамповкой по режимам, рассмотренным в п. 5.2.2 с поправкой на ограниченное давление (< 0,1 МПа). К тому же ВФЭО листовых полуфабрикатов ТКМ препятствуют неоднородность прогрева и загрязнение поверхности. При этом считается, что полуфабрикаты на основе жгутов и ровингов пригодны для деталей плоской формы или имеющих поверхность одинарной кривизны. Листовые полуфабрикаты на основе тканей целесообразнее использовать для деталей изогнутой формы.

Формирование заготовок из "*волоконных*" *полуфабрикатов* (тканых и нетканых) лишает ВФЭО части недостатков, присущих монолитным листовым заготовкам, – сокращает число операций технологического процесса и связанные с этим материально-технические, финансовые и трудовые затраты. Расширяется номенклатура деталей благодаря лучшей драпируемости полуфабрикатов, способных выкладываться по более сложным поверхностям.

Однако осложняется проблема совмещения компонентов ТКМ. Кроме того, толщина заготовок превосходит номинальную толщину детали в 4 – 5 раз, что чревато искажением заданной схемы армирования, снижением коэффициентов реализации механических свойств армирующих волокон, а также получением некачественной внешней поверхности детали.

Для исключения этих недостатков разработаны специальные способы сборки заготовок. Например, перед формованием заготовки на оправке закрепляют тонкую сетку из матричного термопласта. Она повторяет объемный контур оправки. Затем последовательно укладывают слои волоконного полуфабриката, фиксируя их относительно сетки и друг друга точечной сваркой в расплаве. Одновременно осуществляется послойное уплотнение прикаткой с помощью специально разработанных нагревательных устройств, обеспечивающих температуру до 420...450 °С в течение 10... 12 с. Результатом является резкое уменьшение толщины заготовки, снижение ее пористости, сокращение протяженности течения расплава матричных волокон и, как следствие, повышение производительности ВФЭО и улучшение качества готовых деталей.

Примером применения ВФЭО "волоконных" полуфабрикатов может служить производство протезно-ортопедических деталей, изготовляемых индивидуально, а потому требуется дешевая разовая оснастка. Например, при изготовлении приемной гильзы протеза бедра в качестве оснастки использовали гипсовую позитивную форму, а эластичные мешки изготовляли из прорезиненной стеклоткани АТОМ-2 с использованием герметика ВГО-1. На сетку из поликапроамидной ленты, фиксируя точечной сваркой, наносили три слоя заготовок из органопластика марки ПАП-СВМ в виде нетканого полотна (НП), сшивая их встык капроновой леской. Каждый последующий слой НП перекрывал стыки предыдущего слоя. Одновременно размещали конструктивные закладные элементы.

ВФЭО собранного пакета заготовки осуществляли в термошкафу при температуре

250 ±5 °С в течение 25...30 мин и остаточном давлении не ниже 90 кПа. Съем отформованных приемных гильз осуществляли разрушением гипсовой формы.

Формование осадкой. Данный технологический способ, широко применяемый при обработке металлов и не известный в обработке армированных пластиков, стал доступен для формования деталей переменного сечения из ТКМ благодаря высокой податливости термопластичных матриц выше температуры стеклования. Новый способ формования осуществляется в соответствии со схемой (рис. 1.3.7).

Заготовка *1*, однонаправленно или извито армированная при изготовлении пултрузией или прессованием, устанавливается в полость формующего инструмента *2* с вертикальной плоскостью разъема. Процесс формования начинается сразу после нагрева заготовки до вязкотекучего состояния термопластичной матрицы, для чего пуансон *3* сжимает заготовку. В результате осевого воздействия непрерывные армирующие волокна заготовки теряют продольную устойчивость и заходят в боковые неровности внутренней полости формы (нарезку резьбы, углубления, поднутрения и т.п.), повторяя их контур. Достигнутая схема армирования детали фиксируется переводом связующего снова в стеклообразное состояние под давлением с помощью системы охлаждения *4*.

Преимущество формования осадкой по сравнению, например, с литьем под давлением, которое тоже позволяет получать сложноконтурные изделия, но из дискретно армированных ТКМ, состоит в возможности создавать непрерывно армирующие фазы в изделиях с соответственно более высокими физико-механическими характеристиками. По этой причине способ оказался востребованным в производстве резьбовых крепежных элементов

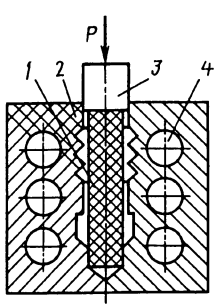


Рис. 1.3.7. Схема формования деталей из ТКМ осадкой заготовки в замкнутой форме

(винтов, шурупов, шпилек) в тех областях применения, в которых ТКМ наиболее приоритетны, в частности, при эндопротезировании.

Расчет осадки заготовки осуществляется по формуле:

$$\Delta L = \frac{l_1 d_1^2 + l_2 d_2^2 + l_3 d_3^2}{d_{заг}^2} + (l_1 + l_2 + l_3),$$

где ΔL – осадка; l_1 – длина резьбовой части; d_1 – средний диаметр резьбы; l_2, d_2 – длина и диаметр гладкой части; l_3, d_3 – высота и диаметр широкой части, например головки крепежного элемента; $d_{заг}$ – диаметр заготовки.

Результаты механических испытаний отформованных продольной осадкой винтов для остеосинтеза показали превышение свойств по сравнению с литьевыми аналогами из ТКМ: по прочности при растяжении – в 3 раза, при трехточечном изгибе – в 2,5 раза, по разрушающему крутящему моменту – в 1,7 раза, по прочности при срезе резьбы – в 1,2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Армированные** пластики / В.А. Бунаков, Г.С. Головкин, Г.П. Машинская и др.; Под ред. Г.С. Головкина, В.И.Семенова. М.: МАИ, 1997. 404 с.

2. **Виноградов В.М.. Головкин Г.С., Горохович А.И. и др.** Технология производства препрегов для ПКМ. Уфа: УГАТУ, 1995. 92 с.

3. **Волоконная** технология переработки ТКМ / Г.С. Головкин, В.А. Гончаренко, В.П. Дмитренко и др.; Под ред. Г.С. Головкина. М.: МАИ, 1993. 232 с.

4. **Головкин Г.С., Павловский Д.В.** Производство и переработка непрерывно армированных термопластов намоткой (обзор) // Пластические массы. 1997. № 3. С. 42 – 48.

5. **Головкин Г.С., Дмитренко В.П.** Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов. М.: РУСАКИ, 2005. 472 с.

6. **Устинов В.А.** Новые достижения в технологии переработки композиционных материалов на термопластичной полимерной матрице в изделиях аэрокосмической техники // Транспорт: наука, техника, управление: Сб. обзор. информации. ВИНИТИ, 1995. № 2. С. 50 – 54.

7. **Харченко Е.Ф.** Высокопрочные предельно армированные органопластики. М.: НТЦ "Информтехника", 1999. 196 с.

8. **Boyce G.** Thermoplastics threaten GRP with clean, cheap process // Reinforced Plastics. 1994. № 7/8. P. 7.

9. **Chang J.Y.** Thermoplastic Matrix Continuous Filament Composites of Kevlar Aramid or Graphite Fiber // Composites Science and Technology. 1985. V. 24, № 5. P. 61 – 79.

10. **Harper R.C.** Thermoforming of thermoplastic matrix composites // SAMPE Journal. 1992. № 2. P. 9 – 17; № 3. P. 9 – 17.

Глава 1.4

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРМИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И СЛОЖНЫХ СТРУКТУР ИЗ НИХ

1.4.1. ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

В композиционных материалах высокопрочные волокна воспринимают основные напряжения, возникающие при действии внешних нагрузок, и обеспечивают жесткость и прочность в направлении ориентации волокон. При этом армирующие волокна должны удовлетворять комплексу эксплуатационных и технологических требований. К первым, помимо прочности, жесткости, относятся плотность, стабильность в определенном температурном интервале, химическая стойкость, ко вторым – технологичность волокон, определяющая возможность высокопроизводительных процессов изготовления силовых каркасов и изделий на их основе. Армирующие волокна применяются в виде моноволокон, а также в составе нитей, жгутов, сеток, тканей, лент, холстов. Короткие волокна – в виде порошков, штапельных тканей, матов и т.п.

Форма волокнистых армирующих элементов определяется природой волокон, способом их получения и дальнейшей текстильной переработкой, а также процессами получения композитов и изделий из них.

Свойства композитов зависят не только от свойств волокон и матрицы, но и от способа армирования. Различают следующие основные способы: хаотическое армирование короткими волокнами, армирование параллельными слоями непрерывных волокон, армирование тканями, пространственное армирование.

В качестве армирующего наполнителя в композиционных материалах с матрицей из синтетических смол применяют стеклянные, органические, углеродные и борные волокна (табл. 1.4.1), а также базальтовые, сапфировые волокна, волокна на основе карбида кремния, полиэтиленовые волокна. Для композитов на основе металлической матрицы используют проволоку из стали, вольфрама, бериллия, титана, ниобия и других металлов. Металлические и стеклянные волокна рассматриваются как однородные и изотропные. Армирующие волокна могут иметь и неоднородную структуру и обладать анизотропией механических характеристик. К волокнам с ярко выраженной анизотропией относятся органические, арамидные, углеродные и борные волокна.

Нити характеризуются длиной (непрерывные, дискретные), числом сложений и круткой, т.е. числом продольных витков на 1 м длины.

Толщина нитей зависит от толщины или диаметра волокон. Эти показатели в производстве принято измерять в линейных единицах, в то время как в производстве волокон – обычно в тексах.

Текс – мера толщины T волокна, или масса 1000 м волокна в граммах, или линейная плотность, г/км: $T = m / L$.

Толщина в номерной системе характеризуется длиной нити в 1 г массы, м/г: $N = L / m$.

Стеклянные волокна. Известно два вида стеклянных волокон (стекловолокон): непрерывные и штапельные. Для первого характерны неограниченно большая длина, прямолинейность и, как правило, параллельное расположение волокон в нити; для второго – небольшая длина, извитость и хаотическое расположение в пространстве.

Наиболее часто применяют волокна, имеющие форму сплошного круглого цилиндра. Стекловолокна другой формы, например, полые, называют профилированными. К профилированным стеклянным волокнам относят волокна с формой поперечного сечения в виде треугольника, квадрата, шестигранника, волокна лентовидной и других форм с гладкой и гофрированной поверхностью.

Существуют три основных способа получения стекловолокна: 1) вытягивание волокон из расплавленной массы через фильеры; 2) вытягивание волокон из стеклянных штабиков при их разогреве; 3) получение волокон расчленением струй стекломассы под воздействием центробежных сил или потоков воздуха, газа, пара.

1.4.1. Сравнительная характеристика волокон

Свойства	Волокно			
	стеклянное	борное	углеродное	арамидное
Механические:				
удельная прочность	Высокая	Высокая	Средняя	Очень высокая
удельный модуль	Низкая	Высокий	Очень высокий	Средний
сопротивление удару	Отличное	Удовлетворительное	Плохое	Отличное
удлинение при разрыве	Высокое	Низкое	Среднее	Среднее
стабильность	Отличная	Отличная	Средняя	Отличная
Теплофизические:				
теплопроводность	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая
температурный коэффициент линейного расширения	Средний	Средний	Очень низкий	Очень низкий
демпфирующая способность	Высокая	Удовлетворительная	Хорошая	Отличная
Производственно-технологические:				
наименьший радиус изгиба	Малый	Очень большой	Малый	Малый
чувствительность к повреждениям при переработке	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
переработка в ленты и ткани	Хорошая	Плохая	Хорошая	Хорошая
Стоимость	Очень низкая	Высокая	Умеренная	Умеренная

Двумя первыми способами изготовляют непрерывные волокна, а третьим – штапельные. Полые стеклянные волокна получают протягиванием расплавленной стекломассы через круглые фильеры при подаче воздуха под давлением в сопло, расположенное внутри фильеры.

Профилированные стекловолокна с поперечным сечением сложной формы изготовляют вытягиванием заготовки с поперечным сечением такой же формы, как у фильеры.

Основой для производства стекловолокон является аморфное стекло, представляющее смесь оксидов SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO ... (всего до 12). При получении волокна элементарной нити диаметром 3...19 мкм путем вытяжки из расплава через платиновые фильеры осуществляется быстрое охлаждение стекла и фиксируется высокотемпературное аморфное состояние (технологически обеспечивается рыхлое аморфное состояние). Для обеспечения высокого модуля волокон в расплав вводится MgO и исключается содержание оксида бора. Сырьевая база для производства волокон практически не ограничена, поэтому во многих странах оно производится сотнями тысяч тонн в год.

В зависимости от состава стекломассы волокна вырабатываются из стекла следующих типов: "бесщелочного" алюмоборосили-

катного (Б); магнезиально-алюмосиликатного (БС-Т-273А); безборного среднещелочного силикатного (7А); кремнеземного с содержанием SiO_2 не менее 94 % (II).

Непрерывная одиночная нить является первичной нитью, полученной в результате вытягивания пряди элементарных нитей (волокон) из фильер стеклоплавильного сосуда. Она используется для текстильной переработки в крученые комплексные нити, ровинги и тканые материалы. Поверхность непрерывных стекловолокон непосредственно после их вытягивания из фильер покрывается замасливателем, который соединяет волокна в нить, предотвращает их истирание, защищает от разрушения во время текстильной переработки, препятствует накоплению зарядов статического электричества при трении. Для обеспечения дальнейшей переработки одиночные нити выпускают как на текстильном, так и на прямых замасливателях. В качестве текстильного замасливателя широко используется парафиновая эмульсия, а в качестве прямого замасливателя – сложные системы, содержащие специальные добавки – аппреты, которые способствуют созданию адгезионной связи на границе раздела полимер–стекло.

Органические волокна. В высокопрочных и высокомодульных органопластиках применяют волокна на основе ароматических полиамидов (арамидов). Для получения арамидных волокон используют низкоконцентрированные растворы полимеров с высокой молекулярной массой ($4 \cdot 10^4$). Раствор волокнообразующего полимера продавливают через фильеры диаметром 50...500 мкм. После этого удаляется растворитель из свежесформованных волокон, проводится подсушка и последующая термообработка по непрерывному или периодическому способу.

Высокопрочные волокна подвергают дополнительной термовытяжке, в процессе которой происходит увеличение модуля упругости на 15...20 %.

Арамидные волокна обладают уникальными свойствами: высокой прочностью при растяжении и высоким модулем упругости, термостабильностью, хорошими усталостными и диэлектрическими свойствами, незначительной ползучестью. Благодаря низкой плотности арамидные волокна по удельной прочности превосходят все известные в настоящее время армирующие волокна и металлические наполнители, уступая по значению удельного модуля упругости углеродным и борным волокнам. Арамидные волокна отличаются хорошей способностью к текстильной переработке, сохраняя после ткачества 90 % исходной прочности нитей, что позволяет использовать их в виде самых различных тканых армирующих материалов.

Большой интерес для создания теплостойких высокомодульных органопластиков представляют полипарабензобистиазольные (ПБТ) или полифенилбензобисоксазольные (ПБО) волокна, модуль упругости которых достигает 300...400 ГПа, а прочность 4,2 ГПа.

Полибензобистиазольные волокна получают из 5...6 % растворов полимера в полифосфорной кислоте. Как и в случае арамидных волокон, растворы ПБК перерабатывают путем продавливания раствора через фильеры и затем через воздушную прослойку, протягивают в охлаждаемой осадительной ванне с растворителем. После этого волокна подвергают тепловой обработке в атмосфере азота под натяжением.

Самые легкие волокна – волокна из полиэтилена, обладают упругопрочностными свойствами на уровне арамидных при плотности 0,97 г/см^3. Основой для получения таких волокон является высокомолекулярный полиэтилен. Растворы высокомолекулярного полиэтилена в декумиле, парафине или других растворителях формуют в волокна фильерным способом, подвергают осаждению в осадительной ванне, многократной термовытяжке при температуре 120...160 °С.

Углеродные волокна. По ряду показателей углеродные волокна обладают уникальными физическими свойствами. Им присущи высокие механические характеристики, теплостойкость, стойкость к атмосферным воздействиям и химическим реагентам, различные электрофизические свойства (от полупроводниковых до проводниковых).

Углеродные волокна, применяемые для армирования конструкционных материалов, условно делят на две группы: высокомодульные (E = 300...700 ГПа; σ_x^f = 2...2,5 ГПа) и высокопрочные (E = 200...250 ГПа; σ_x^f = = 2...2,5 ГПа).

Углеродные волокна различают по типу исходного сырья (на основе полиакрилонитрильных или гидратцеллюлозных волокон), текстильному ассортименту (нити, шнуры), условиям получения (углеродные, графито-

вые), свойствам (высокопрочные, высокомодульные) и др.

Кроме полиакрилонитрильных и гидратцеллюлозных волокон практическое применение в качестве исходного сырья для получения углеродных волокон нашли нефтяные пеки. Текстильный ассортимент углеволокнистых материалов достаточно широк. В зависимости от условий применения их выпускают в виде непрерывных нитей, жгутов, шнуров, штапельного волокна, лент, тканей (часто комбинированных с органическими или стеклянными волокнами), нетканых материалов (войлока, матов) и пр.

В качестве исходного продукта во всех случаях производства таких волокон применяют волокна, которые получают либо с использованием известных технологических процессов (вискозное, полиакрилонитрильное), либо с помощью специально разработанных процессов формования из пеков, природных или синтетических смол. Основные требования к исходному сырью – это неплавкость волокон в условиях пиролиза и способность приобретать при термообработке необходимый комплекс свойств.

Процесс термообработки проводится в строго контролируемых условиях, к которым относится прежде всего скорость подъема температуры, которая должна обеспечить протекание химических реакций в твердой фазе внутри каждого элементарного волокна без его разрушения. В процессе высокотемпературной обработки осуществляется переход от органического к углеродному волокну, при этом происходят сложные процессы ароматизации углерода и формирования структуры углеродного волокна. Обработка осуществляется в вакууме или в инертной среде (азоте, аргоне, гелии). Изменяя конечную температуру и диапазоны температур (1000...3273 К) термообработки, осуществляют управление свойствами волокон.

Пек как исходное сырье для получения волокон выгодно отличается от полиакрилонитрильных и гидратцеллюлозных волокон высоким содержанием углерода (до 95 %) и соответственно большим выходом готового волокна (до 90 %). Исходные пеки должны обладать способностью к образованию из расплава волокна, которое путем соответствующей обработки можно перевести в неплавкое и нерастворимое состояние. Углеродные волокна на основе пеков имеют невысокие упругопрочностные показатели (прочность 0,5... 1,3 ГПа, модуль упругости 30...80 ГПа).

Получение из пеков волокон с высокими упругопрочностными характеристиками связано со способностью расплава пеков при термообработке в контролируемых условиях (10...20 ч при 600...700 К) переходить в жидкокристаллическое состояние с образованием упорядоченных участков структуры, называемой мезофазой. Полученные таким образом волокна обладают способностью при нагреве до сравнительно невысоких температур (около 1800 К) подвергаться графитизации и характеризуются высокими значениями прочности и модуля упругости.

Борные волокна. Использование борных волокон в композиционных материалах позволяет достигать высокого уровня прочностных, усталостных характеристик и модуля упругости.

Наиболее широко распространена технология получения борных волокон на основе количественного осаждения бора из газовой фазы в реакторе, в который подается смесь водорода H_2 и трихлорида бора BCl_3.

Волокна изготовляют в виде непрерывных анизотропных моноволокон, неоднородных по структуре, диаметром до 200 мкм путем химического осаждения бора при температуре 1400 К на вольфрамовые нити диаметром 12 мкм. После осаждения образуется сердцевина из боридов вольфрама ($WB_1W_2B_5$) диаметром 15...17 мкм, вокруг которой располагается слой поликристаллического бора.

С целью повышения жаростойкости борных волокон их покрывают карбидом кремния, осажденным из парогазовой фазы в среде аргона и водорода. Такие волокна называют борсиком.

Борные волокна выпускают в виде моноволокон или тканых лент шириной до 50 см, основа которых образована борными, а уток – полиамидными или другими волокнами.

Борные волокна обладают большей по сравнению с другими армирующими волокнами сдвиговой жесткостью (модуль сдвига 180 ГПа). Прочность борных волокон обладает заметным статическим разбросом – 17...36 %.

Использование в композите борных волокон приводит к понижению тепло- и электропроводности благодаря их полупроводниковым свойствам.

Волокна бора используются в производстве композитов с алюминиевыми и полимер-

ными матрицами, причем композиты с алюминиевой матрицей имеют ряд преимуществ, так как могут работать при температуре до 640 К и перерабатываются на обычном технологическом оборудовании, используемом в металлургической промышленности.

Волокна из карбида кремния изготовляют как на вольфрамовой, так и на углеродной подложках. Благодаря физико-механическим свойствам волокна этого типа обычно применяют в металлокомпозитах при эксплуатации в условиях длительного воздействия высоких температур.

Получение волокна из SiC во многом аналогично получению борного волокна, но вместо треххлористого бора в реактор аналогичного устройства подают смесь алкилсиланов с водородом. Процесс получения волокон SiC на углеродную подложку более экономичен (почти в 2 раза меньше расход осаждаемого газа и скорость получения волокон выше скорости получения борного волокна). Карбидокремниевые волокна на углеродной подложке более дешевые, но имеют пониженные прочностные характеристики и повышенную чувствительность к поверхностным дефектам. Это обусловлено тем, что волокна имеют мелкозернистое строение, углеродный сердечник слабо связан со слоем карбида кремния и остаточные напряжения в поверхностном слое меньше, чем в карбидокремниевых волокнах на вольфрамовой подложке.

Металлические волокна. Для конструкционных композитов наиболее эффективными и экономичными в некоторых случаях являются металлические проволочные волокна. Так, для композитов, предназначенных для работы при пониженных температурах, используют стальные и бериллиевые волокна, а при высоких температурах – вольфрамовые и молибденовые.

Проволочные волокна из стали являются наиболее доступными. Широкое применение нашли для изготовления тонкой высокопрочной проволоки коррозионно-стойкие стали с метастабильным в условиях холодной деформации аустенитом. Значительное упрочнение стальной проволоки достигается благодаря превращению аустенита в мартенсит при оптимальных технологических режимах изготовления в сочетании с наклепом при холодном деформировании. Дополнительное упрочнение возможно в результате отпуска проволоки. Понижение прочности стальных проволок происходит в результате выдержки при температуре 650...670 К.

Для эксплуатации композитов при высоких температурах наиболее приемлемы вольфрамовые волокна. Повышение высокотемпературной прочности вольфрамовых волокон достигается введением в вольфрам и его сплавы тугоплавких дисперсных частиц (карбидных и др.).

Увеличение длительной прочности обеспечивается нанесением тонких (до 12 мкм) барьерных покрытий, причем наиболее эффективным является покрытие HfC, которое позволяет избежать рекристаллизации вольфрамовых волокон при температуре 1400 К в течение 1000 ч.

В сравнении с вольфрамовыми молибденовые волокна несколько уступают по прочностным и упругим характеристикам, а также по жаростойкости.

Коротковолокнистая арматура разнообразных видов используется в качестве наполнителя для пластмасс различных типов.

Измельченные минеральные волокна получают при механической переработке минеральной ваты, в состав которой входят силикатный кальций (75 %) и легкие металлы (25 %), до образования легкосыпучего порошка, состоящего из коротких волокон длиной до 270 мм и диаметром 1...10 мкм.

Измельченные минеральные волокна можно использовать в качестве наполнителей пластмасс, термопластов и реактопластов.

Волокна "франклин" получают в результате кристаллизации сульфата кальция в водной среде при повышенных давлении и температуре. Эти волокна представляют собой белый блестящий порошок, состоящий из монокристаллов длиной 80 мкм и диаметром 2 мкм. Волокна "франклин" химически стабильны, обладают низкой растворимостью в воде, имеют высокую термостойкость и хорошие теплоизоляционные свойства.

Волокна "франклин" применяются как наполнитель пластмасс, а также в качестве усиливающего наполнителя для алюминия.

Волокна "файбекс" представляют собой монокристаллы неорганического титана, которые получают перекристаллизацией солей из расплавов. Эти волокна имеют повышенные значения прочности и модуля упругости и используются в качестве усиливающего наполнителя пластмасс.

Нитевидные кристаллы (усы) представляют собой монокристаллы, выращенные в специальных условиях. Усы имеют механическую прочность, эквивалентную прочности связи между атомами, что обеспечивается бездефектностью структуры нитевидных монокристаллов.

Усы обладают одновременно преимуществами стеклянных и борных волокон: их предельное удлинение – как у стеклянного волокна (3...4 %), а модуль упругости – как у борных волокон (более 500 ГПа). При этом разрушающее напряжение при растяжении усов в 5 – 10 раз больше, чем у стеклянных и борных волокон.

Тканые армирующие материалы на основе высокопрочных волокон, используемых при изготовлении композитов, классифицируют по типу материала волокон и типу переплетения, например, стеклоорганоуглеткани или комбинированные органостекло- и другие ткани, а также ткани полотняные, ситцевые, сатиновые, саржевые, трикотажные.

В промышленности используют ткани, имеющие различные типы переплетения. Наиболее простым и широко применяемым является полотняное переплетение, в котором каждая нить основы и утка проходит поочередно сверху и снизу пересекающихся нитей.

Сатиновым называют переплетение, при котором каждая нить проходит поочередно сверху, а затем снизу пересекающей ее нити. Более сложный тип переплетения – саржевое, при котором нити основы и утка проходят поочередно сверху и снизу двух и четырех пересекающих их нитей.

Необходимая анизотропия механических характеристик достигается путем варьирования соотношения волокон в основе и утке ткани. Ткань изготовляется на ткацком станке переплетением двух взаимно перпендикулярных систем нитей пряжи – основных и уточных. Основные нити (основа) располагаются по длине куска ткани, а уточные (уток) – по ширине, от кромки к кромке.

Основные технические характеристики ткани следующие: волокнистый состав, вид переплетения, способ отделки, ширина, толщина, масса 1 $м^2$, число нитей основы и утка на единицу длины (плотность ткани), разрывная нагрузка и растяжимость (удлинение) при разрыве.

Ткацким переплетением называют порядок последовательного перекрытия на лицевой стороне ткани нитей основы нитями утка.

В некоторых случаях применяют трехмерный тип переплетения.

В отечественной промышленности наиболее широко распространены ткани на основе стеклянных, органических и углеродных волокон. Выпускаемые стеклоткани различаются составом стекла, характеристиками нитей, типом переплетения, толщиной, прочностью, плотностью укладки волокон и другими показателями.

Органоткани отличаются достаточно высокой термостойкостью, обладают малой усадкой по сравнению с тканями на основе других типов волокон.

Тканые слоистые органопластики обладают по сравнению со стеклопластиками более высокими прочностными и жесткостными характеристиками.

Отличительная особенность тканей из углеродных волокон – их высокая термостойкость, жесткость и прочность. Для их изготовления применяют различные типы переплетений. Углеродные ткани в композиционных материалах используют в виде кордовых тканей (однонаправленных лент), полотняного, сатинового, трехмерного сечения и др.

1.4.2. ФОРМИРОВАНИЕ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

При изготовлении композиционных материалов и конструкций из них важнейшее место занимают процессы формирования силовой основы каркаса композита, структура которого определяется направлением действий главных напряжений для каждой конкретной конструкции и типом применяемого материала.

В современных конструкциях используются каркасы, образованные из слоев, армированных параллельными непрерывными волокнами, с хаотическим и пространственным армированием. Широко используются композиты, в которых структура каркаса образована пространственным переплетением нитей и жгутов, и композиты со стержневым армированием (свойства их определяются свойствами стержней, изготовленных из прямолинейных нитей и жгутов). На рис. 1.4.1 и рис. 1.4.2 представлены различные виды армирующих каркасов в композиционных материалах.

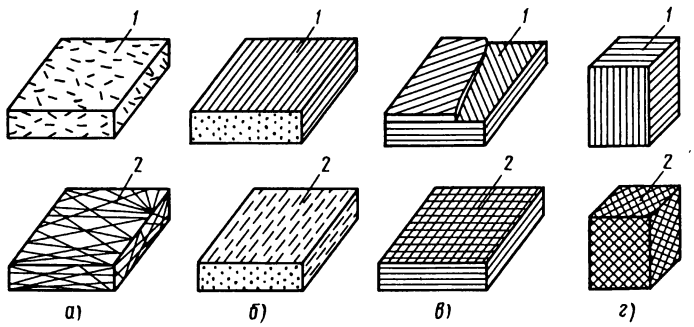


Рис. 1.4.1. Виды армирования в композиционных материалах:
а – хаотическое. *1* – короткие волокна, *2* – непрерывные волокна,
б – одномерное: *1* – однонаправленные непрерывные; *2* – однонаправленные короткие,
в – двумерное: *1* – непрерывные нити, *2* – ткани,
г – пространственное· *1* – три семейства нитей; *2* – *n* семейств нитей

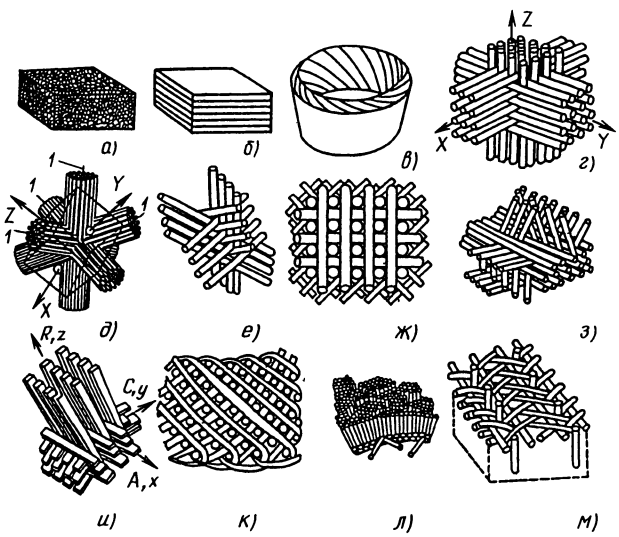


Рис. 1.4.2. Структуры армированных углерод-углеродных материалов:
а – хаотичная, *б* – слоистая; *в* – розеточная; *г* – ортогональная типа 3Д, *д* – для 4Д, *е* – то же, для 44Д-Л, *ж* – то же, для 5Д-Л; *з* – то же, для 5Д, *и* – аксиально-радиально-окружная; *к* – аксиально-спиральная; *л* – радиально-спиральная, *м* – аксиально-радиально-спиральная

Наиболее перспективным видом армирования углерод-углеродных, углерод-карбидных и некоторых других материалов конструктивного назначения является многонаправленное пространственное армирование, когда армирующие компоненты располагаются в трех, четырех направлениях и более. Такие образования называют пространственными армирующими структурами (ПАС), а составляющие их компоненты – элементами пространственных армирующих структур (ЭПАС).

Для изготовления каркасов используются технологические методы намотки и выкладки, сшивки, ручного и автоматизированного плетения, ткачества. Кроме того, каркасы могут собираться из заранее отформованных и отвержденных стержней.

Основным структурным элементом ПАС из прямолинейных ЭПАС является параллелепипед, у которого три ребра, шесть диагоналей граней и четыре длинных внутренних диагонали образуют тринадцать направлений. Если

параллелепипед является кубом, то, комбинируя направления трех подгрупп, можно образовать уравновешенные (сбалансированные) системы. Всего существует семь хорошо сбалансированных систем, изотропия которых растет с увеличением числа направлений: типы 3Д, 4Д, 7Д (4 + 3), 9Д (6 + 3), 10Д (6 + 4), 13Д (6 + 4 + 3). Основные характеристики некоторых ПАС приведены в табл. 1.4.2.

Для армирования теплонапряженных толстостенных деталей из углерод-углерода практическое применение нашли ПАС типов 3Д и 4Д. При этом наиболее перспективным считается тип 4Д, который имеет преимущества не только перед типом 3Д, но и перед типом 6Д и выше, так как, будучи более изотропными, последние в то же время сложны и трудны в изготовлении, а также имеют меньшее содержание волокон в сечении, чем типы 3Д и 4Д.

В структуре типа 5Д пять направлений в параллелепипеде определяются длинными диагоналями и одним из трех ребер. Практически это – основной пучок волокон, заключенный в структуру типа 4Д. Эта структура имеет те же преимущества, что и структура типа 4Д. Аналогично структуре типа 3Д у нее осевая симметрия четвертого порядка относительно основного направления, что упрощает теоретические расчеты механических и теплофизических свойств изделий.

Если необходимо усиление в двух направлениях, то используют тип 6Д, который отличается от ранее рассмотренного тем, что два основных пучка ориентированы под углом 90° в одной плоскости по ребрам куба и связаны четырьмя более тонкими пучками, размещенными по типу 4Д.

В зависимости от выбранного метода изготовления изделия из композиционных материалов каркас конструкции может формироваться как самостоятельный узел в этапе технологического процесса изготовления с последующей пропиткой или насыщением, а также в едином процессе формования изделия одновременно с заполнением матричным материалов.

Технологические процессы изготовления изделий из стекло-, угле-, органопластиков с пропиткой под давлением, практически все процессы изготовления конструкций из углерод-углеродных материалов, отдельные процессы формования изделий из металлокомпозитов содержат самостоятельный этап изготовления каркаса будущей конструкции.

При обычном контактно-вакуумном формовании, сухой и мокрой намотке деталей из полимерных материалов, прессовании металлокомпозитов каркас конструкции создается в едином процессе изготовления деталей. Соответственно этому рассматривать процессы создания армирующей основы методом прошивки, намотки, плетения, прямолинейного армирования стержнями и оборудование для этих процессов следует с точки зрения технологии изготовления деталей.

1.4.2. Характеристика сбалансированных ПАС типов 3Д, 4Д, 6Д конструкций из пучков волокон круглого сечения

Характеристика	3Д	4Д	6Д
Размещение пучков волокон	Квадратная сетка	В шахматном порядке	В шахматном порядке
Углы между пучками стержней	2 × 90°	3 × 70,5°	1 × 90°; 3 × 60°
Компактность, %	59	68	49,4
Изотропия	Слабая	Хорошая	Близкая к совершенству

1.4.3. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРКАСОВ

Выкладка. В общем виде технологический процесс изготовления тканых каркасов включает: подготовку основных и вспомогательных материалов; раскрой заготовок из ткани; выкладку тканевых заготовок на формообразующую оправку; послойную сшивку тканевых заготовок; прошивку целикового каркаса вдоль образующей и в других направлениях. При этом должны быть обеспечены параметры качества каркаса и технологические параметры: требуемая толщина стенок каркаса; высокая размерная точность профиля внутренней и наружной поверхности; максимальное сохранение структуры и физико-механических характеристик исходного материала.

К технологическим параметрам относят параметры прошивки и их стабильность.

Раскрой заготовок осуществляют механическим путем (вручную или на автоматах), ультразвуковыми или лазерными резаками. Прошивку выложенных тканевых заготовок осуществляют в каждом конкретном случае на специальных швейных полуавтоматах или обычном швейном оборудовании. Например, раскройный роботизированный комплекс РРК-1600 предназначен для раскроя рулонных материалов лучом лазера по программе, передаваемой от ЭВМ по каналу связи, либо записанной на перфоленте. Комплекс состоит из установки для программного раскроя рулонных материалов ЛУРМ-1600 и автоматизированной системы подготовки информации АСПИ. Максимальный размер обрабатываемых деталей 1600 × 1600 мм, точность раскроя ±1,0 мм. Тип лазера – газовый, мощностью 800 Вт.

Прошивка предварительно выложенных заготовок осуществляется на специальном швейном полуавтомате с четырьмя швейными головками.

Разработанное оборудование и технологические процессы позволяют методом прошивки получать каркасы конструкций различных геометрических форм.

Намотка и выкладка. Принципиальная схема технологического процесса изготовления каркаса состоит из следующих этапов:

изготовление методом пултрузии стержней из углеродного наполнителя, выполняющих роль армирующих элементов каркаса в радиальном направлении;

изготовление углепластиковой оправки для намотки каркаса;

заделка стержневых элементов в отверстия на оправке;

изготовление препрега и вырезка из него заготовок для продольной выкладки;

послойная выкладка осевых элементов препрега с последующей намоткой кольцевых слоев нити.

Заготовки препрега получают намоткой углеродной нити на цилиндрическую оправку с последующей пропиткой намотанного слоя клеем.

Размеры заготовок, нарезанных из препрега, должны соответствовать размерам осевых пазов между установленными на оправке стержнями. Набор пакета осуществляется путем пооперационной выкладки заготовок препрега в осевом направлении между установленными на оправке стержнями с последующей намоткой нитью в кольцевом направлении. Количество одновременно наматываемых нитей должно соответствовать ширине кольцевых пазов между стержнями.

После набора пакета заданной толщины поверхность каркаса покрывают слоем клея типа БФ для предотвращения сползания нитей с оправки и закрепления стержней. Для изготовления каркаса применяют любые намоточные и универсальные (токарные) станки с набором специальных приспособлений. Для изготовления стержней используют пултрузионные установки различного типа.

Намотка и прошивка. Для механизированного изготовления каркасов трехмерной структуры используют комплексы установок, предназначенных для намотки модулей осей X и Y и последующей прошивки по оси Z. Технологический процесс изготовления на установке "Звезда-Н" состоит в наработке модулей путем укладки в плоскости $X - Y$ одной непрерывной нити в виде витков ломаной линии и позволяет изготовлять модули с наружным диаметром 705 мм, внутренним – 450 мм, высотой 15...20 мм.

При этом шаг, мм, составляет: по основе: по внутреннему диаметру – 2,4; по наружному диаметру – 3,76; по утку – 15.

Установка "Звезда П" предназначена для механизированной прокладки нитей по оси Z через пакет модулей, изготовленных на установке "Звезда Н". Размеры, мм, прошиваемых каркасов на установке следующие: наружный диаметр ≤ 900; внутренний диаметр ≥ 150; высота – 600.

Совмещение изготовления каркаса и намотки заготовок деталей. Известно, что процесс непрерывной намотки является одним из самых совершенных процессов изготовления высокопрочных армированных оболочек. При этом методе лента, образованная системой нитей или сформированная из тканей, пропитывается полимерным связующим и подается на вращающуюся оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия. Направления укладки лент и толщина пакета определяется расчетной схемой армирования.

Существует несколько методов формования деталей намоткой в зависимости от способа нанесения связующего на армирующую основу и обеспечения необходимого содержания в материале изделия.

При "сухом" способе намотки волокнистый армирующий материал перед формованием предварительно пропитывается в пропиточных машинах, благодаря чему обеспечивается не только качественная пропитка, но требуемое равномерное содержание связующего в препреге.

При "мокром" способе намотки пропитка армирующего материала связующим и намотка на оправку совмещены. Необходимая вязкость связующего при этом обеспечивается выбором и применением подогрева соответствующего связующего в пропиточной ванне.

По типу укладки армирующей основы в намотанном изделии различают несколько видов намотки: кольцевую, спиральную, спирально-перекрестную, продольно-поперечную, совмещенную спирально-кольцевую и др. Независимо от способа намотки технологические стадии и физико-химические процессы образования структуры композиционного материала отличаются незначительно. Технологический цикл формования деталей состоит из следующих стадий: намотки и получения заготовки изделия; нагрева заготовки на оправке до температуры стеклования связующего, а затем до температуры отверждения; выдержки-отверждения связующего при постоянной температуре; охлаждения до температуры стеклования и затем до конечной температуры; съема изделия с оправки.

Метод непрерывной намотки позволяет получить оболочки вращения сложной формы и реализовать с высокой точностью большое число схем армирования изделий при использовании самой разнообразной номенклатуры исходных армирующих материалов (нитей, жгутов, лент, тканей, всевозможных препрегов и т.д.).

Для этого метода формования изделий разработано наибольшее количество намоточного, пропиточного и термического оборудования.

Плетение и ткачество многомерных каркасов. Ручное плетение каркасов сложных структур часто используется в производстве небольших по размерам изделий или сложных изделий малыми сериями.

Технологический процесс изготовления каркасов структуры типа 3Д состоит из двух основных этапов: плетения двухмерного пакета нитей (армирование по осям X и Y); прошивки нитью по оси Z.

Приспособление для плетения представляет собой устройство с горизонтальным набором металлических стержней, закрепленных по концам в металлических решетках. Межцентровые расстояния стержней задаются расположением отверстий в решетках. Решетки закреплены в кольцах, установленных на ролики, что позволяет вращать приспособление вокруг горизонтальной оси для протягивания нитей по осям X и Y.

Процесс плетения двухмерного пакета заключается в протягивании нити в два сложения между рядами металлических стержней с помощью рапиры вдоль одной из осей. После набора полного ряда по одной оси (например, X) решетки со стрежнями поворачиваются на 90° и проводится плетение по направлению оси Y. Наработка каркаса продолжается чередованием протягивания нитей по осям X и Y. Необходимая плотность обеспечивается в процессе плетения путем уплотнения набранных рядов с помощью рапиры в соответствии с требованием технологического процесса.

По окончании плетения двухмерного каркаса решетки снимаются со стержней, и приспособление комплектуется для операции протягивания.

Протягивание осуществляется последовательным замещением металлических стержней углеродной нитью в два сложения с помощью язычковой иглы. Оплетенный каркас проходит операции гидрообработки и сушки, смысл которых заключается в придании жесткости каркасу для предотвращения его искривления при дальнейших операциях.

Ручное плетение каркасов структуры типа 4Д, имеющих три направления армирования в одной плоскости *abc* (смещены относительно друг друга на 120°) и четвертое направление *Z*, перпендикулярное к плоскости *abc*, состоит также из двух этапов: сборки горизонтальных пакетов жгутов; протяжки вертикальных жгутов.

Известны каркасы структуры типа 4ДЛ, направление нитей в которых совпадает с направлениями высот правильной четырехгранной пирамиды (типа тетраэдр). Ручное изготовление каркасов таких структур связано с большими техническими сложностями по сравнению с каркасами структуры типа 3Д. Более простыми в изготовлении являются структуры типа 4Д, в которых одно направление нитей (вертикальное), перпендикулярное к трем другим направлениям (горизонтальным), совпадает с направлением сторон равносторонних треугольника и шестиугольника. Такие каркасы называют каркасами типа призмы.

Механизированное плетение каркасов. Для механизированного плетения каркасов трехмерной ортогональной структуры разработаны различные типы и комплексы установок, которые используются при производстве деталей специальной формы и назначения. Технические сложности реализации требуемых задач, как правило, исключают возможности создания универсального оборудования для производства изделий широкой номенклатуры.

Установка УТ-ТМ-160 предназначена для механизированной наработки углеродных трехмерных текстильных заготовок с основанием в форме квадрата (диаметр вписанной окружности 160 мм), а установка УТ-ТМ-300 – для плетения таких же углеродных каркасов с основанием в форме восьмигранной призмы (диаметр вписанной окружности 300 мм). Изготовление каркасов на этих установках идет в непрерывном режиме, а их невысокая производительность зависит от возможностей разового заполнения системы нитевых шпулярников. Так, изготовление одного каркаса высотой 300 мм на установке УТ-ТМ-300 составляет 48 ч.

Для механизированного изготовления круглых каркасов трехмерной ортогональной структуры с центральным отверстием разработан комплекс УПТК-800, который состоит из установки УПТК-800Н, предназначенной для операций прокладки нитей по осям *X* и *Y*, и установки УПТК-800П, выполняющей операцию прошивки нитью по оси *Z*. На этих установках изготовляют каркасы наружным диаметром 1000 мм и внутренним – 150...170 мм, высотой 1000 мм, рабочее время изготовления одного каркаса на двух установках составляет 300 ч.

Бесприбойное ткачество цельнотканых объемно-армированных каркасов. Для изготовления каркасов трехмерных бесшовных тканых оболочек тел вращения используют методы бесприбойного ткачества на круглоткацких станках. Наиболее приемлемой структурой каркаса таких оболочек является ортогональная структура армирования, содержащая: нити основы, параллельные образующей; кольцевые нити утка; нити перевязочной основы, перпендикулярные к образующей и охватывающие нити утка по всей толщине материала.

Для наработки каркасов используют круглотканые станки диаметром 19,9 м, высотой 5,7 м типа МКТ-2500 с микропроцессорной системой управления. Потребляемая мощность 186 кВт.

Размеры изготовляемого изделия, мм:

Диаметр	1000...2500
Высота	2000
Толщина	24
Используемый наполнитель	СВ, ОВ, УВ
Число челноков	1...4
Частота вращения челноков, $мин^{-1}$	0,1...6,0
Число жаккардовых машин	12
Число шпулярников	24
Натяжение утка, Н	50...200

Работоспособность станков типа МКТ обеспечивается правильным взаимодействием исполнительных механизмов. Циклограмма положения исполнительных механизмов МКТ относительно челнока и ее параметры могут оперативно изменяться через управляемый вычислительный комплекс. Нулевое же положение циклограммы выбирается таким образом, чтобы система отсчета и стационарная систем относительно нулевой отметки стенда совпадали.

Глава 1.5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Препреги – полуфабрикаты полимерных волокнистых композиционных материалов (ПВКМ) – представляют собой организованные определенным образом структуры из армирующих волокон (нити, жгуты, ленты, шпон, ткани, маты, бумага и т.п.), совмещенные со связующим.

Из препрегов ручным или механизированным способом (выкладкой, намоткой) собирают (формируют) заготовки (пакеты) с заданной конструктором схемой ориентации волокнистого наполнителя, имеющие близкую к будущей детали конфигурацию, которые затем формуют в детали прессованием, вакуумным, пневматическим, автоклавным, термокомпрессионным методами, намоткой или пултрузией.

Применение препрегов, связанное с введением дополнительной операции и оборудования для ее осуществления, несколько увеличивает цикл и трудоемкость производства. Поэтому препреги целесообразно использовать при необходимости повышения качества и снижения колебаний массовых характеристик деталей (разброс физико-механических свойств ПВКМ).

Последнее достигается путем полного смачивания поверхности волокон, заполнения связующим межволоконного пространства и обеспечения его заданного содержания.

Выбор типа связующего, природы и структурной ориентации волокнистого наполнителя в препреге определяется условиями эксплуатации и требованиями, предъявляемыми к формуемой детали.

Технологический процесс производства препрегов включает следующие операции:

приготовление связующего;

подготовку волокнистого наполнителя и совмещение их пропиткой, смешением, послойной сборкой или плетением, ткачеством.

Совмещение компонентов полуфабрикатов ПВКМ осуществляют по жидкофазному ("мокрому") или твердофазному ("сухому") способу.

При жидкофазном способе получения препрегов связующее, имеющее консистенцию вязкой жидкости (мономер-олигомерные составы, растворы или расплавы твердых смол или полимеров), смачивает поверхность волокнистого наполнителя и заполняет межволоконное пространство.

Твердофазное совмещение компонентов предполагает равномерное распределение по объему волокнистой структуры наполнителя твердых частиц связующего. Ниже рассмотрены только методы жидкофазного получения препрегов. Методы твердофазной технологии приготовления препрегов приведены в гл. 1.3.

Жидкофазный способ получения препрегов (пропитку) подразделяют на пропитку без давления и пропитку под давлением.

В процессе пропитки без давления связующее смачивает поверхность наполнителя и проникает в межволоконное пространство под действием сил поверхностного натяжения и силы тяжести, преодолевая силы вязкого трения, оказывающие сопротивление движению связующего. Пропитку без давления осуществляют окунанием, контактным способом или напылением.

При пропитке под давлением скорость движения связующего по межволоконным капиллярам увеличивают наложением дополнительных сил (атмосферное или избыточное давление, центробежные силы, волновое давление и т.п.). К способам пропитки под давлением относят вакуумную, пневматическую и вакуум-пневматическую пропитку, центробежную и экструзионную пропитку, пропитку с наложением вибрации и пропитку смешением.

Для твердофазного совмещения компонентов применяют полимерные связующие в виде порошка, пленок или волокон (соответственно порошковая, пленочная и волоконная технология совмещения). Порошкообразные полимерные связующие совмещают с волокнистыми наполнителями смешением или напылением, пленочные – путем послойного чередования пленки связующего и листового волокнистого наполнителя (шпона, ткани, мата, бумаги) в процессе сборки пакета (заготовки) ПВКМ перед формованием изделия. Волокнистые связующие сочетают с волокнами наполнителя текстильными способами.

1.5.1. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ ЖИДКОФАЗНЫМ СПОСОБОМ

Приготовление связующих. В качестве связующих, используемых для изготовления препрегов ПВКМ, применяют композиции из полимерных, олигомерных и мономерных соединений или их смесей, которые включают различные добавки, определяющие технологические и эксплуатационные свойства материала (отвердители, инициаторы, катализаторы, ускорители отверждения, разбавители, эластификаторы и т.п.). Связующие при нормальной температуре могут находиться в одном из следующих физических состояний: твердом (частично кристаллическом или аморфном), эластическом и вязкотекучем. В каком именно – это зависит от химического строения молекулярной цепи и ее молекулярной массы.

Для пропитки применяют связующие, находящиеся в вязкотекучем состоянии. Свойствами вязкой жидкости обладают низкомолекулярные смолы и олигомеры, например, олигоэфирмалеинаты и олигоэфиракрилаты (ПН-1, ПН-4, ПН-11, ТГМ-3, МГФ-9, ТМГФ-11 и др.), эпоксидные олигомеры ЭД-20, ЭД-16 и др.

Вязкость олигоэфирмалеинатов резко снижается при введении в их состав мономеров или жидких олигомеров, например, стирола или менее токсичного олигоэфиракрилата ТГМ-3.

Вязкость эпоксидных олигомеров уменьшают введением низкомолекулярных разбавителей ДЭГ-1, ТЭГ-1 и других, сополимеризующихся с олигомерами в процессе отверждения.

Твердую фенолоформальдегидную смолу растворяют в фурфуроле (связующее ФН), который играет роль активного разбавителя и одновременно отвердителя. Роль активного разбавителя для фенолоформальдегидной смолы может играть и фуриловый спирт.

Вводимые в состав связующих активные разбавители существенно влияют на структуру и эксплуатационные свойства полимерных матриц. Так, с увеличением в составе эпоксидных связующих разбавителя ДЭГ-1, который встраивается в сетку полиэпоксида и увеличивает расстояние между поперечными связями, теплостойкость полимера резко уменьшается. Поэтому для придания требуемой вязкости в связующие дополнительно вводят пассивные растворители, в качестве которых обычно применяют ацетон и спиртоацетоновые смеси. Растворителями могут служить также циклогексанон, диоксан, метилэтиленкетон, этилацетат, бутилацетат, ароматические углеводороды (бензол, ксилол, толуол и др.), хлорированные углеводороды (дихлорэтан, четыреххлористый углерод и др.). При подборе растворителей учитывают параметры растворимости γ компонентов раствора. Раствор образуется только в том случае, если величины γ растворителя и полимера близки.

Для улучшения экологии производства препрегов вместо растворов связующих на основе твердых смол (растворная технология) применяют расплавы (расплавная технология). Пропитка волокнистых наполнителей полимерными (т.е. высокомолекулярными) связующими осуществляется преимущественно по расплавной технологии, так как уже 3...6%-ные растворы полимеров находятся в гелеобразном состоянии.

Приготовление связующих осуществляется в якорных, пропеллерных и планерных пластинчатых мешалках. Вязкие компоненты связующего предварительно смешивают в лопастных смесителях. Емкости смесителей снабжают рубашкой. В зазоре между рубашкой и стенкой емкости циркулирует термостатирующая жидкость, обеспечивающая необходимый температурный режим смешивания компонентов связующего. Существует определенный порядок загрузки компонентов связующего в смеситель. В первую очередь загружают смолу или олигомер, затем разбавители, растворители, пластификаторы и другие компоненты. Перед загрузкой каждого последующего компонента связующего проводят тщательное диспергирование ранее введенных. Для предотвращения преждевременного гелеобразования отвердители и инициаторы вводят в связующее в последнюю очередь, одновременно снижают и температуру термостатирующей жидкости. Ускорители и катализаторы процессов отверждения добавляют в связующее непосредственно перед его использованием. Крупные куски твердых смол перед загрузкой в смеситель измельчают до размеров не более 5...10 мм в мельницах молоткового типа. Твердые смолы совмещают с эластомерными модификаторами (каучуками) на вальцах.

Порошки и гранулы полимеров вначале заливают половинным количеством растворителя, чтобы вызвать набухание полимера, а затем добавляют оставшуюся часть растворителя и перемешивают связующее до образования однородного раствора.

Качество связующего и пригодность его для производства препрегов оценивают по технологическим характеристикам. Некоторые из них используют также для расчета технологических параметров процессов получения препрегов и формования из них готовых изделий.

Основными технологическими характеристиками связующего является плотность, концентрация раствора связующего, вязкость раствора или расплава, количество летучих, время вязкотекучего состояния (гелеобразования), время отверждения, экзотермичность, упругость паров компонентов связующего, поверхностное натяжение и др. Плотность связующего, определяемая пикнометрическим или ареометрическим методом, зависит от плотности применяемых компонентов и их количественного соотношения в связующем. Если известны плотности ρ_i и относительные объемные содержания φ_i компонентов связующего, то плотность последнего $\rho_{св}$, кг/м^3, вычисляют по формуле

$$\rho_{св} = \sum_{i=1}^{i=n} \rho_i \varphi_i .$$

По плотности связующего судят о его составе, и этот параметр связующего является паспортной характеристикой. По плотности связующего контролируют и концентрацию растворенных в нем компонентов. В производстве препрегов применяют связующие с возможно большей концентрацией сухого остатка (40...60 %), так как в этом случае увеличивается нанос связующего на поверхности волокнистого наполнителя. Однако с ростом концентрации растет и вязкость связующего, что приводит к резкому уменьшению скорости проникновения его в межволоконное пространство наполнителя, ухудшается и качество пропитки.

Промышленные олигоэфирные связующие типа ПН, содержащие 28...45 % стирола, имеют вязкость 0,5...2,5 Па · с. Вязкость связующих на основе различных эпоксидных композиций изменяется от 0,1 до 15 · 10^3 Па · с, а спиртовых растворов фенолоформальдегидных смол при содержании растворителя 35...55 % – от 0,04 до 10 Па · с.

В лабораторных условиях вязкость связующего определяют на капиллярных, ротационных вискозиметрах и вискозиметрах с падающим шариком (вискозиметр Хепплера).

Для экспресс-анализа в производственных условиях обычно используют капиллярные вискозиметры с калиброванными отверстиями (вискозиметры ВЗ-1, ВЗ-4). За показатель вязкости в этом случае принимают время истечения определенного объема связующего через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Имеются таблицы перерасчета этого показателя вязкости в Па · с.

Оптимальная вязкость связующих, применяемых для пропитки волокнистых наполнителей, составляет 0,1...1 Па · с. Вязкость $\eta_{св}$ связующего зависит от концентрации c и молекулярной массы M растворенного олигомера или полимера, вязкости $\eta_р$ растворителя, температуры T и может быть предварительно оценена по следующим уравнениям:

$$\eta_{св} = \eta_р \left\{ \left[c |\eta|_х + a^2 c \right] + 1 \right\},$$

где

$$|\eta|_х = kM^a ;$$

$$\eta_{св} = \eta_0 e^{\frac{U}{RT}} .$$

Здесь $|\eta|_х$ – характеристическая вязкость раствора; k, a, η_0 – константы; U, R – соответственно энергия активации вязкого течения и универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Источниками летучих продуктов в связующих являются пассивные растворители и низкомолекулярные вещества, выделяющиеся при отверждении связующего. В процессе отверждения при повышенных температурах и вакуумировании из связующего могут дополнительно удаляться и реакционноспособные компоненты (мономеры, отвердители, активные разбавители), имеющие низкую упругость паров. В результате изменяется стехиометрический состав связующего и резко ухудшается свойство отвержденной композиции. Поэтому упругость паров, составляющих связующее компонентов, учитывают при назначении максимальной степени разряжения в процессе вакуумной пропитки волокнистого наполнителя и диафрагменных методов формования изделий из препрегов ПВКМ (вакуумное, пневматическое и автоклавное формование).

Вязкость термореактивных связующих (кроме имидных) даже при нормальной температуре постепенно возрастает вследствие иду-

щих в нем химических реакций, приводящих к увеличению молекулярной массы олигомеров. При определенной степени превращения в полимерной части связующего образуется редкая сетка, и оно теряет текучесть, переходит в гелеобразное состояние. С повышением температуры образование геля происходит за более короткое время. Время $t_{го}$ гелеобразования (вязкотекучего состояния) для большинства термореактивных связующих связано с абсолютной температурой T экспоненциальной зависимостью типа

$$t_{го} = t_0 e^{\frac{Q}{RT}},$$

где t_0 – предэкспоненциальный множитель; Q – энергия активации процесса отверждения.

Так, например, для связующего ЭДТ-10П эта зависимость выглядит следующим образом:

Температура, °С	20	40	80	120	140
Время гелеобразования	6 сут	3 сут	2 ч	15 мин	8 мин

Таким образом, повышая температуру с целью снижения вязкости связующего, способствующего ускорению пропитки и повышению качества препрега, всегда необходимо учитывать резкое уменьшение жизнеспособности связующего, а следовательно, и времени пропитки.

Время гелеобразования в лабораторных условиях определяют на пластометре с параллельными плитами, методом торсионного маятника и методом термопиков, в производственных условиях – методом плитки.

Большое значение для процесса пропитки имеет поверхностное натяжение σ, которое для большинства связующих составляет 25...40 МН/м. Величину σ можно уменьшить введением в состав связующего различных растворителей и поверхностно-активных веществ. Поверхностное натяжение связующего чувствительно и к нагреву. Для различных растворителей, вводимых в связующее, термический коэффициент поверхностного натяжения $d\sigma / dt$ составляет 0,08...0,12 МН/(м · К).

Подготовка волокнистых наполнителей. Для изготовления препрегов применяют волокнистые структуры из непрерывных и штапельных волокон. К непрерывным структурам могут быть отнесены крученые и некрученые первичные нити, состоящие из 100...200 элементарных волокон, и жгуты, получаемые объединением определенного количества первичных нитей, а также однонаправленные ленты. К этой группе относят и ткани из непрерывных волокон с различными видами плетения, мягкие стеклохолсты прошивного типа и др.

Из штапельных структур изготовляют жесткие холсты, объемные заготовки, получаемые напылением, насасыванием или осаждением волокон, а также ткани и бумагу.

В процессе формования элементарных волокон их поверхность покрывают замасливателями на основе минеральных масел, жирных кислот, поливинилового спирта для улучшения текстильных свойств волокон (перемотки, ткачества и т.п.). Однако замасливатели резко ухудшают адгезионные свойства волокон, и их перед пропиткой удаляют отмывкой в растворителе или термической обработкой при температуре выше температуры деструкции вещества, из которого изготовлен замасливатель. Для волокон из минеральных веществ предпочтение отдают термообработке. Так, начальное содержание на поверхности стеклянных волокон 1,5...2 % замасливателя отмывкой удается снизить до 0,3...0,6 %, в то время как после термообработки при 300 °С на поверхности волокна остается только 0,05 % замасливателя. Вследствие увеличения поверхностной энергии смачиваемость термообработанных волокон связующим резко возрастает. Однако в отформованном из такого препрега материале существенно увеличиваются остаточные напряжения, возникающие на границе раздела волокно–связующее вследствие большого различия их термоупругих свойств.

Для уменьшения этих напряжений и увеличения прочности сцепления компонентов ПВКМ волокна покрывают аппретами – многофункциональными соединениями, способными взаимодействовать с поверхностью волокна и связующим. Для эпоксидных и фенолоформальдегидных связующих применяют аппреты марок АГМ-3, АГМ-9, для полиэфирных – ГВС-9, ГКЖ-12. Указанные выше аппреты являются поверхностно-активными веществами, поэтому их можно вводить и в состав связующего. При пропитке эти аппреты осаждаются на поверхности волокон в виде тонких пленок. Для более эффективного снижения остаточных напряжений в качестве аппретов, вводимых в связующее, применяют

высокомолекулярные блоксополимеры типа КЭП-2, которые образуют на поверхности волокнистого наполнителя мобильные пленки толщиной до 25 нм.

Целесообразно использовать и так называемые прямые замасливатели, в состав которых входят вещества (обычно это кремнийорганические соединения), способные увеличить прочность сцепления связующего с наполнителем.

Аппретированные и неаппретированные стеклянные волокна, которые долго хранились до приготовления препрегов, подвергают сушке при температуре 80...100 °С для удаления адсорбированной влаги.

Поверхность углеродных волокон покрыта слоем текстильной шлихты на основе поливинилового спирта. Замасливатель и сорбированную поверхностью влагу удаляют нагреванием волокна в среде азота, например, путем пропускания по нему электрического тока. Затем освобожденную поверхность покрывают слоем аппрета или протектирующего полимера. Наилучшие результаты получают в том случае, когда на поверхность сначала наносят тонкий слой мономера, хорошо смачивающего волокна и заполняющего открытые поры. После полимеризации мономера волокна покрываются тонким слоем протектора, пломбирующего поверхностные дефекты. Поверхность углеродных волокон подвергают оксидированию в сильных окислителях, например, в кипящей HNO_3. В результате такой обработки на порядок увеличивается площадь поверхности волокон, возрастает количество активного водорода, кислорода, спиртовых и фенольных групп, вызывающих возрастание поверхностной энергии. Особенно эффективно сочетать растворение пленки замасливателя электрохимическим способом с действием ультразвука [4].

Несмотря на то что поверхностная энергия бора и его окислов значительно больше, чем углеродного волокна, полимерные связующие смачивают его довольно плохо. Краевой угол смачивания борных волокон эпоксидным связующим составляет около 30°. Это вызвано загрязнением поверхности волокон адсорбированными веществами. Очистку поверхности осуществляют водными растворами кислот или кипящим этанолом. В результате такой обработки происходит не только десорбция, но и снятие с поверхности волокон окисной пленки, благодаря чему возрастает поверхностная энергия, а краевой угол смачивания снижается до 5...7°.

Среди органических волокон для препрегов в отечественной промышленности применяют в основном волокна марок СВМ и РУСАР, изготовляемые на основе ароматических полиамидов. Поверхность этих волокон обычно покрыта текстильной шлихтой, которую перед нанесением связующего отмывают в растворителе. Полиамидные волокна чрезвычайно гигроскопичны, поэтому перед пропиткой их подвергают сушке при температуре ниже температуры стеклования волокнообразующего полимера.

Органические волокна структурно неоднородны. Многие из них состоят из ориентированного ствола с высокой степенью кристалличности и аморфной оболочки.

В процессе получения препрегов низкомолекулярные компоненты связующего диффундируют в аморфные оболочки волокон, заполняют микродефекты, взаимодействуют с функциональными группами волокнообразующего полимера. После отверждения связующего граница становится размытой, а прочность сцепления связующего с наполнителем становится выше трансверсальной прочности волокна. Набухание в компонентах связующего при повышенной температуре может привести к дезориентации волокон и снизить тем самым их прочность и упругие характеристики. Кроме того, в результате диффузии низкомолекулярных компонентов связующего в волокна изменяется состав смоляной фазы, в результате чего происходит недоотверждение полимерной матрицы, особенно в зоне, непосредственно прилегающей к волокну. Во избежание приведенных выше эффектов поверхность органических волокон покрывают барьерным слоем [4, 5].

Технологические характеристики волокнистых наполнителей. 1. Диаметр d элементарных волокон, мкм.

2. Линейная плотность длинномерных волокнистых структур (нити, жгуты) T_m в тексах; текс представляет собой массу (в граммах) нити или жгута длиной 1000 м.

3. Поверхностная плотность ρ_s, представляющая собой массу единицы площади листовых волокнистых структур (ткани, холсты, бумага), кг/м^2.

4. Относительная объемная пористость П (коэффициент пористости) волокнистых структур в состоянии поставки, рассчитываемая по формуле:

$$П = 1 - \rho_{стр} / \rho_{нап},$$

где $\rho_{стр}$ – плотность волокнистой структуры, кг/м^3; $\rho_{нап}$ – плотность материала, из которого изготовлено волокно, кг/м^3.

Функциональную зависимость $П = f(p)$ определяют экспериментально, уплотняя модельные пакеты различными давлениями p_i. В процессе уплотнения измеряют высоту пакета. По результатам эксперимента строят зависимость в координатах $h = f(\lg p)$ (кривую уплотнения), где h – относительная высота пакета, $h = H_{p_i} / H_0$; здесь H_{p_i} – высота пакета при давлении p_i; H_0 – начальная высота пакета.

Кривую уплотнения по формуле

$$П = 1 - \rho_{стр} / (\rho_{нап} H_{p_i})$$

пересчитывают в зависимости $П = f(p)$.

На рис. 1.5.1 представлены кривые уплотнения различных стекловолокнистых наполнителей, в которых можно выделить три зоны (I – III). Для зоны I характерны большие обратимые деформации упругого изгиба пучка волокон. В зоне II увеличивается число контактов между волокнами, возрастают контактные напряжения. В зоне III начинается разрушение волокнистого наполнителя, так как контактные напряжения достигают предела прочности волокна.

В пределах зоны I взаимосвязь между относительной толщиной пакета h и давлением уплотнения p хорошо описываются формулой

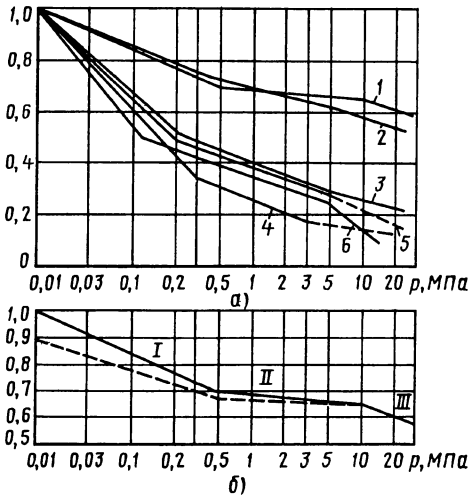


Рис. 1.5.1. Кривые уплотнения пакетов из различных стекловолокнистых наполнителей:
а – 1 – жгутовая ткань; *2* – ткань полотняного плетения; *3* – холст из непрерывных нитей; *4* – холст жесткий из рубленых волокон; *5* – холст воздушного вытягивания; *6* – мягкий холст; *б* – кривые уплотнения (——) и разгрузки (– – –) пакета из жгутовой ткани

$$h = A - B \lg p,$$

где A и B – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.5.1.

Из кривых уплотнения следует, что при увеличении давления выше границы зоны I уменьшение пористости пакета, а следовательно, и увеличение содержания волокнистого наполнителя значительно замедляется.

1.5.1. Коэффициенты *A* и *B* различных видов стеклонаполнителей

Тип стекловолокнистой структуры	Коэффициенты	
	A	*B*
Жгутовая ткань	0,812	0,188
Ткань полотняного переплетения	0,837	0,165
Холст жесткий из рубленых нитей	0,606	0,394
Холст жесткий из непрерывных нитей	0,626	0,374
Холст мягкий	0,523	0,477
Холст воздушного вытягивания	0,555	0,445

По кривым уплотнения с учетом массы единицы площади листовых волокнистых наполнителей ρ_s и коэффициента пористости П, относительное объемное содержание волокна в пакете $\psi_в$ можно определить по формуле

$$\psi_в = 1 - П = \rho_s / (\rho_{нап} H_{p_i}).$$

5. Деформационно-прочностные характеристики – модуль упругости волокна E и разрывную прочность волокнистой структуры (нитей, жгутов, тканей и т.д.) учитывают при назначении усилия протяжки наполнителя через тракт пропиточной машины и диаметров путевых роликов машины.

6. Поверхностная энергия волокнистого наполнителя позволяет судить о возможности совмещения его с конкретным видом связующего. Поверхностная энергия волокон, Дж/м^2, различной природы приведена ниже:

Волокно:

алюмоборсиликатное	0,425
кварцевое аморфное	0,260
борное	0,250
углеродное	0,050...0,070
СВМ	0,030
металлическое	1,300
нитевидные кристаллы	2,000

7. Для пары волокнистый наполнитель–связующее еще одной важной характеристикой является краевой угол смачивания θ.

Смачивание поверхности волокна и проникновение связующего в капилляры волокнистой структуры происходит только в том случае, когда $\theta < 90°$. Некоторые технологические характеристики матов (холстов) и тканых наполнителей приведены в табл. 1.5.2.

1.5.2. Технологические характеристики матов (холстов) и тканых наполнителей

Марка ткани, холста	Тип переплетения	Поверхностная плотность, кг/м^2	Толщина, мм	Относительная пористость
Стеклянное волокно				
Т-10	Сатин 8/3	0,29	0,23	0,496
Т-11	Сатин 8/3 или 5/3	0,39	0,30	0,480
Т-12		0,37	0,30	0,510
Т-13	Полотно	0,29	0,27	0,570
Т-14		0,31	0,29	0,573
А-1		0,11	0,10	0,560
А-2		0,07	0,06	0,534
ТСУ8/Э-ВМ	Сатин 8/3	0,32	0,27	0,526
ТУ ПР	Полотно	0,29	0,26	0,554
ТС-5Н		0,30	0,47	0,545
МТТС-2,1	Объемное плетение	2,10	2,20	0,618
МТБС-2,5		2,90	2,50	0,536
МТБС-2,8		8,60	8,40	0,590
Жесткий холст	Рубленые склеенные нити длиной 30...60 мм	0,20...0,60	0,3...1,5	0,736...0,770
Мягкий холст	Рубленые нити, скрепленные прошивкой	0,6...2,5	0,9...3,0	0,734...0,50
ХЖ КН	Непрерывные склеенные нити, уложенные восьмеркой	0,3...0,5	0,5...2,0	0,760...0,90

Продолжение табл. 1.5.2

Марка ткани, холста	Тип переплетения	Поверхностная плотность, кг/м^2	Толщина, мм	Относительная пористость
Органическое волокно				
–	Полотно	0,11	0,25...0,30	0,662...0,718
		0,075	0,15	0,615
	Рогожа 2/2	0,18	0,35	0,605
		0,11	0,20	0,577
	Сатин 8/3	0,16	0,40	0,692
	Однонаправленная лента	0,1	0,35	0,626

1.5.2. ЖИДКОФАЗНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ СВЯЗУЮЩИХ С НАПОЛНИТЕЛЕМ

В процессе пропитки волокнистый наполнитель окунают в связующее (пропитка окунанием), приводят его в контакт с поверхностью связующего (контактная пропитка) или напыляют жидкое связующее на поверхность наполнителя (совмещение напылением).

Проникновение связующего в межволоконное пространство осуществляется под действием сил поверхностного натяжения, сил тяжести, атмосферного давления и внешних сил, специально прикладываемых к связующему (избыточное давление газа, центробежные силы и т.п.).

Сопротивление волокнистого наполнителя фильтрации связующего зависит от размера пор межволоконного пространства. Так как поры отличаются друг от друга размерами, то условия заполнения их связующими могут быть разными. Однако поскольку в реальных условиях скорости движения связующего по межволоконным капиллярам чрезвычайно малы, фильтрационные свойства пористой среды предложено оценивать интегральной характеристикой – коэффициентом проницаемости K.

От коэффициента проницаемости зависит интенсивность фильтрации связующего с вязкостью η сквозь пористую среду под давлением p_n. Его рассчитывают по формуле

$$K = \frac{\eta Q l}{S p_n},$$

в которую подставляют данные, полученные экспериментально на модельных установках и пакетах конкретных волокнистых наполнителей, пропитываемых конкретными связующими.

В формуле η – коэффициент динамической вязкости Па · с: Q – расход связующего, фильтрующегося сквозь пакет, см^3/с; l и S – длина и поперечное сечение пакета, см; p_n – перепад давления по длине пакета, МПа.

Коэффициент проницаемости зависит от структуры волокнистого наполнителя, степени анизотропии его в различных направлениях.

Приведенные в табл. 1.5.3 данные показывают, что коэффициенты проницаемости в тканях различного переплетения в направлении основы и утка мало отличаются друг от друга и резко уменьшаются в направлении, перпендикулярном к толщине листового наполнителя.

По мере увеличения степени уплотнения пропитываемого волокнистого наполнителя коэффициент проницаемости его уменьшается в соответствии со следующим уравнением:

$$K = A'h^2 - B'h + D,$$

где A', B' и D – коэффициенты, значения которых для стекловолокнистых наполнителей приведены в табл. 1.5.4.

Тканые наполнители в зоне деформации II становятся практически непроницаемы.

Пропитка волокнистых наполнителей без давления. Пропитка окунанием. В процессе пропитки окунанием волокнистый наполнитель в виде нитей, жгутов или ткани сматывают со шпутелей, бобин или рулонов и по тракту установки для пропитки направляют в ванну со связующим (рис. 1.5.2). На выходе из пропиточной ванны отжимают избыток связующего и препрег направляют в сушильную камеру, где происходит удаление растворителя или предотверждение связующего. Готовый препрег сматывают в рулон, прокладывая между слоями антиадгезионную пленку, если имеется опасность слипания полуфабриката.

1.5.3. Значения коэффициентов проницаемости волокнистых наполнителей

Структура стекловолоконного наполнителя	Коэффициент проницаемости K, м^2	
	по основе и утку	перпендикулярно к толщине наполнителя
Ткань полотняного переплетения	$(0{,}1...0{,}2) \cdot 10^{-7}$	$(0{,}002...0{,}004) \cdot 10^{-7}$
Ткань сатинового переплетения	$(0{,}15...0{,}25) \cdot 10^{-7}$	$(0{,}003...0{,}005) \cdot 10^{-7}$
Жгутовая ткань	$(0{,}25...0{,}35) \cdot 10^{-7}$	$(0{,}004...0{,}008) \cdot 10^{-7}$
Стекломат	$(0{,}7...1{,}0) \cdot 10^{-7}$	$(0{,}05...0{,}62) \cdot 10^{-7}$

1.5.4. Значения коэффициентов A', B', D для определения проницаемости уплотненных стекловолокнистых наполнителей

Тип волокнистой структуры		A'	B'	D
Жгутовая ткань		435	392	81
Полотняная ткань		457	510	136
Кордная ткань	по основе	580	577	118
	по утку	225	824	121
Холст жесткий		1880	1300	252
Холст из непрерывных нитей		5230	4750	1630
Холст воздушного вытягивания		2360	2265	580

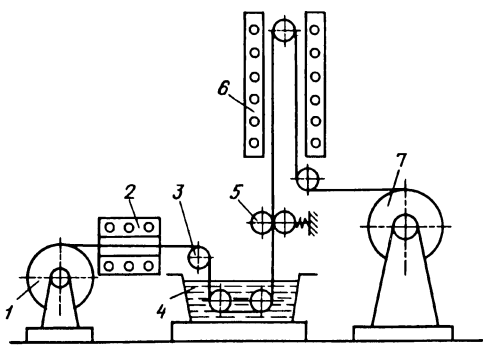


Рис. 1.5.2. Схема установки для пропитки волокнистых наполнителей окунанием:
1 – рулон наполнителя, *2* – камера сушки волокон, *3* – путевые ролики, *4* – пропиточная ванна, *5* – отжимное устройство, *6* – камера сушки препрега, *7* – рулон препрега

Закономерности проникновения связующего в межволоконное пространство наполнителя представлены на рис. 1.5.3.

Жгут диаметром $2/R$ находится в ванне со связующим на глубине H. Связующее проникает в межволоконное пространство жгута через боковую поверхность, сквозь щели шириной δ, образованные параллельно уложенными элементарными волокнами.

Давление $p_п$ пропитки складывается из капиллярного, гидростатического и атмосферного давления:

$$p_п = 2\sigma\cos\theta/\delta + \rho g H + p_{атм} - p_{возд}.$$

Воздух, находящийся в межволоконном пространстве, оказывает сопротивление движению связующего. Под действием удельной капиллярной силы $\Delta F_2 = \sigma \sin\theta$ происходит сближение элементарных волокон, а следовательно, уменьшение δ и снижение скорости пропитки.

Пропитку интенсифицируют вакуумированием межволоконного пространства наполнителя (вакуумная пропитка), увеличением давления над свободной поверхностью связующего (пневматическая пропитка), возбуж-

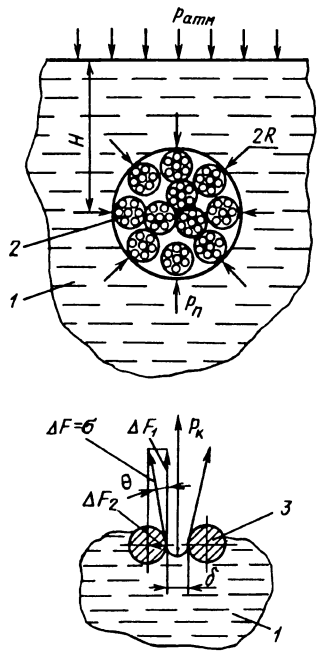


Рис. 1.5.3. Схема пропитки связующим волокнистого наполнителя:
1 – связующее, *2* – жгут, $p_{атм}$ и $p_{проп}$ – атмосферное давление и давление пропитки, *3* – элементарные волокна

дением в связующем акустического давления (пропитка с наложением механических колебаний), наложением на связующее центробежных сил (центробежная пропитка) и другими способами.

При выходе из пропиточной ванны помимо того связующего, которое проникает в межволоконное пространство, поверхность волокнистого наполнителя захватывает еще некоторое количество связующего, толщина δ которого может быть определена по следующим формулам:

$$\delta = 1{,}32Rc(\eta v/\sigma)^{2/3}$$

– для жгута радиуса R, протягиваемого со скоростью v через ванну со связующим, с объемной концентрацией c и вязкостью η.

Для пропитываемой ткани, выходящей из ванны под углом наклона к горизонту α,

$$\delta = \frac{0{,}94}{\sqrt{1-\cos\alpha}} \frac{(\eta v)^{2/3}}{(\rho g)^{1/2}\sigma^{1/6}}.$$

Необходимое содержание связующего в препреге обеспечивается последующим отжимом, который осуществляется роликами, ножами или эластичными губками.

Процесс сушки препрегов совмещают с пропиткой волокнистого наполнителя. Поскольку связующие представляют собой растворы 40...60%-ной концентрации, а скорости пропитки довольно высоки, приходится за небольшой промежуток времени из препрегов удалять значительное количество растворителя.

При высоте сушильных камер 2,5...4 м и 2 – 4 проходах препрегов через камеру со скоростью 1,0...10 м/мин время сушки составляет 0,5...15 мин. В таких условиях обычная конвективная сушка оказывается малоэффективной, так как удаление растворителя идет только с поверхности, а образовавшаяся пленка связующего препятствует выходу растворителя. Для интенсификации процесса применяют инфракрасную сушку препрегов с принудительным отсосом паров растворителя. При инфракрасной сушке происходит прогрев препрега по всему объему, причем наиболее интенсивно поглощает теплоту волокнистый наполнитель. Поэтому поток теплоты идет изнутри к наружной поверхности препрега, и твердая пленка на этой поверхности почти не образуется.

Энергия Q излучающих элементов сушильной камеры расходуется на нагрев препрега, испарение растворителя и нагрев стенок камеры, так как волокнистый наполнитель и металл, из которого сделаны стенки сушильной камеры, непрозрачны для инфракрасного излучения. Воздух практически прозрачен для инфракрасных лучей и поэтому нагревается конвективно только от стенок камеры.

Контактная пропитка волокнистых наполнителей. Этот вид пропитки применяют в том случае, когда волокно изготовлено из высокомодульного материала (например, бора), имеет большой диаметр и поэтому не может быть пропущено через пропиточный тракт обычных установок, так как он снабжен перевалочными валками сравнительно малого диаметра. При огибании таких валков происходит разрушение волокнистого наполнителя.

Схема пропиточной установки для контактной пропитки представлена на рис. 1.5.4. В процессе пропитки движущийся под действием силы N протягивания волокнистый наполнитель *1* приводится в контакт с поверхностью вращающегося ролика *2*, покрытой слоем

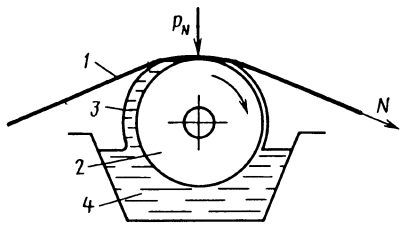


Рис. 1.5.4. Схема установки для контактной пропитки волокнистого наполнителя

связующего *3*. Непрерывный приток связующего в зону пропитки обеспечивается вращением ролика, погруженного в ванну *4* со связующим.

Диаметр D контактного ролика подбирают таким образом, чтобы возникающие в волокнах напряжения не превышали допустимой величины $[\sigma]_q$:

$$D \geq E_B d_B / [\sigma]_q ,$$

где E_B и d_B – модуль упругости и диаметр элементарных волокон наполнителя.

Проникновение связующего в межволоконное пространство наполнителя осуществляется под действием капиллярных сил и давления

$$p_N = 2N / D .$$

Давление p_N создается нагруженным волокнистым наполнителем силой N на покрытую связующим поверхность ролика.

Пропитка напылением применяется в том случае, когда в течение короткого времени необходимо совместить со связующим большие плоские заготовки волокнистого наполнителя. Такая проблема возникает при изготовлении крупногабаритных изделий из листовых волокнистых наполнителей (тканей, матов) больших размеров, пропитываемых связующими комнатного отверждения с ограниченным временем жизнеспособности. На поверхность волокнистой заготовки напыляют слой связующего толщиной

$$\delta = H\Pi ,$$

где H – толщина пропитываемого пакета; П – относительная объемная пористость пакета.

Если нанесение связующего на поверхность наполнителя осуществляется распылителем (рис. 1.5.5), то скорость движения распылителя

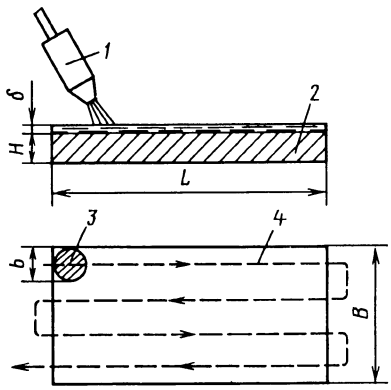


Рис. 1.5.5. Схема пропитки пакета волокнистого наполнителя напылением:
1 – распылитель, *2* – пакет из волокнистой структуры, *3* – диаметр факела связующего, *4* – траектория движения распылителя

$$v = \frac{Q_р}{bH\Pi} ,$$

где $Q_р$ – производительность распыления, см^3/с; b – диаметр факела напыляемого связующего; L, B, H – размеры пропитываемого пакета;
а время напыления

$$t = \frac{LBH\Pi}{Q_р} .$$

Так же, как и в предыдущем случае, проникновение связующего в межволоконное пространство осуществляется под действием капиллярных сил и сил тяжести.

Пропитка волокнистых наполнителей под давлением. Наиболее широко применяемыми на практике методами пропитки волокнистых наполнителей связующими под давлением являются вакуумный, пневмовакуумный и центробежный.

Вакуумная пропитка. Одна из схем вакуумной пропитку представлена на рис. 1.5.6. Рулон тканого наполнителя *5* помещают в герметично закрывающуюся крышкой *2* камеру *1*. В крышке камеры смонтирован вакуумметр *3*. Трубопровод *4* соединяет внутреннюю полость камеры с вакуумной системой. Свободный конец ткани протягивают сквозь фильеру *6*, передняя часть которой опущена в ванну со связующим *8*, перевалочный ролик *9*, отжимные ролики *7* и далее соединяют с тянущим механизмом пропиточной

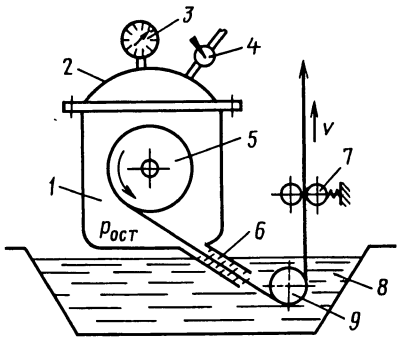
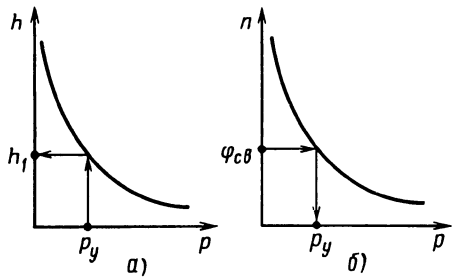


Рис. 1.5.6. Схема установки для вакуумной пропитки волокнистого наполнителя



1.5.7. Изменение относительной высоты уплотняемого пакета (*а*) и относительного объемного содержания в нем пор (*б*) в зависимости от давления уплотнения

установки. Скорость проникновения связующего в межволоконное пространство наполнителя в щели фильеры возрастает по сравнению с капиллярной пропиткой под действием добавочного давления $p_р$, равного разности между атмосферным и остаточным давлением воздуха в вакуумируемой камере. Для того чтобы связующее не попало в камеру *1*, скорость протяжки тканого наполнителя через пропиточную ванну должна быть равна скорости движения связующего в межволоконном пространстве.

Пневмовакуумная пропитка. Для осуществления пневмовакуумной пропитки обычные пропиточные установки снабжают специальной камерой, через вакуумируемую внутреннюю полость которой протягивают волокнистый наполнитель. Связующее в межволоконное пространство наполнителя, находящегося в камере, нагнетают под давлением. Под давлением пропитывают пакеты, собранные из волокнистых наполнителей и уплотненные в жестких формах. Рассмотрим задачу о получении пластины из стеклопластика с размерами L, B, H. Относительное объемное содержание $\varphi_{св}$ связующего и волокнистого наполнителя $\varphi_н$ в пластине равно $\varphi_{св} + \varphi_н = 1$. Для изготовления пластины применяем стеклянную ткань с массой единицы площади, равной $\rho_п$ и толщиной δ. Для модельных пакетов, собранных из стеклоткани, экспериментально получена деформационная кривая $h = f(p)$, по которой расчетным путем найдена зависимость $П = f(p)$ (рис. 1.5.7).

Пакет из стеклоткани *1* (рис. 1.5.8) собирают в матрице *2* и уплотняют пуансоном *5*, создавая давление $p_у$. Через отверстие – источник *4* в матрицу под давлением $p_{пр}$ нагнетают

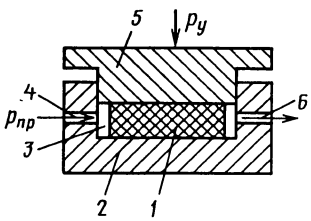


Рис. 1.5.8. Оснастка для пропитки волокнистого наполнителя под давлением

связующее, которое сначала заполняет коллектор *3*, а затем фильтруется сквозь поры пакета и вытекает из матрицы через отверстие – сток *6*.

Необходимо определить давление $p_у$ уплотнения, давление $p_{пр}$ пропитки и время t пропитки пакета. Величина П уплотненного пакета должна быть такой, чтобы после заполнения пор относительное объемное содержание связующего было равно заданной величине $\varphi_{св}$. Отложим $\varphi_{св}$ на оси П зависимости $П = f(p)$ (см. рис. 1.5.7, *б*), через полученную точку проводим линию, параллельную оси p до пересечения с кривой. Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на ось p, определяем давление $p_у$ уплотнения. Затем значение $p_у$ откладываем на оси p зависимости $h = f(p)$ (см. рис. 1.5.7, *а*), из полученной точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой. Через точку пересечения проводим линию, параллельную оси p, находим относительную толщину h_1, а по ней и H_0 – начальную толщину пакета, которая при давлении $p_у$ уменьшается до толщины $H_д$ детали с пористостью П, обеспечивающей заданное содержание матричной фазы в готовой

детали после пропитки и отверждения связующего.

Максимально допустимый градиент давления пропитки, не вызывающий смятия и перемещения пакета, определяют по формуле

$$\frac{dp_{\text{пр}}}{dl} \le \frac{2p_{\text{у}}f}{H},$$

где f – коэффициент трения покоя системы волокнистый наполнитель–материал формы, значение которого для пары стекловолокно–сталь находится в пределах 0,14...0,20.

Время линейной пропитки плоского пакета может быть определено по формуле

$$t_{\text{пр}} = \frac{L^2\eta\Pi}{2p_{\text{пр}}K}.$$

Центробежную пропитку волокнистых наполнителей осуществляют во вращающихся осесимметричных формах (рис. 1.5.9). Пакет наполнителя *3* собирают на формообразующей поверхности оснастки *2*. Торцы оснастки закрывают крышками *1* и приводят ее во вращение с частотой n_ω. На поверхность пакета напыляют слой связующего *4*, объем которого рассчитывают по формуле

$$V_{\text{с}} = \pi\left(R_{\text{о}}^2 - R_{\text{п}}^2\right)L\Pi,$$

где $R_{\text{о}}$ и $R_{\text{п}}$ – радиусы внутренней поверхности соответственно оснастки и пакета; L и Π – длина и пористость пакета.

Для того чтобы связующее было распределено по поверхности пакета равномерным слоем, форма должна вращаться с частотой

$$n_\omega \ge 9{,}55\sqrt{\frac{g}{R_{\text{с}}}},$$

где $R_{\text{с}}$ – внутренний радиус связующего.

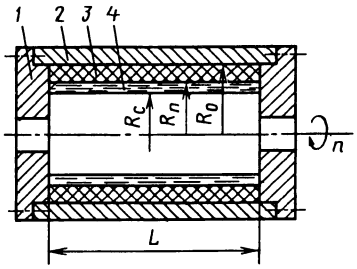


Рис. 15.9. Форма с горизонтальной осью вращения для центробежной пропитки волокнистых наполнителей

Время пропитки может быть определено из следующего соотношения:

$$t_{\text{пр}} = \Pi\frac{\eta\left[R_{\text{о}}^2\left(2\ln\frac{R_{\text{о}}}{R_{\text{п}}} - 1\right) + R_{\text{о}}^2\right]}{2{,}2K\rho_{\text{св}}\left(R_{\text{п}}^2 - R_{\text{с}}^2\right)n_\omega^2 10^{-5}},$$

где K – коэффициент проницаемости.

Контроль качества препрегов. В готовой продукции контролируют содержание связующего и степень его растворимости, содержание летучих веществ, липкость и гибкость препрега, размеры его поперечного сечения. В ряде случаев проверяют механические характеристики препрега на плоских или кольцевых образцах.

Жизнеспособность препрегов во время хранения в холодильнике или при нормальной температуре должна быть достаточно большой (от 7...10 сут до 3...6 мес). Препрег, намотанный на приемные катушки, должен сматываться с них без повреждения волокнистого наполнителя в течение всего гарантийного срока хранения.

В табл. 1.5.5 приведены некоторые характеристики отечественных препрегов.

1.5.5. Характеристики отечественных препрегов*

Наполнители в препреге	Максимальная ширина, мм	Массовая доля связующего, %	Толщина, мм
Стеклолента однонаправленная	50	20 ± 2	0,1 ± 0,02
Ткань стеклянная	1000	30 ± 2	0,3 ± 0,02
Лента углеродная ЛУ	250	40 ± 5	0,12 ± 0,02
Лента углеродная из волокна ВМН-4	50	37 ± 3	0,3 ± 0,03
Лента углеродная из волокна ВМН-РК	50	37 ± 3	0,2 ± 0,03
Ткань кремнеземная КТ-11	800	40 ± 5	0,5 ± 0,05

* Эпоксидные связующие

1.5.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕПРЕГОВ

Назначение, область применения, основные типы оборудования. Для производства препрегов на основе стеклянных, углеродных и органических наполнителей служит специальное оборудование, представляющее собой технологические линии размотки исходных материалов, их пропитки, сушки и смотки на приемные катушки. Непрерывность процессов пропитки и сушки обеспечивается наличием устройств соединения тканей и накопителей, а получение узких лент – применением режущих устройств и соответствующим количеством рабочих позиций на приемном устройстве.

При получении препрегов из однонаправленных материалов (жгуты, нити) линии производства препрегов оснащаются шпулярниками с требуемым количеством шпулей, а при получении препрегов из тканых лент – двухпозиционными подающими устройствами.

В зависимости от ширины подлежащих пропитке материалов линии производства препрегов в России выпускаются нескольких типоразмеров, в том числе: до ширины 100 мм – модель УЛС-3М; до ширины 300 мм – модели УПСТ-300, МЛП-305ВТ, МЛП-303ВГ, МЛП-300ГО, УНС-300; до ширины 1000 мм – модели УПСТ-1000М, МЛП-1005ВТ, МЛП-1003ВГ; до ширины 1600 мм – модель УПСТ-1600М.

Продольная резка препрегов может осуществляться как непосредственно на линиях производства препрегов, так и на отдельных установках моделей УСТ-300У и УРСТ-1000. Отдельные установки для продольной резки применяют в тех случаях, когда необходимо получить из ткани узкие ленты.

Во всех моделях линий производства препрегов применен конвективно-радиационный метод сушки с электронагревом сушильных камер. Поскольку в большинстве моделей линий применяют растворы смол в органических растворителях (ацетон, этиловый спирт, эфиры), при сушке выделяются пары растворителей, которые могут при определенной концентрации образовывать с воздухом взрывоопасную смесь. В связи с этим линии оснащены вентиляционными системами, электрооборудование в которых соответствует требованиям "Правил устройств электроустановок", класс В-1б по пожаробезопасности. Линии производства препрегов устанавливают в помещениях с большим объемом, в котором невозможно достижение 5%-ной концентрации паров растворителей при случайном разливе связующего пропиточной ванны. Вместимость пропиточных ванн выбрана минимально возможной, а подпитывающие устройства также имеют минимальную вместимость, и, кроме того, обеспечена непроливаемость этих емкостей.

Все линии производства препрегов из растворов смол имеют вертикальные сушильные камеры, а линия МЛП-300ГО для производства препрегов из расплавов смол и линия УНС-300 для производства препрегов из порошкообразного связующего имеют горизонтальную сушильную камеру.

Схемы оборудования, принцип действия и особенности конструкции. Типовой моделью линии для производства препрегов с применением растворов связующих является линия мод. УПСТ-1000М. Она предназначена для производства препрегов из стекло-, угле- и органотканей шириной до 1 м.

Схема лентотракта линии УПСТ-1000М показана на рис. 1.5.10.

При изготовлении препрегов на линии выполняется комплекс операций, включающий размотку сухой ткани, ее сушку с удалением влаги и замасливателя, пропитку раствором смол, конвективно-радиационную сушку и намотку препрега и разделительной пленки на гильзы приемного устройства. Непрерывность процесса обеспечивается применением двухпозиционного подающего и приемного устройств, накопителя и устройств соединения и резки ткани. Рулон *1* сухой ткани устанавливается в нижнюю позицию загрузки двухпозиционного устройства подачи ткани *2* и закрепляется в нем. Поворотом вертлюга *3* рулон перемещается с нижней позиции загрузки в верхнюю рабочую позицию. Конец ткани разматывают с рулона, пропускают между нижней неподвижной и верхней подвижной обогреваемыми плитами устройства соединения ткани *4*, через перевалочный и тормозной валки подают на подвижной валок *6* накопителя ткани *5*. От подвижного валка накопителя через нижний и верхний перевалочные валки ткань протягивают сквозь канал сушильной камеры *7*.

Подсушенная ткань поступает в пропиточную ванну *8*, внутри которой смонтирован неподвижный валок *9*, оснащенный водяной системой термостабилизации. Затем ткань через отжимные валки *10* и верхний перевалочный валок поступает в зону сушки двухходовой сушильной камеры *7*, оснащенной электронагревателями и системами термостабилизации.

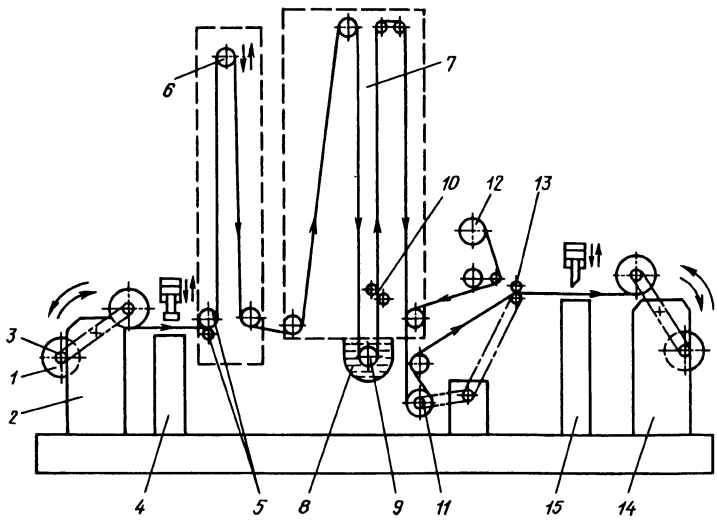


Рис. 1.5.10. Схема линии УПСТ-1000М

Протягивание ткани по линии осуществляется тянущим устройством *11*, оснащенным приводом, с регулируемой скоростью. Разделительная пленка с рулона *12* через перевалочные валки подается на ведущий вал протяжного механизма. Прошедшая тянущее устройство и приводные валки *13* ткань с разделительной подложкой поступает на гильзу двухпозиционного приемного устройства *14*, имеющего порошковый электромагнитный механизм натяжения ткани с регулируемым моментом натяжения. Резка ткани осуществляется режущим устройством *15* гильотинного типа с пневмоприводом. Концы полотнищ ткани в устройстве сваривают расплавленной капроновой лентой, помещенной между уложенными внахлест концами полотнищ тканей. Подвижная плита механизма соединения нагревается резисторами до температуры 250...300 °С и пневмоцилиндром опускается вниз. Сварка происходит за 20...40 с. Во время соединения концов полотнищ подача ткани с рулона прекращается тормозным валком, а в пропиточную ванну и сушильную камеру поступает ткань из накопителя, каретка которого перемещается из верхнего положения вниз.

Связующее в пропиточную ванну подается из подпитывающего бачка, который, в свою очередь, пополняется вручную из переносных бачков.

Излишки связующего удаляются с ткани отжимными валками, положение которых фиксируется лимбами.

Электронагреватели типа ТЭН в сушильной камере не имеют прямого контакта с парами растворителей, так как изолированы тонкостенной перегородкой из коррозионно-стойкой стали.

Линия снабжена углекислотной системой пожаротушения и оснащается по требованию заказчика шпулярниками для нитей или жгутов и устройством подачи ткани.

Линии мод. МЛП-305ВТ, МЛП-303ВТ, МЛП-1005ВТ, МЛП-1003ВТ отличаются от рассмотренной выше агрегатным исполнением устройств, закрепленных на специальном фундаменте и не имеющих общей станины. Оба типоразмера линий (на ширину 300 мм и 1000 мм) имеют по два исполнения по высоте камеры: высота 5 м для моделей МЛП-305ВТ и МЛП-1005ВТ и высота 3 м для моделей МЛП-303ВТ и МЛП-1003ВТ. Линии с большей высотой сушильной камеры позволяют реализовать большую скорость получения препрега. Высота сушильной камеры оговаривается при заказе.

Схема линии МЛП-305ВТ показана на рис. 1.5.11. Кроме агрегатного принципа построения линии мод. МЛП имеют следующие основные конструктивные отличия:

1) оснащение устройств подачи ткани обоих типоразмеров линии, приемных устройств линий МЛП-1005ВТ и МЛП-1003ВТ и промежуточных регулируемых валков на линиях МЛП-305ВТ и МЛП-303ВТ системами слежения за базовой кромкой ткани. В системах слежения (рис. 1.5.12) за положением

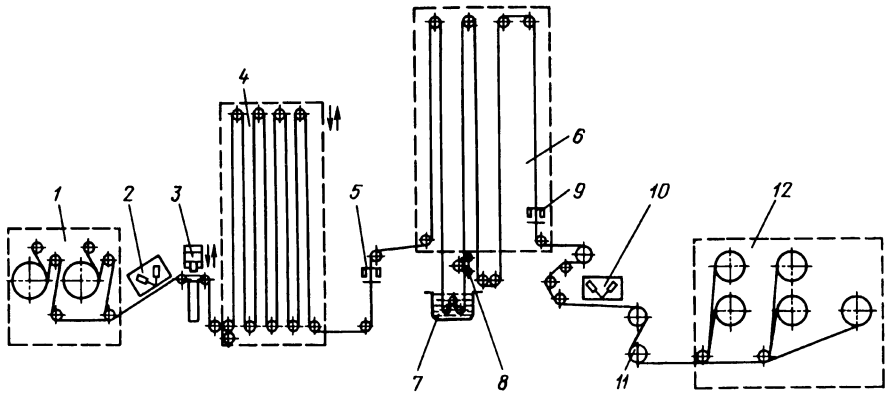


Рис. 1.5.11. Схема линии МЛП-305ВТ:
1 – двухпозиционное устройство подачи ткани; *2* – фотодатчик системы слежения за кромкой, *3* – устройство соединения ткани, *4* – накопитель, *5* – рентгенометрический датчик плотности ткани, *6* – сушильная камера, *7* – пропиточная ванна, *8* – отжимные валки, *9* – измеритель содержания связующего, *10* – вторая система слежения, *11* – протяжное устройство; *12* – приемное устройство

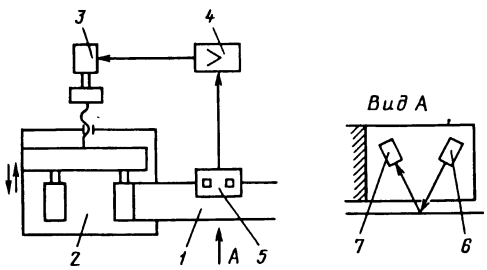


Рис. 1.5.12. Система слежения за базовой кромкой ткани:
1 – разматываемая ткань,
2 – двухпозиционное подающее устройство,
3 – следящий привод подающего устройства с винтовой передачей, *4* – усилитель,
5 – фотодатчик, *6* – источник света,
7 – приемник света

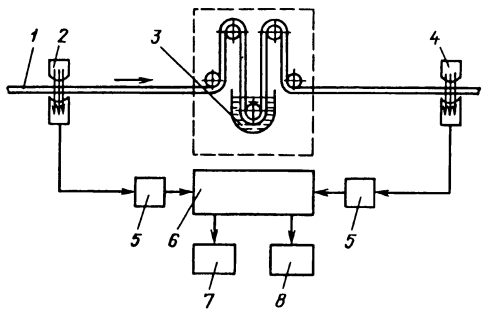


Рис. 1.5.13. Система измерения насоса связующего:
1 – ткань; *2* – датчик плотности ткани,
3 – пропиточная ванна, *4* – датчик наноса связующего, *5* – усилители; *6* – микропроцессор,
7 – монитор, *8* – самописец

базовой кромки ткани следит фотодатчик, работающий по принципу исследования отраженного от ткани модулированного сигнала инфракрасного излучения. Сигнал от датчика через усилитель поступает на электродвигатель постоянного тока и винтовой механизм, перемещающий каретку с расположенными на ней подающими или приемными катушками (или рулонами) в направлении уменьшения рассогласования между заданным и фактическим положением ленты;

2) оснащение линий рентгенометрическими системами контроля наноса связующего. Контроль наноса связующего (рис. 1.5.13) осуществляется по разности ослабления пучка рентгеновского излучения при прохождении через сухую и пропитанную ткани. Линейная зависимость ослабления излучения от количества нанесенного связующего позволяет определить нанос связующего с точностью до одного процента, а микропроцессорное устройство обеспечивает выдачу информации о наносе непосредственно в процентах. Мощность излучения системы не превышает дозы фонового космического рентгеновского излучения и позволяет использовать рентгеновские датчики без применения специальных средств биологической защиты;

3) оснащение линий системой стабилизации температуры в сушильной камере с использованием аналоговых многоточечных при-

боров регулирования температуры и многопроцессорных регулируемых контроллеров, позволяющих иметь в сушильной камере 14 зон регулирования (2 – в камере подсушки и 12 – в трех каналах сушки) с бесступенчатым регулированием количества поступающей энергии, исключающим забросы температуры, характерные для релейных систем "включено–выключено";

4) рециркуляция нагретого воздуха из зоны подсушки, где нет легковоспламеняющихся растворителей, на вход каналов сушильной камеры с целью уменьшения расхода энергии;

5) оснащение линий транспортными емкостями подачи связующего с винтовыми самоочищающимися насосами с регулируемой производительностью. К каждой линии могут быть подсоединены по две транспортные емкости объемом 50 л. Приготовление связующего и заполнение им емкостей осуществляется в отдельном помещении;

6) увеличение высоты между полом цеха и нижним торцем сушильной камеры до двух метров с целью удобства обслуживания;

7) выполнение электроразводки внутри силовых каркасов агрегатов линии.

Для получения препрегов из расплавов смол предназначены линии мод. МЛП-300ГО и УНС-300. Получение препрегов из расплавов имеет преимущество перед растворной технологией как по реализуемой прочности ПКМ, так и по экологическим факторам и потреблению электроэнергии. Технологическая схема линии МЛП-300ГО не отличается от обычно принятой схемы получения препрега с подачей подогретого связующего из фильеры на транспортирующую подложку, покрытую антиадгезионным составом, и совмещением пропитываемых однонаправленных или тканых лент с нанесенным на подложку связующим в каландре, их последующей сушкой до заданной степени желатинизации, охлаждении, разрезкой и приемом на катушки (рис. 1.5.14).

Техническими особенностями линии МЛП-300ГО является применение электронагрева фильеры, роликов, каландров и сушильной печи с системами термостабилизации, включающими аналоговые регулирующие приборы и обеспечивающими бесступенчатое изменение количества поступающей энергии. Заданные температуры сравниваются с сигналом термопар, размещенных в фильере и непосредственно в неподвижных корпусах обогреваемых роликов и каландров, наружная обойма которых вращается относительно корпуса (рис. 1.5.15). Постоянство натяжения подложки по лентотракту линии поддерживается несколькими параллельно работающими приводами постоянного тока, синхронизированными по скоростям друг с другом.

Линия мод. УНС-300 предназначена для получения препрегов с применением порошкообразного связующего, оплавляемого непосредственно на наполнителе, например, углеродной ленте. Схема линии показана на рис. 5.1.16. Порошкообразное связующее из бункера поступает в дозатор, оснащенный регулируемым приводом. Центральный валок дозатора выполнен с несколькими скребками, подающими необходимое количество порошка к сетчатому дну дозатора (см. рис. 1.5.16). Под дозатором протянута углеродная лента, на которую насыпается распыленный порошок связующего. Равномерность распыления достигается путем применения щеток с механическим приводом и электростатического поля, создаваемого генератором высокого напряжения. Положительным электродом поля является специальная сетка, размещенная над лентой, а отрицательным – сама токопроводящая углеродная лента и электрод под ней.

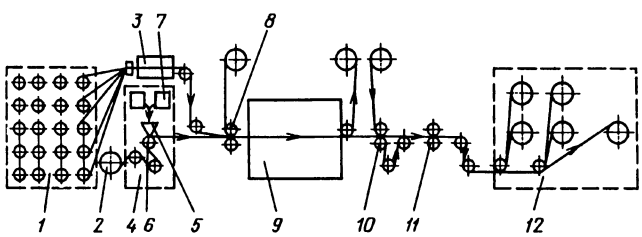


Рис. 1.5.14. Схема линии МЛП-300ГО:

1 – шпулярник; *2* – агрегат размотки подложки; *3* – устройство подсушки жгутов; *4* – агрегат нанесения связующего; *5* – фильера; *6* – обогреваемый ролик; *7* – бак со связующим, *8 – 10* – каландры; *9* – камера сушки; *11* – устройство продольной резки; *12* – приемное устройство

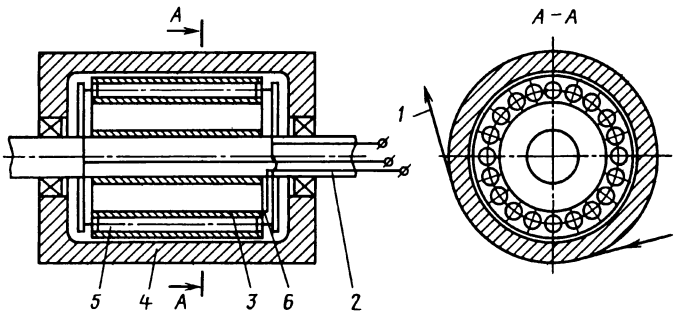


Рис. 1.5.15. Обогреваемый каландр:
1 – ткань, *2* – неподвижная ось, *3* – неподвижный корпус; *4* – вращающаяся обойма; *5* – электронагреватели; *6* – термопара

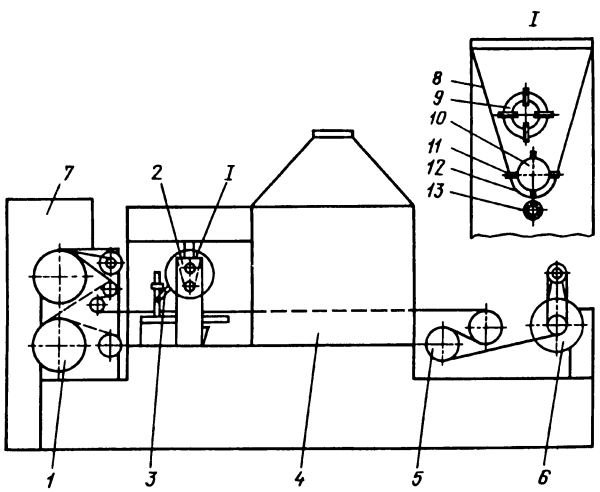


Рис. 1.5.16. Схема линии УНС-300:
1 – двухпозиционное устройство подачи ткани; *2* – дозатор; *3* – высоковольтный электрод, *4* – камера оплавления, *5* – тянущее устройство; *6* – приемное устройство; *7* – пылесос; I – схема дозатора порошкообразного связующего: *8* – корпус; *9* – ворошитель; *10* – центральный вал; *11* – скребок; *12* – днище; *13* – щетка

Лента с нанесенным на нее связующим поступает в термокамеру, где связующее оплавляется при заданной температуре, поддерживаемой системой стабилизации. Скорость протягивания ленты по линии регулируется приводом протяжного механизма. Плотная укладка готового препрега обеспечивается приемным устройством, оснащенным подматывающим механизмом, обеспечивающим постоянство тормозного момента и состоящим из электродвигателя, редуктора, порошковой электромагнитной муфты, работающей в режиме скольжения, и приемного вала, на котором устанавливаются катушки с препрегом.

В зоне дозатора имеется воздуховод, по которому к промышленному пылесосу с циклоном отводится просыпавшийся порошок. Из приемной емкости порошок вручную возвращается в бункер линии.

Для разрезки препрегов на узкие полосы предназначены установки мод. УРСТ-1000 и УРСТ-300М. Схема установки УРСТ-1000 показана на рис. 1.5.17. Установка оснащена подающим устройством, на котором устанавливается рулон с препрегом, режущим устройством, имеющим два приводных вала с дисковыми самоочищающимися ножами. Ножи выставляются на заданную ширину получаемых

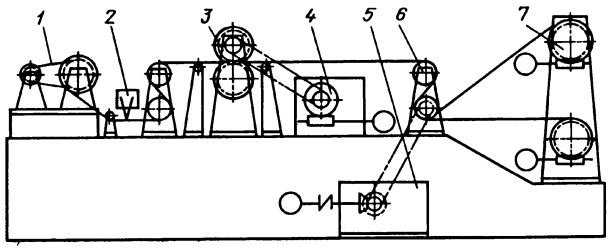


Рис. 1.5.17. Схема установки УРСТ-1000:
1 – устройство подачи ткани; *2* – фотодатчик системы слежения; *3* – режущее устройство, *4* – привод режущего устройства; *5* – привод тянущего устройства; *6* – тянущее устройство, *7* – двухпозиционное приемное устройство

лент. Постоянство положения базовой кромки разрезаемого препрега обеспечивается фотодатчиком, включенным в следящую систему с механизмом поперечного перемещения рулона с препрегом. Разрезанные ленты наматываются на катушки, установленные в шахматном порядке на двух приемных валах. На каждом приемном валу имеется механизм создания осевой силы, который с помощью жестко закрепленного на валу тормозного диска и свободно сидящей на валу катушки обеспечивает постоянный тормозной момент на катушке и требуемую плотность укладки лент. Вращение валов и катушек осуществляется в режиме торможения (скорость протягивания препрега всегда меньше, чем скорость намотки лент на катушки приемного устройства, приемный диаметр которых постоянно изменяется по мере намотки). Режущее устройство установки имеет ограждение.

Установка мод. УРСТ-300М отличается от установки УРСТ-1000 меньшей шириной разрезаемых пропитанных тканей, возможностью резки их неподвижными ножами и разделения раздиром углеродных лент.

Основные характеристики линий и установок для производства препрегов приведены в табл. 1.5.6 – 1.5.9.

Полученный на всех указанных выше линиях и установках препрег предназначен для дальнейшей переработки в изделия на намоточных станках. В связи с этим приемные устройства всех установок рассчитаны на катушки с наружным диаметром до 500 мм, посадочным диаметром 130 мм. Ширина катушки равна ширине получаемых лент препрега.

Требования техники безопасности. Производство препрегов относится к производствам с вредными условиями труда. Для удовлетворения требованиям по предельно допустимым нормам (ПДН) токсичных веществ, выделяющихся из связующих, а также стеклянной и углеродной пыли, помещения, в которых смонтированы линии производства препрегов, должны быть оборудованы приточной и вытяжной вентиляцией, а сами линии в местах выделения вредных веществ должны быть оборудованы местными вентиляционными отсосами. Целесообразно линии для производства препрегов выделять в отдельные производственные участки, изолированные от участка приготовления связующих и участков формообразования изделий на намоточных и выкладочных станках.

Из-за выделения при сушке препрегов взрывопожароопасных паров растворителей (ацетон, спирт, эфиры) и отсутствия необходимых для осуществления технологического процесса электроприборов и аппаратов во взрывозащищенном исполнении электрооборудование линий выполнено по требованию "Правил устройств электроустановок" к классу В-1б по пожаровзрывоопасности, которые ограничивают объем емкостей со связующим на линии по количеству растворителя. Для удовлетворения этих требований помещения, в которых эксплуатируются линии производства препрегов, должны иметь достаточный объем, в котором невозможно достижение 5%-ной концентрации паров растворителя при случайном разливе связующего из пропиточной ванны.

С целью обеспечения пожаро- и взрывобезопасности конструкций предусмотрено оснащение сушильных камер линии технологическими эжекторными вентиляционными системами, электроэнергия которым подается от двух отдельных подстанций, а производительность выбрана из расчета концентрации

1.5.6. Основные характеристики линий мод. УЛС, ПСТ для производства препрегов по растворной технологии

Характеристики		УЛС-3М	УПСТ-300	УПСТ-1000М	УПСТ-1800
Пропитываемый наполнитель		Стеклянные, углеродные, органические жгуты, нити, ткани	Углеродные ткани	Стеклянные, углеродные, органические ткани	Стеклянные, углеродные, органические ткани
Ширина, мм:	однонаправленных лент	5…50	–	–	–
	тканей	100	300	1000	1600
Мощность нагревателей сушильной камеры, КВт		36	100,8	100	142,5
Наибольшая температура сушки*, °С		300	150	150	150
Наибольшая скорость протягивания ленты, м/мин		20	5	2	2
Вместимость пропиточной ванны, л		5	7	10	15
Наибольший расход растворителя, кг/ч		6	9	12	20
Производительность вентиляционной системы сушильной камеры, $м^3/ч$		500	850	1250	200
Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота)		10 000 × 2800 × 4800	7600 × 2250 × 5500	7200 × 5250 × 5500	7520 × 6900 × 5350
Масса, кг		5000	7120	12 000	14 000

* Метод сушки – конвективно-радиационный.

1.5.7. Основные характеристики линий мод. МЛП для производства препрегов по растворной технологии

Характеристики	МЛП-303ВТ	МЛП-305ВТ	МЛП-1003ВТ	МЛП-1005ВТ
Пропитываемый наполнитель	Углеродные, органические, стеклянные ткани			Стеклянные, органические ткани
Ширина, мм	300	300	1000	1000
Мощность нагревателей сушильной камеры, КВт	112	178	185	281
Наибольшая температура сушки*, °С	240	240	150	150
Наибольшая скорость протягивания ткани, м/мин	5	10	3	5
Вместимость пропиточной ванны, л	5	5	15	15
Наибольший расход растворителя, кг/ч	16	30	42	72
Производительность вентиляционной системы сушильной камеры, $м^3$/ч	850	1400	2000	3400
Габаритные размеры, мм (ширина × длина × высота)	11 000 × 4800 × 11 000	11 000 × 4800 × 9000	10 000 × 7125 × 11 000	10 000 × 7125 × 9000
Площадь линии, $м^2$	51,6	51,6	77	77
Масса линии, кг	13 000	15 000	22 000	25 000

* Метод сушки – конвективно-радиационный

1.5.8. Основные характеристики линий мод. МЛП-300Г0 и УНС-300 для производства препрегов по расплавной технологии

Характеристики	Числовые значения	
Пропитываемый наполнитель	Стеклянные, углеродные, органические нити, жгуты, ткани*	Углеродные, ленты и ткани**
Ширина ленты или ткани, мм	300	200
Метод сушки	Конвективный	Конвективно-радиационный
Скорость протягиваемой ленты, м/мин	1...10	1...5
Наибольшая температура нагрева фильеры и сушильной камеры, °С	240	150
Наибольшая температура нагрева каландров и роликов, °С	150	–
Суммарная мощность электронагревателей и двигателей, КВт	85	–
Наибольшее напряжение высоковольтного источника системы электростатического распыления, В	–	50 000
Количество приемных катушек	5	–
Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота)	2000 × 3700 × 2850	5000 × 2700 × 2200
Масса, кг	20 000	3000

* Мод. МЛП-300Г0.
** Мод. УНС-300.

1.5.9. Основные характеристики установок УРСТ-300М и УРСТ-1000 для продольной резки препрегов

Характеристики	Числовое значение
Вид препрега	Стеклянные, углеродные ткани
Ширина ткани, мм	300 / 1000*
Скорость протягивания ткани, м/мин	20 / 10*
Режущий инструмент	Приводные дисковые ножи
Мощность нагревателя режущего устройства, КВт	0,375
Мощность электродвигателей на валках приемного устройства, КВт	2 × 0,375
Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота)	3400 × 1400 × 1800
Масса, кг	2000

* В числителе – для установки УРСТ-300М, в знаменателе – для установки УРСТ-1000.

паров в воздушной смеси не более 25 % нижнего предела взрываемости, в полости тоководов электронагревателей и в электрошкафы подается сжатый воздух, под пропиточной ванной имеются поддоны, не допускающие случайного разлива связующего по большой площади. В электросхемах линии предусмотрена блокировка:

включения электродвигателей сушильной камеры без предварительной продувки ее 5-кратным объемом воздуха, а также при отключенной вентиляции, при отсутствии напряжения в цепи питания любого из электродвигателей вентиляторов, при отсутствии потока воздуха в любом из эжекторов, при отсутствии давления в пневмоцепи подачи воздуха в полости тоководов электронагревателей и электрошкафов, при открытых дверях полостей тоководов сушильной камеры, при включенной системе пожаротушения;

включения привода протяжки при отключенных вентиляторах, при отсутствии напряжения в цепи питания любого из электродвигателей вентиляторов, при включенной системе пожаротушения;

включения вентиляторов при включенной системе пожаротушения.

На линиях должны выполняться общие требования техники безопасности при работе с конкретными видами ПВКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горохович А.И. и др.** Технология производства препрегов для полимерных композиционных материалов: Учеб. пособие. Уфа: УГТУ, 1995. 92 с.

2. **Малкин А.Я., Чалых А.Е.** Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М.: Химия, 1979. 304 с.

3. **Пластики** конструкционного назначения (реактопласты) / Под ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. 304 с.

4. **Практикум** по полимерному материаловедению / Под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1980. 297 с.

5. **Практикум** по технологии переработки пластических масс / Под ред. В.М. Виноградова и Г.С. Головкина. М.: Химия, 1980. 242 с.

Глава 1.6

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Технологическая подготовка производства (ТПП) в общем случае представляет собой совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства, т.е. наличие на предприятии полных комплектов конструкторско-технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для выпуска заданного объема продукции с установленными технико-экономическими показателями (ГОСТ 14.004–83). Например, в самолетостроении почти 20 % мощности предприятия занято ТПП, а именно этот сектор производства определяет трудоемкость и техническое качество авиационной техники.

В конкретных условиях ТПП должна обеспечивать высокоэффективное и высококачественное производство необходимого количества элементов из ПКМ выпускаемых или вновь запускаемых в производство изделий с минимальными приведенными затратами, базируясь на более рациональном использовании трудовых ресурсов и снижении трудовых затрат на единицу продукции.

1.6.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ, ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТПП ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Единая система организации и управления процессом технологической подготовки производства решает следующие основные общие задачи: обеспечение технологичности конструкций изделий, разработку технологических процессов (ТП), проектирование и изготовление средств технологического оснащения, организацию и управление процессом ТПП.

Каждая общая задача состоит из ряда частных задач. Так, обеспечение технологичности конструкций из ПКМ может сопровождаться проведением необходимых научно-исследовательских работ, проектирование ТП и средств технологического оснащения – разработкой схем увязки оснастки по всей технологической цепи (формование деталей, узловая, агрегатная и общая сборка), расчетом технически обоснованных материальных и трудовых нормативов, необходимого количества оборудования, оснастки и производственных площадей.

Объем ТПП зависит от массы и количества агрегатов, узлов и деталей, а также их размерных классов, технологичности конструкции, масштаба, технического уровня и оснащенности предприятия, на котором планируется организация серийного производства. ТПП осуществляется во многом в соответствии со сложившимися традициями и существующим оснащением конкретного предприятия, поэтому трудоемкость изготовления и качество производимых разными предприятиями изделий различны.

Основные особенности ТПП на предприятиях машиностроения обусловлены:

частой сменой объектов производства, постоянным совершенствованием и увеличением их средней сложности;

широкой номенклатурой обрабатываемых деталей и узлов и применяемых материалов (ПКМ, клеи, пенопласты, сотовые и другие заполнители);

широким применением в конструкциях изделий крупногабаритных сложноконтурных монолитных и маложестких деталей и узлов;

интегральных конструкций, сотовых и многослойных клееных изделий, конструктивно-технологическое проектирование которых часто связано с необходимостью проведения НИР;

повышенными требованиями к точности элементов конструкции, их взаимному расположению и качеству обрабатываемых поверхностей;

мелкосерийным, серийным или крупносерийным характером производства.

Статистически распределение трудоемкости ТПП по видам работ составляет:

отработка технологичности конструкций – 5 %;

проектирование технологической оснастки – 15 %;

проектирование технологических процессов – 17 %;

организация и управление ТПП – 8 %;

изготовление технологической оснастки – 55 %.

В целях резкого снижения (в 1,5 – 2 раза) себестоимости серийно выпускаемых изделий требуется качественно новый подход к системе ТПП и организации производства, основой которых являются:

создание автоматизированной системы технологической подготовки производства конструкций из ПКМ (АСТПП), при которой более 55...60 % всего объема инженерных работ выполняется автоматизированно, обеспечивая сокращение сроков ТПП;

постоянное совершенствование существующих и внедрение новых процессов, в том числе получения препрегов, формования деталей, первичной (выклеечной) сборки интегральных конструкций, механической обработки, контроля производственных процессов и изделий, основанных на новейших достижениях науки и техники;

увеличение парка оборудования, в первую очередь оборудования с программным управлением (СПУ), и улучшение его качества;

комплексная стандартизация элементов технологической оснастки и ТП;

организация участков с поточными методами производства;

реконструкция цехов подготовки производства по изготовлению технологической оснастки.

Для достижения наибольшей эффективности ТПП, ее оперативности в своевременном и качественном изменении технического уровня и производственной структуры при постановке нового изделия необходимо:

предопределять ТПП на этапах технического и рабочего проектирования непосредственно в КБ, где параллельно с отработкой на технологичность, определяются проблемные вопросы и организуется подготовка к их освоению и внедрению силами технологических служб серийных предприятий с привлечением отраслевой, академической или вузовской науки; определяются перечни прогрессивного оборудования (рис. 1.6.1);

обеспечивать поступление документации от главного конструктора, полностью прошедшей технологический и нормативационный контроль (состав изделия на машинных носителях с обеспечением максимальной унификации деталей по типоразмерам и по отдельным геометрическим параметрам);

КБ совместно с отраслевыми НИИ и серийными заводами при проектировании новых изделий должны создавать предпосылки, обеспечивающие реализацию 60...85 % трудоемкости изготовления деталей и узлов из ПКМ на оборудовании, в том числе 40...50 % на оборудовании с ПУ, при этом уровень механизации и автоматизации технологических процессов должен составлять 70...80 %.

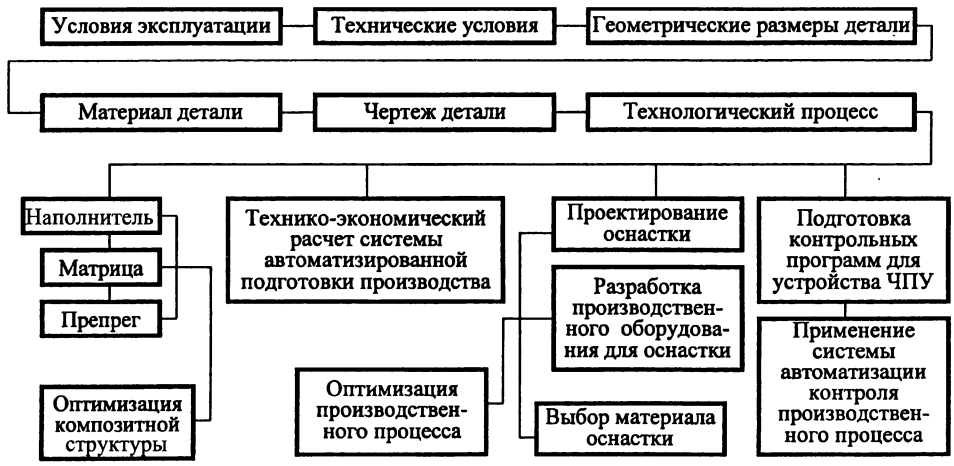


Рис. 1.6.1. Структурная схема информационного взаимодействия в системе автоматизированной подготовки производства

В качестве общих методических основ ТПП выступают три общих метода: системный подход, регуляция и моделирование. Указанные методы, несмотря на существенное различие, взаимно дополняют друг друга при формировании объекта производства. Упомянутые методы применительно к производству конструкций из ПКМ рассмотрены в специальной литературе, где представлены аналитические зависимости и имитационные модели для решения задач ТПП.

В качестве специальных используют четыре метода: инженерной системогенетики, прогностики и упреждающих решений, информатики, а также технико-экономического анализа.

Интенсификацию ТПП, особенно средств оснащения и механизации, обеспечивают методы классификации, унификации, типизации, модулирования, параметрирования и взаимозаменяемости.

При ТПП часто возникает необходимость принятия упреждающих (опережающих) решений при неполном объеме на данный момент разработанной конструкторской документации, включая основное изделие, технологическую оснастку и др. К этим же вопросам часто относится разработка и нормирование типовых маршрутных ТП для технико-экономического обоснования нового для ряда предприятий производств из ПКМ, разработки графиков проектирования и изготовления оснастки, размещение заказа на приобретение материалов для конструкций, оснастки и др.

Таким образом, в этих работах, как правило, участвуют проектно-конструкторские, технологические службы предприятия, цеха, плановые органы и органы снабжения, предприятия-смежники, НИИ и т.д.

1.6.2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Согласно ГОСТ 14.205–83 технологичность конструкции – это приспособленность конструкции изделия к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ. Обеспечение технологичности конструкции изделия – это функция подготовки производства, предусматривающая взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат и сокращение времени на производство, обслуживание и ремонт изделий (ГОСТ 14.201–83). Указанная функция подготовки производства включает технологический контроль конструкторской документации с внесением в нее необходимых изменений.

Особенность и сложность проектирования изделий из ПКМ, заключающаяся в создании конструкции и материала одновременно в неразрывной связи, предопределяет первичное обеспечение технологичности изделий. Технологичность конструкции вплоть до выпуска

рабочего чертежа обеспечивается в процессе взаимодействия технолога и конструктора с использованием компьютерной информационной системы.

На этапе ТПП оцениваются технологические возможности производства изделия, проводится технологический контроль конструкторской документации (по ГОСТ 14.206–73) и вырабатываются рекомендации по улучшению конструктивного исполнения изделия вплоть до достижения базовых показателей технологической рациональности и конструктивной преемственности. При этом снижение массы конструкции из ПКМ не должно быть самоцелью, т.е. осуществляться любой ценой. Технология изготовления всегда должна быть по возможности простой (малооперационной) с оптимальным применением средств механизации и автоматизации.

Структурная оптимизация при отработке конструкций из ПКМ на технологичность всегда предполагает избирательность вопроса об объеме, режиме и приоритете отработки составных частей изделия, вследствие чего можно выделить четыре категории конструкции.

К первой категории относят составные части изделий с требованиями особо высокого качества (точности, надежности и безопасности), для которых вероятность отказов, приводящих к критическим дефектам (катастрофичное разрушение, нештатное срабатывание или отказ жизненно важных систем и оборудования), должна быть ничтожно мала. К ним относятся высоконагруженные конструкции, подлежащие полной отработке на технологичность на всех уровнях детализации изделия и всех стадиях и этапах разработки конструкторской документации (КД).

Ко второй категории относят составные части с требованиями высокого качества (точности, надежности и безопасности), отказ которых приводит к значительным дефектам. Это в основном средненагруженные конструкции, которые подлежат полной отработке на технологичность на всех уровнях детализации изделия и на большинстве стадий разработки КД (эскизный и технический проекты, разработка рабочей документации). Для подтверждения работоспособности конструкций второй категории визуального осмотра недостаточно.

Составные части, требующие высокого качества и точности, отказ которых приводит к малозначительным дефектам, относят к третьей категории. Это в основном слабонагруженные конструкции, которые подлежат отработке на технологичность на стадиях рабочего технического проекта и рабочей конструкторской документации. Примером таких конструкций могут служить панели интерьера.

Ненагруженные конструкции типа кожухов механизмов принадлежат к четвертой категории.

Одним из основных способов повышения технологичности изделий является правильный выбор ПКМ, состав, структура и возможности переработки которых в первую очередь обусловливают признаки технологической рациональности конструкций. Рекомендуемый ГОСТ 14.201–83 перечень показателей оценки технологичности изделий из ПКМ включает:

1) трудоемкость изготовления изделия;

2) удельную материалоемкость изделия;

3) технологическую себестоимость изделия;

4) среднюю оперативную трудоемкость технологического обслуживания (ремонта) функциональной конструкции из ПКМ;

5) среднюю оперативную стоимость технического обслуживания (ремонта) функциональной конструкции из ПКМ;

6) удельную трудоемкость изготовления сборочных единиц;

7) коэффициент применяемости материала;

8) коэффициент унификации конструктивных элементов;

9) коэффициент сборности (для сборочных единиц).

Предпочтительным вариантом конструкции для снижения трудоемкости сборки является интегральная конструкция (ИК).

В общем случае – это конструкции, состоящие и собираемые из семейства неотвержденных или частично отвержденных структурно обособленных частей, не исключая при этом и отвержденные компоненты с последующим окончательным формированием всех составляющих в единое целое (узел или агрегат) за один технологический цикл.

Сама сборка из "сырых" или "полусырых" частей отличается от сборки жестких (не теряющих форму) металлических деталей, включая методы базирования, вследствие чего ее можно определить как выклеечную или первичную сборку, предшествующую вторичной, т.е. узловой или агрегатной сборке. Последняя для конструкций из ПКМ, в отличие от первичной, близка к традиционной сборке.

Ограничением на применение ИК в некоторых случаях является чрезмерная сложность, недостаточная производственная и эксплуатационная контролепригодность или невысокие характеристики, получаемые в результате сополимеризации, например, внутренних силовых элементов типа балок.

При отработке изделий из ПКМ на технологичность речь практически всегда идет о системной отработке, в первую очередь, с позиции технологии узловой и агрегатной сборки, потому что применение ПКМ позволяет значительно (до 50 %) снизить трудоемкость сборочных работ.

При проектировании предусматривается рациональное технологическое членение изделия на агрегаты, отсеки, секции, узлы и панели. При этом важными требованиями являются получение минимального количества стыков; стремление к получению минимально возможных по габаритным размерам конструкций, которые в большинстве случаев ограничиваются возможностями применяемого оборудования; рациональным выбором баз, обеспечивающим возможность их использования в качестве технологических.

С целью механизированного изготовления ИК при их конструктивно-технологическом членении выделяют в основном компоненты четырех классов, образующие компоновочные модули для первичной (выклеечной) сборки конструкций (табл. 1.6.1):

в крупногабаритных конструкциях – это секции замкнутого контура, представляющие собой тела вращения или детали сложной геометрической формы, например, секции кессона аэродинамической поверхности или внутренние контуры многостеночных балочных конструкций;

трехслойные панели;

утолщенные участки, например, полки балок, а также однонаправленные пояса, которые могут быть изготовлены методом автоматизированной выкладки;

гладкие обшивки, стенки.

Вопросы технологичности конструкций, получаемых методами намотки, выкладки и пултрузии, рассмотрены в специальной литературе.

Практика показывает, что ИК могут рассматриваться как наиболее общий случай в ряду конструктивных решений из ПКМ.

Укрупненная схема системной отработки ИК на технологичность приведена на рис. 1.6.2, где наряду с производственной технологичностью отмечена и эксплуатационная технологичность.

Большое значение имеет вид соединения конструкций из ПКМ. При этом необходимо учитывать, что по массе и технологической эффективности соединения располагаются в следующем порядке: интегральные, интегрально-клеевые, клеевые, прошивочные и клеепрошивочные, клеемеханические, механические. Последние рекомендуется применять преимущественно для съемных элементов конструкций.

1.6.3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

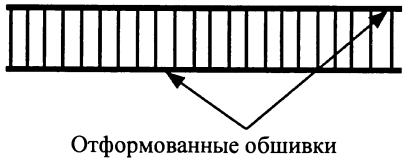
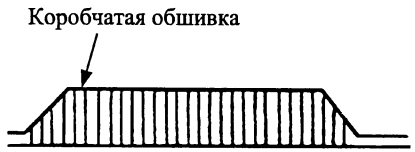
Основным направлением перспективного проектирования ТП в области ПКМ является совершенствование технико-технологической базы действующего производства на основе результатов научно-прикладных исследований. При этом центральными задачами технологического проектирования следует считать:

применение рациональных технологических методов для заготовительных, формовочных, обрабатывающих и сборочных операций, позволяющих более интенсивно и экономично их осуществлять в производственных условиях;

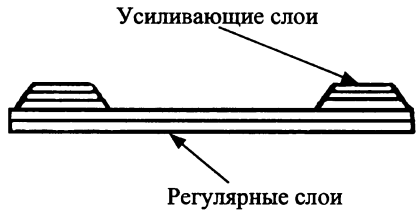
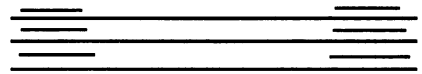
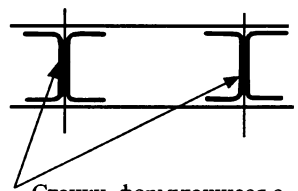
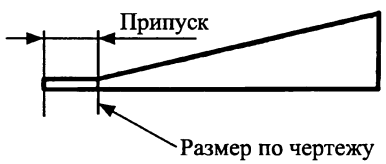
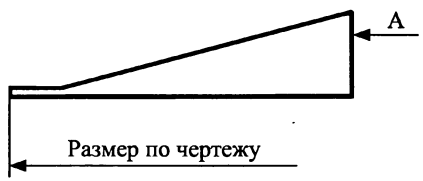
обеспечение преемственности технологических решений, позволяющей значительно сократить сроки и расширить масштабы распространения прогрессивных технологических методов на предприятиях машиностроения и реализовать политику ресурсосбережения, в первую очередь, путем сокращения ручного труда и энергозатрат. Последнее обеспечивается благодаря механизации и автоматизации работ, а также перспективным конструктивно-технологическим решениям, в том числе широким применением интегральных конструкций, перспективных материалов, эффективного оборудования и разработкой бесподгоночных технологий при узловой (агрегатной) сборке конструкций из КМ и др.

На процесс проектирования и применения ТП оказывают влияние следующие определяющие факторы: особенности ПКМ как конструкционных материалов; конструктивно-технологические особенности ИК; многовариантность процессов и их технологическая устойчивость; взаимосвязь проектирования ТП с процессом конструирования изделия, с разработкой средств технологического оснащения (СТО), с формой организации ТП.

1.6.1. Примеры технологичных и нетехнологичных конструкций из ПКМ

Тип конструкции	Технологично	Нетехнологично
Криволинейные панели с ребристым заполнителем (капотные крышки)	Интегральная конструкция с трубчатым заполнителем 	Клееная конструкция с гофровым заполнителем 
Слабонагруженные сотовые панели без особых требований к качеству лицевой поверхности	Интегральные конструкции 	Клееная конструкция 
Слабонагруженные клеевые трехслойные сотовые панели		

Продолжение табл. 1.6.1

<table>
<tr><th>Тип конструкции</th><th>Технологично</th><th>Нетехнологично</th></tr>
<tr><td>Местные усиления обшивок (под узлы навески)</td><td>
</td><td>
Чередование регулярных и усиливающих слоев</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Многонервюрные каркасы интегральной конструкции (рулей направления и высоты, элеронов и др.)</td><td colspan="2">1. Присоединение поперечных стенок (нервюр)</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
Стенки, формующиеся с обшивками</td></tr>
<tr><td colspan="2">2. Хвостовая часть каркаса</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

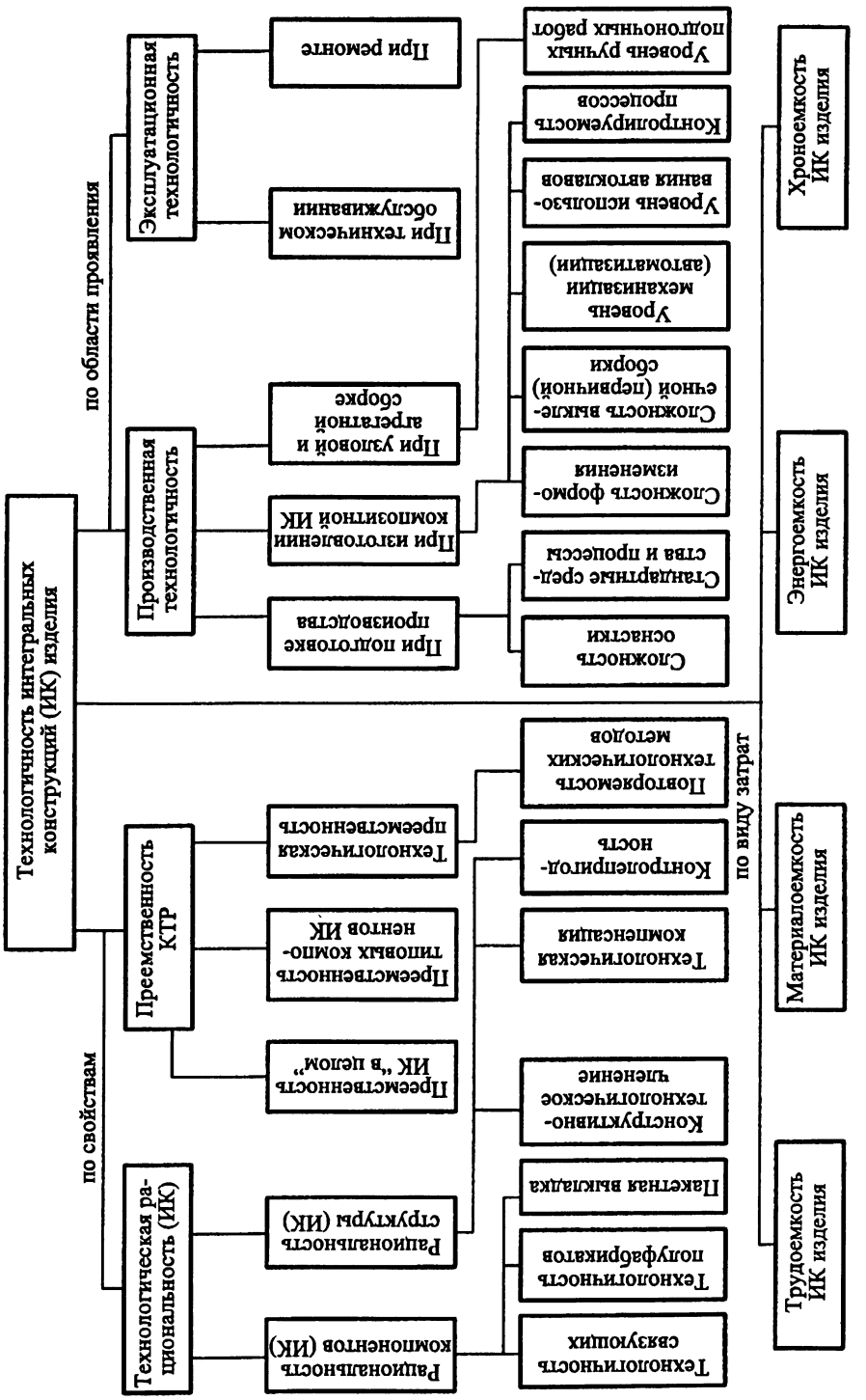


Рис. 1.6.2. Общая схема системной отработки ИК из ПКМ на технологичность

Поскольку композиционный материал и конструкция из него производятся одновременно, в производстве изделий из ПКМ имеется две группы технологических задач: одна, связанная с формированием и получением композиционно-волокнистого материала, а другая – с формованием и получением системы основных и свободных поверхностей соответствующей геометрии и точности, с заданными характеристиками качества. Решения технологических задач обеих групп должны обеспечивать максимальную экономическую эффективность.

Для изготовления деталей и сборки изделий в единичном производстве достаточно иметь конструкторскую документацию, маршрутное или маршрутно-операционное описание технологического процесса, либо перечень полного состава технологических операций без указаний переходов и технологических режимов*. Для серийного и массового производства, кроме маршрутной карты, обязательно разрабатывается технологическая карта с пооперационным описанием формообразования, обработки, сборки.

Структурная общность разнообразных технологических процессов может быть выражена в первом приближении линеализованной технологической структурой процесса производства изделий из ПКМ, в которую входят следующие операции: контрольная, аппретно-термическая, химическая, пропиточная, подготовительная, формирование неотвержденных заготовок деталей или конструкций (намотка, выкладка, напыление и др.), предварительное отверждение, механическая (предварительная), монтажно-приформовочная, формовочно-термическая (отверждение), слесарно-демонтажная, механическая (окончательная), монтажно-клеевая, термостабилизационная (кондиционирование), контрольная, восстановительная (лакировка).

Отличительной чертой технологии производства изделий из ПКМ, как и другой совершенной технологии, также является многовариантность, под которой подразумевается возможность получения заданных свойств детали узла и агрегата различными способами. Одна из задач, решаемых технологами, состоит в поиске оптимальных решений, позволяющих обеспечить выпуск при технологической устойчивости процессов запланированной продукции с наименьшими материальными и трудовыми затратами.

Некоторые сравнительные оценки в баллах ряда методов производства стеклопластиковых изделий по отечественным и зарубежным данным представлены в табл. 1.6.2.

Стоимость технологического оборудования, млн. долл., приведена ниже:

Автоклав средних размеров	0,8
Машина для выклейки ленты (умеренной сложности)	1,5
Установка с ЧПУ для раскроя препрегов и маркировки	0,4
Водоструйный резак и робот	0,3
Многокоординатный станок с ЧПУ для резки сотоблоков	0,3
Установка ультразвукового контроля	0,4

* Под технологическим маршрутом (межцеховым или внутрицеховым) понимают последовательность прохождения заготовки, детали или сборочной единицы по цехам и производственным участкам предприятия при выполнении технологического процесса изготовления или ремонта (ГОСТ 14 004–83).

1.6.2. Технико-экономическая оценка основных методов производства стеклопластиков

Способ формирования и формования изделий	Стоимость оборудования	Производительность	Квалификация рабочих	Сложность изделия	Прочность изделия
Ручная выкладка	1	2	10	9...10	3
Автоклавный	3	1	6	9	6
Напыление	4	4	10	9	2
Пултрузия	7	9	2	2	10
Прессование	8...9	8	4	5...8	7
Намотка	6	6	2	4	10

Примечание. Показатели приведены в баллах, высший балл равен 10.

Согласно ГОСТ 14.301–83 и РД 50-54-93–88* устанавливаются следующие виды технологических процессов по форме организации: единичный, типовой, групповой.

По освоенности процессов они подразделяются на базовые (перспективные) и рабочие.

Базовый технологический процесс – это процесс, принимаемый за исходный, при разработке конкретного технологического процесса. При этом к высшей категории относятся технологические процессы, которые по своим показателям соответствуют лучшим мировым и отечественным достижениям или превосходят их.

В авиационной промышленности базовый технологический процесс определяется как директивный технологический процесс (ДТП), который является составной частью директивных технологических материалов (ДТМ).

Разработка директивных технологических материалов. На этапе рабочего проектирования изделия параллельно с отработкой технологичности его конструкции НИИ и ОКБ проводят совместные экспериментальные и научно-исследовательские работы по изготовлению конструкций из ПКМ опытного изделия и обеспечению серийного производства. ДТМ на этом этапе разрабатываются под руководством НИИ. ДТМ являются основными руководящими материалами при освоении серийного производства нового изделия, для разработки рабочих технологических процессов по изготовлению нового изделия, ТПП и его организации, основными материалами по техническому переоборудованию цеха ПКМ, исходными материалами для совместных работ ОКБ, НИИ и серийных заводов при освоении серийного производства. Основными положениями ДТМ, обеспечивающими решение поставленных задач, являются: применение новейших прогрессивных методов и средств изготовления и контроля; максимальная механизация и автоматизация процессов изготовления препрегов, формования, первичной (выклеечной) сборки интегральных конструкций и контроля; сокращение до минимума подгоночных и доводочных работ; обеспечение надежного контроля деталей, узлов и агрегатов в процессе производства прогрессивными методами и средствами; обеспечение взаимозаменяемости изготовляемых деталей и узлов простыми и доступными средствами; использование типовых и групповых технологических процессов; обеспечение максимальной законченности узлов и агрегатов из ПКМ, поставляемых в сборочные цеха; широкое использование существующего на заводе оборудования и его модернизация, применение высокопроизводительного оборудования и эффективной оснастки. В ДТМ на производство конструкций из ПКМ должна быть включена следующая документация: классификаторы деталей узлов и агрегатов; директивные материалы по технологическим процессам или директивные технологические процессы (ДТП); схемы выклеечной сборки интегральных конструкций с перечнем и схемами оснастки; схемы увязки сложных узлов и агрегатов, а также технологической оснастки; перечень новых технологических процессов; технологические условия на проектирование сборочной и контрольной оснастки для принципиально новых конструкций узлов и агрегатов (например, килей и стабилизаторов самолета), перечень необходимого оборудования для производства конструкций из ПКМ; технические задания на проектирование нового оборудования, перечень средств контроля; перечень научно-исследовательских работ, подлежащих выполнению для обеспечения серийного производства конструкций из ПКМ.

ДТП относят к разряду типовых перспективных ТП и используют в качестве директивной информационной основы при разработке рабочих технологических процессов (РТП). Состав этапов проектирования ДТП приведен в табл. 1.6.3.

Типизация процессов – основное направление технологической унификации, предусматривающей в первую очередь классификацию конструкций.

Главной целью классификации является определение всей номенклатуры типовых деталей. Детальная классификация конструкций из ПКМ и волокнистых композитов представлена в работах В.Ф. Забашты, А.В. Гайдачука и др.

В основе классификации лежат конструктивные признаки, так как при разработке ТП исходным для технолога является чертеж детали (узла). В процессе последующей классификации присоединяются и технологические признаки.

* Классификация, разработка и применение технологических процессов (рекомендации)

1.6.3. Состав этапов проектирования ДТП и РТП

Этап проектирования	Применяемость этапа при проектировании	
	ДТП	РТП
Анализ исходных данных для разработки ТП	+	+
Классификация и группирование объектов производства	+	+
Разработка ведомостей групп перерабатываемых объектов производства и их качественная оценка	+	
Анализ типовых представителей объектов производства	+	
Выбор оптимального варианта структуры ТП	+	
Выбор действующего ДТП (поиск аналога)		+
Выбор препрегов и методов их изготовления	+	
Выбор технологических баз, методов формования и первичной сборки	+	
Разработка схем технологической оснастки на сложные конструкции	+	
Выбор методов механической обработки	+	+
Выбор методов производственного контроля изделий	+	+
Составление технологического маршрута	+	+
Разработка операций	+	+
Расчет точности, производительности и экономической эффективности вариантов ТП	+	+
Нормирование ТП		+
Оформление документации на ТП	+	+

К конструктивным признакам относят: наименование типового элемента конструкции (обшивки, балки, панели, каркасы и др.); конструкция и форма детали (узла); материал, размерный класс.

К технологическим признакам относят: метод формировочной или формовочно-термической операции; автоматизацию процесса наслоения; метод соединения (клеевой, бесклеевой) и др.

К каждому ДТП прилагается ведомость перерабатываемых деталей либо сборочных единиц. При этом выделяется наиболее характерный и сложный для данной группы объект – типопредставитель, на который и разрабатывается данный ДТП. Его рекомендуется расположить в ведомости под первым номером.

Разработка ведомостей к каждому ДТП представляет собой трудоемкий процесс, поэтому АСТПП должна быть разработана таким образом, чтобы этот вид технологической документации был получен автоматизированно.

Структурно ДТП состоит из комплекса типовых (на общие виды работ) и индивидуальных технологических подпроцессов. К типовым подпроцессам относят приготовление связующего, изготовление препрегов, формовочно-термические процессы, а в случае деталей средней сложности – также процессы механической обработки, контроля и др.

Укрупненную оценку общей эффективности разработанных ДТМ можно производить по двум показателям: среднестатическому показателю общей удельной трудоемкости $K_{уд}$ и показателю общего среднего уровня механизации и автоматизации $K_{м(а)}$.

Разработка рабочих технологических процессов (РТП). На этапе подготовки и освоения серийного производства работники технологической службы по ПКМ серийного

завода на основе ДТМ разрабатывают рабочие ТП изготовления головной серии и затем развернутого серийного производства.

В общем случае при проектировании РТП производства объектов из ПКМ в распоряжении технолога имеются следующие исходные данные:

рабочие чертежи изделия (детали) с конструкторско-технологической спецификацией (КТС), прилагаемой к чертежу, в которых указаны размеры и соотношения, характеризующие геометрию и точность взаимного расположения всех основных и свободных поверхностей, допуски и параметры шероховатости поверхностей, материал и основные его структурные характеристики (схема армирования, число слоев и др.);

технические требования на ПКМ с развернутой характеристикой (составляющие компоненты, их относительное содержание, структурные параметры, текстурные характеристики, характеристики исходных материалов, их технологические свойства и др.);

технические требования на готовое изделие и его испытания; справочные сведения о технологических методах переработки ПКМ и характеристики их технологических возможностей;

данные об оборудовании и технологической оснастке (каталоги, паспорта, альбомы и др.);

нормативы на изготовление конструкций из ПКМ;

директивные либо типовые ТП;

производственное задание (программа выпуска) и характер производства (мелкосерийное, серийное или массовое);

общая производственная обстановка (наличие оборудования и его состояние, собственные производственные возможности и т.п.).

При разработке серийного РТП необходимо руководствоваться требованиями:

заводских стандартов на разработку и контроль серийных РТП, а также наличием и внедрением комплекса серийного оснащения в объеме запланированной программы выпуска;

обеспечения необходимых требований пожарной безопасности;

обеспечения выполнения экологических требований;

обеспечения выполнения требований безопасных условий труда;

техпроцесс должен соответствовать утвержденному ДТП.

Во всех видах серийных РТП отражаются:

организация входного контроля материалов и полуфабрикатов;

описание методов и средств контроля технологических параметров и получаемого изделия;

используемые виды оборудования, оснастки, инструмента, а также организационной оснастки для хранения и транспортировки деталей, узлов и агрегатов;

квалификационные требования к исполнителям операций;

отнесение данного процесса к особо ответственным технологическим процессам (ООТП), включая производство особо ответственных конструкций типа килей, стабилизаторов (в процессе делается отметка об этом);

при наличии соответствующего ДТП делается ссылка на него;

согласование со службами главного контролера и главного метролога.

В РТП более детально описано техническое содержание работ по сравнению с ДТП (разбивка на более мелкие операции, в том числе указан порядок установки и закрепления; большая насыщенность графическим материалом, отображающим, например, порядок и процесс наслоения армирующих слоев; большая детализация по применяемому оснащению, в том числе по мерительному и режущему инструменту и др.).

Утверждение РТП проводится в установленном на предприятии порядке.

1.6.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ

Проектирование и изготовление средств технического оснащения является наиболее ресурсоемким элементом ТПП, который оказывает определяющее воздействие на технико-экономический уровень и гибкость производственной системы. Поэтому при подготовке производства ему уделяется особое внимание.

Технологическое оборудование для изготовления конструкций из ПКМ (пропиточные установки, намоточные и выкладочные станки, прессы, печи, автоклавы, гидрорезные установки, фрезерные и сверлильные станки, контрольно-измерительные машины и др.) является крупногабаритным, металлоемким, снабженным системами автоматизации и потому изготавливаемым на специализированных предприятиях.

Назначение технологической оснастки определяется методами формообразования (формирования) и формования изделий, что тесно связано и с применяемым оборудованием.

В производстве конструкций из ПКМ можно выделить основные разновидности оснастки:

для выкладки, контактного и вакуум-автоклавного формования;

оправки для намотки и плетения (заполнителей, преформ (заготовок) и деталей);

оснастка для выклеечной (первичной), а также агрегатной (вторичной) сборки;

оснастка для пропитки волоконных заготовок под низким и высоким давлением;

оснастка для изготовления деталей методом напыления;

оснастка для ротационного формования;

пресс-формы для прямого и литьевого прессования;

оснастка для термокомпрессионного формования;

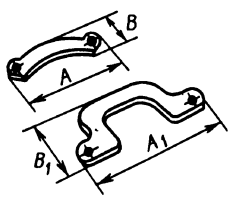
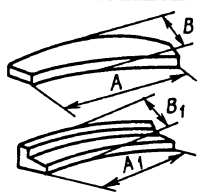
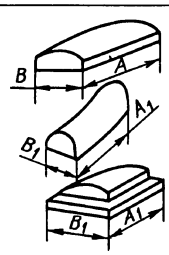
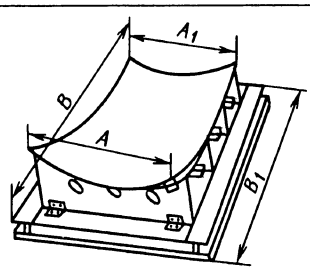
фильеры для пултрузии и экструзии;

штамповая оснастка;

контрольная оснастка.

По форме оснастку укрупненно подразделяют на обводо- и необводообразующую (табл. 1.6.4). По используемому материалу технологическую оснастку удобно разделить на три основных класса: неметаллическая, металлическая, комбинированная.

1.6.4 Типовая обводообразующая оснастка

Наименование оснастки	Типовая оснастка для данной группы	A / A_1	B / B_1
Рубильники: ложементы стапелей и приспособлений для сборки агрегатов из КМ		200 / 1000	200 / 2000
Оправки для профильных деталей		200 / 2000	150 / 1200
Обтяжные пуансоны: болванки для оболочек (масок) оснастки		1000 / 7200	500 / 1600
Формовочно-склеечная оснастка		3000 / 600	12 000 / 10 000

Наиболее распространенными материалами для изготовления технологической оснастки в производстве конструкций из ПКМ являются сталь, алюминий, стекло- и углепластик.

Металлическую оснастку из стали и алюминия изготовляют для серийного производства из листа методами штамповки, а также литьем или из отдельных блоков методами механической обработки. Стальная и алюминиевая оснастки обладают преимуществами: долговечностью, высоким качеством поверхности.

В качестве недостатков можно отметить большую массу, высокую теплоемкость, значительное тепловое расширение, издержки на механическую обработку. Наиболее перспективными материалами для создания средне- и крупногабаритной оснастки является ПКМ, в том числе со стекло- и углепластиковыми армирующими наполнителями.

Углепластиковая оснастка отличается малым температурным коэффициентом линейного расширения ($1{,}1 \cdot 10^{-5}$ 1/°С в интервале 24...149 °С) и является облегченной.

Оснастка для формования и склеивания. Как правило, оснастка для формования при вакууме и высоком давлении имеет поверхность одинарной и двойной кривизны с выходом на наружные обводы агрегатов. Основные требования к оснастке, используемой при формовании КМ в автоклаве, следующие: экономичность, долговечность, низкая масса, минимальный цикл изготовления конструкции и минимальные энергетические затраты, точность конструкции и др. Долговечность оснастки зависит от жесткости поверхности материала и прочности оснастки. Для серийного производства требование к увеличению ресурса оснастки особенно важно. Уменьшение массы оснастки имеет большое значение при ее перемещении в автоклав и из него. Оснастка должна обладать хорошей теплопроводностью. На точность влияет перепад теплового расширения между оснасткой и конструкцией, а также распределение температуры над поверхностью оснастки и ее теплоемкость.

Другой фактор, оказывающий влияние на точность, – это жесткость оснастки в условиях обработки в автоклаве. Недостаточно жесткая оснастка может вследствие неравномерного распределения тепловых колебаний, локального давления над ее поверхностью деформироваться.

Наиболее широко используемой конструкцией оснастки является цулага (формообразующая оболочка). Пример такого типа оснастки приведен в табл. 1.6.4 (оснастка для формования и склеивания). В качестве опорной конструкции выступает рама с набором ложементов. Поверхность формообразующей оболочки (маски, обшивки) формы является базовой. Эта конструкция обеспечивает высокую производительность, равномерное распределение температуры, изготовление деталей высокого качества, а также снижение экономических затрат. Прижатая к формообразующей оболочке (ФО) деталь формируется под действием давления в автоклаве. ФО также должна обеспечить полную герметичность, чтобы воздух под давлением не попадал в конструкцию.

Применение такой оснастки взамен традиционной металлической позволяет повысить качество формуемых деталей благодаря приближению температурных коэффициентов линейного расширения материалов детали и оснастки, уменьшить трудоемкость изготовления стеклопластиковой оснастки по сравнению с металлической монолитной и каркасной соответственно в 4 – 6 раз и в 2 – 3 раза, сократить цикл подготовки производства в 1,5 – 2 раза, уменьшить расход электроэнергии в процессе формования деталей из ПКМ.

Систему классификации формообразующей оснастки (табл. 1.6.5) можно использовать при решении ряда задач:

при подготовке основных данных для технико-экономического обоснования (ТЭО) производства изделий из ПКМ;

при расчете потребности материалов для изготовления оснастки;

при укрупненном расчете трудоемкости подготовки производства деталей из ПКМ;

при использовании принципа аналогов при проектировании оснастки;

при использовании банка данных при автоматизированном проектировании оснастки;

при расчете потребности основных материалов для изготовления деталей из ПКМ;

при использовании типовых технологических процессов при разработке технологической документации на детали из ПКМ.

Наиболее перспективной областью применения оснастки из ПКМ в авиастроении является формование в серийном производстве одно- и трехслойных панелей, люков, крышек, створок, элементов крыла, продольно-поперечного набора фюзеляжа, кессона крыла, киля, стабилизаторов и других конструктивных элементов ЛА.

1.6.5. Классификационные признаки оснастки и применение их при решении различных задач

Наименование классификационных признаков	Код	Решаемые задачи						
		1	2	3	4	5	6	7
Тип конструкции детали	K_{d3}							
Тип базовой поверхности детали	K_{d3}							
Режим формования детали	K_{d2}							
Основной материал детали	K_{d1}							
Метод обеспечения режима формования	K_1							
Базовая поверхность формования	K_2							
Размерная характеристика:	K_3							
длина, мм	K_{31}							
ширина, мм	K_{32}							
высота, мм	K_{33}							
Материал ФО	K_4							
Толщина ФО, мм	K_5							
Метод изготовления ФОП	K_6							
Тип и материал поддерживающего каркаса	K_7							

К технологической оснастке для изготовления интегральных конструкций (ИК), например, многонервюрных каркасов рулей высоты и направления, элеронов и др., кроме общих требований предъявляется ряд дополнительных требований. Оснастка должна быть расчленена на приемлемое число компонентов, обеспечивающих формуемость модулей ИК без образования остаточных напряжении при различных температурных коэффициентах линейного расширения КМ и компонентов оснастки; правильность силового замыкания компонентов оснастки, обеспечивающих равнонагруженность волокон и максимальную реализацию их прочности, удобство базирования компонентов изделия и оснастки, механизированного извлечения внутренних оправок, компенсацию при сборке компонентов оснастки; необходимую прочность и жесткость конструкции оснастки при сборке модулей ИК. Это свидетельствует о том, что оснастка для изготовления ИК является формовочно-сборочной.

Важным компонентом технологического оснащения производства конструкций из КМ являются оправки для намотки . Они являются одним из основных элементов аппаратурно-технологического оформления процесса намотки. Намотка может вестись также на конструкционные элементы, выполняющие роль технологической оправки, но в отличие от нее не удаляемые из намотанной конструкции, а остающиеся в ней как части изделия. Такими конструкционными элементами могут быть тонкостенные оболочки из металлов, термопластов, резин, упрочняемые последующей обмоткой стеклопластиком. Форма и размеры оправки с заданной точностью должны соответствовать форме и размерам внутренней поверхности изделия и быть стабильными под действием силовых и температурных воздействий при намотке и отверждении. Поэтому, чтобы сохранить устойчивость формы, оправки должны быть прочными. Кроме того, они должны быть технологичными, т.е. обеспечивать минимум затрат труда и времени на их

изготовление и извлечение из готового изделия, иметь возможно меньшую массу и себестоимость при заданном количестве циклов использования.

Технологические оправки обычно классифицируют по разовости их использования и конструктивным особенностям.

Различают оправки одноразового, многоразового и комбинированного применения (часть элементов оправки используется многократно, а часть – одноразово).

Для мелкосерийного и единичного производства обычно используют первый и третий типы оправок соответственно для малогабаритных и крупногабаритных конструкций.

Оправки многоразового применения можно многократно разбирать. Их выполняют из металла (обычно алюминиевого сплава или стали). Такие оправки применяют для крупносерийного и массового производства.

По конструктивным особенностям технологические оправки можно подразделить на следующие виды:

неразборные металлические оправки, изготовляемые из одной заготовки материала с вмонтированной трубчатой осью. Оправки такого вида используют для изготовления цилиндрических и конических деталей средних размеров диаметром 500...600 мм. При больших габаритных размерах оправок используют КМ, в первую очередь стеклопластики. Для демонтажа деталей с этих оправок изготовляют специальные устройства;

разборные (неразрушаемые) и разрушаемые оправки. Неразрушаемые оправки изготовляют из металла. Разрушаемые оправки, как правило, изготовляют из гипса и используют для разовой намотки детали. К недостаткам этих оправок можно отнести трудоемкость их изготовления;

полимерные (резиновые, полихлорвиниловые и др.) пневмооправки, применяемые для намотки деталей и заполнителей диаметром до 500 мм. Оправки этого вида представляют собой оболочку, в которой для создания формы наматываемого изделия создается повышенное давление;

сплошные полимерные оправки для термокомпрессионного формования конструкций, например с трубчатым заполнителем.

Наиболее широкое применение для изготовления крупногабаритных деталей в промышленности получили разборные оправки благодаря своим технологическим качествам, относительно небольшой трудоемкости.

Примером облегченной оснастки из КМ для изготовления методом намотки конструкций большого диаметра может служить оправка из стеклопластика для намотки конического корпуса развертывающегося в космосе аппарата. При этом одновременно с двух противоположных сторон оправки происходит намотка двух конструкций, которые затем отверждаются в сушилках в вакуумных мешках.

Важным направлением в области технологического оснащения авиационного производства является изготовление стеклопластиковой объемной оснастки для обтяжки металлического листа без нагрева. Такая оснастка необходима как для производства крупногабаритных деталей внешних обводов планера скелета, так и для изготовления металлических обшивок каркасных форм (см. рис. 1.6.3). Она может быть использована также в качестве эталонной оснастки.

Оснастка для узловой (агрегатной) сборки крупногабаритных ИК. Для сборки крупногабаритных ИК необходимы следующие виды оснастки:

комплектовочная оснастка для предварительной сборки, представляющая собой оснастку-дублер сборочной оснастки (предназначена для базирования деталей и узлов при выполнении подгоночных работ, сборке объемных конструкций из ПКМ с помощью крепежных элементов);

сборочная оснастка (стапели, приспособления, стенды и др.) для базирования и фиксации деталей и узлов из ПКМ, их скрепления, окончательной постановки крепежных деталей, контроля обводов узлов и агрегатов.

Оснастка для сборки узлов (агрегатов) из ПКМ выполняется аналогично оснастке для металлических узлов (агрегатов) и должна обеспечивать установку, базирование, фиксацию и выполнение технологической операции при сборке конструкций из ПКМ.

Основными встроенными базами сборочных приспособлений являются оси лонжеронов, нервюр, плоскости хорд, теоретический контур агрегатов.

При изготовлении, монтаже и контроле всего комплекса оснастки необходимо использовать единые со сборочной оснасткой монтажно-контрольные средства и при плазово-шаблонном методе иметь единые носители и способы увязки оснастки.

Должны быть введены упреждающие средства для исключения влияния температур-

ных факторов при изготовлении и сборке конструкций из ПКМ.

Методы увязки и контроля обводообразующей оснастки. Одна из основных задач ТПП – создание увязанного комплекса оснастки по всему производственно-технологическому циклу, например, изготовление модельной оснастки, а затем и основной формы из ПКМ; формование компонентов конструкции с последующей их выклеечной (первичной) сборкой; комплектовочная промежуточная сборка в приспособлении; узловая, агрегатная сборка в приспособлении (вторичная сборка); общая сборка изделия в стапеле с установкой агрегатов из ПКМ (сборка третьего порядка).

Основу ТПП современных изделий составляют два принципиально различных направления увязки оснастки по всему производственно-технологическому циклу.

Первое направление охватывает методы связанного (зависимого) изготовления оснастки и конструкций, а второе направление охватывает методы их независимого изготовления.

Первое направление характеризуется применением жестких носителей первоисточников увязки (плазы, эталоны поверхности и др.), а второе – применением гибких носителей первоисточников увязки (математические и графические электронные модели). В процессе ТПП современных изделий, как правило, применяют одновременно несколько методов увязки. Наиболее известными в настоящее время являются плазово-шаблонный метод (ПШМ), эталонно-шаблонный метод (ЭШМ); метод объемной увязки (МОУ), а также бесплазовой увязки (МБУ), к которым относятся математико-модельный метод (МММ) и компьютерно-модельный метод (КММ).

Методы бесплазовой увязки особенно эффективны при наличии полного компьютерного макета самолета, судна и других изделий машиностроения.

Производственные подразделения завода при изготовлении технологической и контрольной оснастки используют при ПШМ жесткие носители форм и размеров изделия – плоские металлические шаблоны, скопированные по отдельным сечениям с плаза. Не имея размеров на чертежах изделия (размеры даются только для справки), всю увязку размеров сопрягаемых элементов производства делают по плазам и шаблонам.

Применение вычислительной техники и станков с ЧПУ позволило повысить эффективность плазового производства и качество работ, что обеспечило сокращение сроков ТПП.

Однако опыт работы по изготовлению крупногабаритных конструкций из ПКМ показал недостаточную точность ПШМ при увязке оснастки по шаблонам нескольких сечений. Это относится и к изготовлению болванок для обтяжки формообразующих металлических обшивок каркасных форм и для формования композитной оснастки, а также к пространственной увязке с формовочной оснасткой сборочных приспособлений и стапелей.

Низкая точность ПШМ и сложность пространственной увязки оснастки привели к разработке и применению при производстве малогабаритных конструкций авиационной техники ЭШМ. При этом методе основным источником увязки служат эталоны поверхностей агрегатов, включая и разъемы. Однако и этот метод имеет недостатки: значительные сроки запуска и серийного освоения новых изделий, отсутствие точностной оценки увязки деталей и др.

Поэтому основным направлением в области совершенствования ТПП является создание автоматизированных систем на базе развития аппарата математического моделирования и графического электронного поверхностно-объемного моделирования с использованием средств вычислительной техники и оборудования с ЧПУ.

Это дает возможность: осуществить полную пространственную компьютерную увязку, повышающую точность изготовления; исключить неоднозначную трактовку геометрии деталей, узлов и агрегатов; выявить *несоответствия геометрии изделий и оснастки в процессе их макетирования, а не изготовления и сборки.* Применение этой схемы позволит: осуществлять освоение новых изделий в сжатые сроки и проводить быструю модификацию узлов и агрегатов; выпускать техническую документацию на более ранних стадиях серийного освоения; уменьшить трудоемкость увязки стапелей и формообразующей оснастки; избежать при запуске изделия изготовления значительного числа специальных средств увязки; исключить многократно повторяющиеся операции в различных подразделениях, связанные с изучением, согласованием и восстановлением образа объектов по конструкторской документации.

Таким образом, применение полного компьютерного макетирования дает возмож-

ность организовать технологическую подготовку производства без традиционных трудностей увязки деталей и узлов. Отпадает необходимость в конструкторских плазах машины, которые заменяются увязанными между собой компьютерными макетами деталей и узлов машиностроительного изделия.

На рис. 1.6.3 показана схема увязки оснастки для формования и выклеечной сборки многонервюрных каркасов в основном методом МБУ, а контрольно-комплектовочного стенда для подгонки и установки переднего лонжерона из ПКМ и металлических узлов навески – совмещением двух методов ПШМ и МБУ.

В табл. 1.6.6 приведены значения погрешностей изготовления и увязки сопрягаемых контуров типовой обводообразующей оснастки.

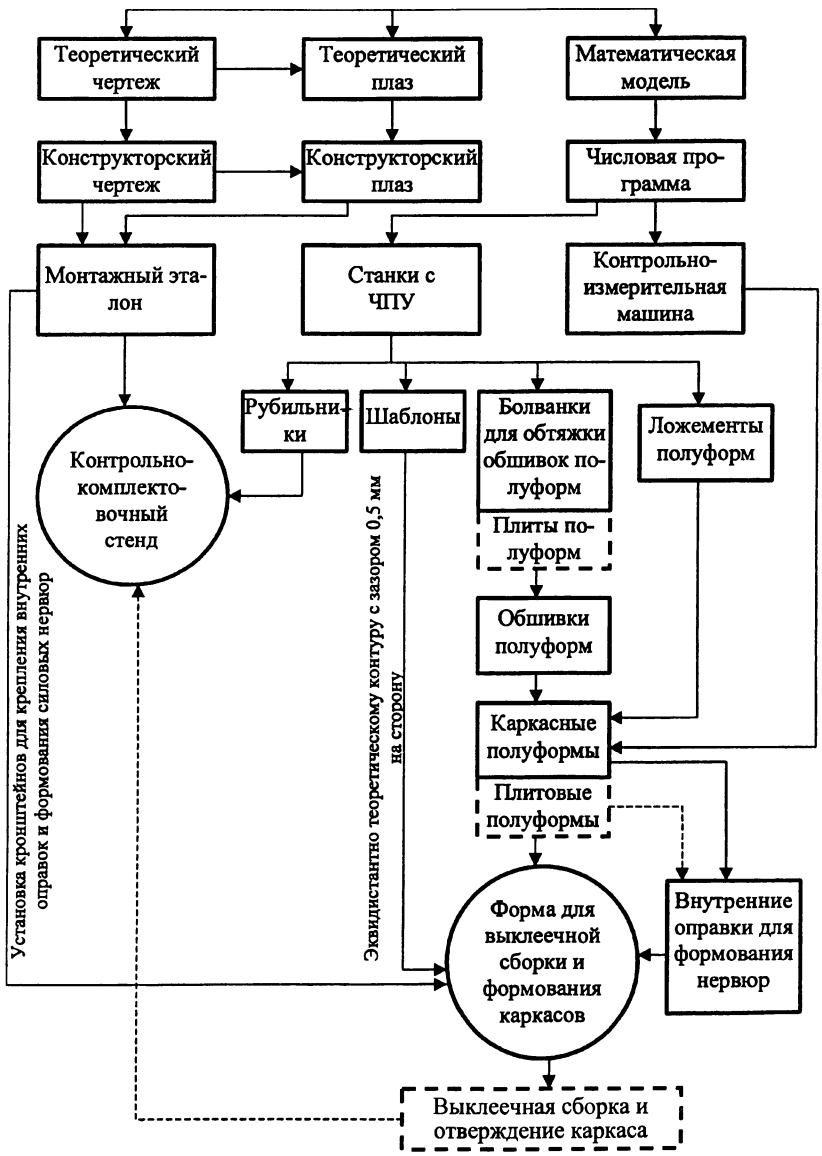


Рис. 1.6.3. Схема увязки оснастки для формования и выклеечной сборки многонервюрных каркасов из композитов

1.6.6. Точность изготовления обводообразующей оснастки

Наименование оснастки	Погрешность, мм		
	Плазово-шаблонный координатный метод	Плазово-шаблонный эталонный метод	Метод бесплазовой увязки
Формовочные оправки	0,5...0,8	0,8	0,26...0,8
Рубильники	1,0...3,1	2,0...2,1	0,7...1,3
Обтяжные пуансоны и болванки для выклейки обшивок форм	1,0...2,0	2,2	0,26...0,8

Изготовленная технологическая оснастка перед сдачей в производство подвергается контрольным операциям для определения отклонений от заданных условий. Ввиду специфических особенностей силовых конструкций из ПКМ (прежде всего широко применяемых в самолетостроении) – сложность формы, многоразмерность, крупногабаритность – методы контроля элементов обводообразующей оснастки отличаются от методов контроля, принятых в общем машиностроении. При этом контроль обводообразующих элементов оснастки заключается в определении координат отдельных точек поверхности или контура с последующим сравнением полученных значений с заданиями.

Методы контроля оснастки можно классифицировать по виду контакта и виду получаемой информации. Контактный метод характерен тем, что контроль осуществляется при непосредственном контакте измеряемой оснастки с измерительным инструментом – наконечником.

Измерение баз соприкосновения с измерительным инструментом характерно для бесконтактного метода. По виду получения информации методы подразделяют на абсолютные и относительные. В первом случае результат контроля определяется размером геометрического параметра, во втором – отклонением от установочной меры или эталонного объекта – плазов, контрэталонов и др.

При контактном относительном методе средствами контроля контуров оснастки являются шаблоны, погрешность метода контроля составляет ±0,3 мм.

При контактном абсолютном методе основным средством контроля является контрольно-измерительная машина, погрешность метода контроля составляет –0,01...+0,1 мм.

Бесконтактный относительный метод осуществляется голографическими и лазерными установками, а абсолютный метод – лазерными и фотометрическими установками.

В ТПП для контроля обводообразующих элементов формовочной оснастки, болванок, обтяжных пуансонов широко используют контрольно-измерительные машины.

Выбор модели контрольно-измерительной машины осуществляется с учетом сложности измерительной задачи, повторяемости однородных задач: геометрии и размеров объема измерений; допуска на изготовление объекта измерений (точность машины должна быть в 5 – 10 раз выше допуска на изготовление; материалы и жесткость детали (влияет на выбор измерительного усилия). Контрольно-измерительные машины типа Дельта и Альфа наиболее пригодны для контроля обводообразующей оснастки. Наряду с операциями контроля машины этих моделей позволяют выполнять: центрирование отверстий на оснастке и деталях; разметку на криволинейных поверхностях; запись управляющих программ для станков с ЧПУ с моделей, деталей или чертежей (на машинах Альфа).

Машины типа Альфа и Дельта можно использовать для контроля длинномерных и крупногабаритных деталей при условии тщательной подготовки проведения указанных измерений. В этом случае необходимо предусмотреть возможность точной перестановки оснастки и ее надежную фиксацию. Система управления машин после введения соответствующих программ корреляции позволяет продолжить измерение относительно первоначальных баз. Исходя из этого, возможен контроль оснастки длиной до 30 м.

При проведении контроля нужно иметь в виду, что контроль оснастки, изготовленной

плазово-шаблонным методом, контрольно-измерительными машинами часто бывает нецелесообразен из-за диспропорции между точностью изготовления оснастки и точностью средств контроля.

1.6.5. ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТПП ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Организация и управление процессом технологической подготовки производства в общем случае регламентируется ЕСТПП (ГОСТ 14.004–83, ГОСТ 14.312–74 и др.).

ЕСТПП предусматривает преимущественное применение типовых ТП, стандартной переналаживаемой оснастки, агрегатного переналаживаемого оборудования, средств автоматизации инженерно-технических работ. ЕСТПП взаимосвязана с системами разработки и поставки продукции на производство, предусматривает широкую унификацию машин и приборов, обеспечение единства измерений, классификацию и кодирование технико-экономической информации, документации. Основное назначение ЕСТПП заключается в установлении системы организации и управления ТПП.

Управление ТПП включает в себя перспективное и оперативное планирование, координирование и регулирование всех работ, а также контроль выполненной работы.

Перспективное планирование ТПП органически включено при составлении сводного (генерального) графика ТПП на все изделия, предусматривающего последовательность укрупненных работ, подготавливающих начало серийного производства, и возможность их параллельного проведения.

К перспективному планированию относится развитие технологической базы производства изделий из ПКМ, для чего необходима разработка комплекса организационно-технических мероприятий по внедрению прогрессивных способов изготовления силовых деталей, узлов и агрегатов, обеспечивающих получение высокого качества конструкций, снижение трудоемкости и стоимости. План развития технологии входит в план развития новой техники и организации производства. В состав основных организационно-технических мероприятий рассматриваемого плана входят: варианты внедрения новой технологии; использование опыта других производственных предприятий, зарубежного опыта, замена устаревшего и технологически несовершенного оборудования.

Оперативное планирование заключается в составлении на базе сводного (генерального) графика частных графиков, определяющих объемы работ, например, при изготовлении крупногабаритных агрегатов из ПКМ типа килей и стабилизаторов самолета, корпусов наземных транспортных средств, или объемы работ при изготовлении основной формовочно-склеечной оснастки, модельной или промежуточной оснастки и др.

Важным вопросом является процесс реализации сводного (генерального) графика и выбор организационной структуры технологической службы предприятия в направлении подготовки и организации производства конструкций из КМ.

Подразделения ПКМ технических служб предприятий имеют различную структуру в зависимости от типа производства (единичное, серийное, массовое), объема применения ПКМ и в целом – всех типов неметаллов, от специфики и традиций данного производства. Наиболее эффективной является структура, когда подразделение ПКМ возглавляет главный химик или главный специалист по КМ. Однако на ряде предприятий бюро неметаллов включено в структуру подразделений главного технолога или главного металлурга, что менее рационально. При плакировании ТПП к числу основных нормативов относятся нормативы трудоемкости отдельных работ, нормативы длительности основных этапов ТПП и нормативы опережения.

Время опережения рассчитывается на основе предварительно определенной длительности производственных этапов ТПП. Длительность каждого этапа ТПП в днях определяют по формуле:

$$T^{э} = \frac{Q}{N\,p\,f\,K_{н}},$$

где Q – общая трудоемкость этапа, нормо-ч; N – число работников данного профиля (технологи, конструкторы по оснастке, чертежники и др.); p – продолжительность рабочего дня, ч; f – коэффициент перевода рабочих дней в календарные; $K_{н}$ – плановый коэффициент выполнения норм.

Длительность этапа изготовления технологической оснастки в цехах (участках) ТПП определяют по формуле:

$$T_{\text{осн}}^{\text{э}} = \frac{Q_i}{M_i S f K_{\text{н}}},$$

где M_i – производственная мощность соответствующего цеха (к примеру, $i = 1$ – модельный цех; $i = 2$ – цех штамповки или обтяжки формообразующих листов; $i = 3$ – цех механообработки лекал каркаса на станках с ЧПУ и т.д.); S – число рабочих смен. На основе длительности отдельных производственных этапов составляют сводный график.

В качестве примера в табл. 1.6.7 приведен укрупненный типовой сводный график ТПП, условно вычлененный из общего сводного графика на ТПП изделия с указанием объемов работ не только для предприятия, но и для НИИ. Цель графика – правильно распределить объем работ по календарным периодам и максимально обеспечить параллельно-последовательный ход ТПП, а также полноценную загрузку работников. Особенностью параллельно-последовательного метода является параллельная работа всех служб ТПП, которая позволяет организовать широкий фронт работ, выявить и решить наиболее сложные задачи.

Организация работ по производству отдельного агрегата (например, киля, стабилизатора, кузова наземного транспорта) проводится по графику, составленному применительно к этому агрегату. Если сводный график ТПП решает принципиальные вопросы и связывает только отдельные этапы, то графики работ по постройке отдельных агрегатов показывают, как складывается обстановка в каждом звене и на каждом этапе.

Сетевые графики в отличие от линейных позволяют выбрать оптимальный вариант ТПП. Эта задача решается методами анализа сети и ее оптимизации, которые излагаются в специальной литературе.

Управление процессом производства изделий из ПКМ имеет две взаимосвязанные стороны: технологическое содержание и организационную структуру. Технологическое содержание определяется технологическими свойствами препрегов или полуфабрикатов (растворная, пленочная или волоконная технология), а также составом, методами и последовательностью выполнения операций. Организационная форма применительно к участку определяется требованиями по переработке ПКМ и условиям изготовления конструкций, способами ведения ТП и сочетаниями во времени и пространстве операций, а также серийностью изготовляемых конструкций из ПКМ.

Организационная форма взаимосвязана с системой оперативного планирования и управления, особенно при их автоматизации. Она зависит от расположения технологического оборудования, числа изделий и направления их движения в процессе изготовления. В зависимости от масштаба производства на сегодня определились индивидуальная, групповая и поточная организационные формы технологических процессов.

Индивидуальная организационная форма выполнения ТП характеризуется тем, что отдельные ТП закрепляются за отдельными высококвалифицированными исполнителями или группой исполнителей. Например, за ответственным исполнителем или группой исполнителей (в зависимости от габаритных размеров конструкции) закрепляется при изготовлении композитной панели: подготовка оснастки, раскрой и выкладка обшивок, изготовление и укладка усиливающих элементов, изготовление и распрессовка технологического пакета, зачистка, ремонт панели и др.

Групповая организационная форма ТП характеризуется однородностью конструкций из ПКМ, единством средств технологического оснащения нескольких технологических операций и специализацией рабочих мест. При этой форме производства не всегда все операции строго закреплены за рабочими местами, имеется повторяемость операций, характерна несинхронность операций ТП. В то же время прямоточные участки такого типа с незначительным числом возвратов деталей при движении по рабочим местам даже при отсутствии строгого ритма выпуска можно отнести к низшей форме поточного производства.

Для производства конструкций из ПКМ могут быть характерны поточные линии группового типа для изготовления деталей и узлов в определенной последовательности. При этом в поточную линию производства конструкций из ПКМ могут включаться все виды работ за исключением автоматизированного изготовления препрегов по причине особых требований к взрыво- и пожаробезопасности и вследствие высокой производительности, а также механической обработки готовых конструкций (по требованию техники безопасности).

1.6.7. Типовой линейный сводный график ТПП

№ по порядку	Наименование работ	Исполнитель	Месяцы I квартала			Месяцы II квартала			Месяцы III квартала			Месяцы IV квартала		
			1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й
1	Передача чертежей на производство	Отдел главного конструктора												
2	Передача технических условий и требований на конструкции из ПКМ	То же												
3	Расцеховка работ	Отдел главного технолога												
4	Составление материальных ведомостей	Отдел главного конструктора												
5	Разработка ДТМ	НИИ												
6	Разработка ТЗ на оснастку и технологических процессов (временных и рабочих)	Отдел главного специалиста по КМ и НИИ												
7	Разработка программ для оборудования с программным управлением	То же												
8	Проектирование оснастки	Отдел главного специалиста по КМ												
9	Составление нормативов по труду	Отдел труда и зарплаты												
10	Изготовление металлической оснастки	Цех производства оснастки												
11	Изготовление мастер-моделей (болванок)	Производство (деревообрабатывающий или модельный цех)												
12	Изготовление формообразующей оснастки из ПКМ	Цех ПКМ (производство или отдел главного специалиста по ПКМ)												
13	Изготовление деталей и узлов из КМ	То же												

При поточной работе обязательно закрепление операций за определенными рабочими местами, что определяет условия организации труда рабочих и схему их обслуживания, порядок транспортировки деталей, формы связей операций между собой. Поточная линия может быть прерывной, многономенклатурной, с подвижным изделием, с поштучной передачей изделий с применением механизированных транспортных средств.

В авиастроении в качестве типовых представителей крупногабаритных конструкций с механизированным изготовлением часто выбирают:

длинномерные балочные интегральные конструкции (например, балка закрылка);

каркасные панели интегральной конструкции (например, панели рулей направления и высоты (РН, РВ);

многонервюрные интегральные каркасные конструкции (РН, РВ, эталоны и др.);

многолонжеронные интегральные каркасные конструкции (кессоны аэродинамических поверхностей, например, киля и стабилизатора).

При большой программе все эти типы конструкций можно изготовлять на предметно-замкнутых участках с ритмичной работой, приближающейся к поточной.

Однако при средне- и многосерийном производстве балок, панелей, многонервюрных каркасов может быть использована подетально-групповая форма предметной специализации участков, организуемая по принципу конструктивно-технологического подобия изготовляемых на них деталей и узлов независимо от того, в какое изделие или узел входит та или иная деталь. При этой форме специализации сборочные цеха, как правило, отделены от механических.

Поэтому при средне- и мелкосерийном производстве деталей и узлов из ПКМ, приближающемся к поточному, участки являются многопредметными, т.е. речь идет о линиях переменно-поточного характера.

Построение производственных участков цеха композиционных материалов по сквозному методу, тесно связанных между собой подвижными и другими транспортными средствами с обеспечением практически прямоточного пути движения изготовляемых компонентов и узлов и организацией ритмичной работы между участками, позволяет приблизиться к поточным методам производства.

Рекомендуемый состав участков цеха серийного производства крупногабаритных интегральных конструкций из ПКМ по ходу технологического процесса следующий:

участок подготовки оснастки;

участки приготовления связующих, клеев, пенопластов;

участки пропитки, изготовления синпрегового заполнителя и пултрузии;

участок механизированного раскроя и механизированной выкладки;

участок ручной выкладки и первичной сборки интегральных конструкций;

участок намотки конструкций и изготовления трубчатого заполнителя;

участок сборки и склейки сотовых конструкций;

участки (места) подготовки к формованию и распрессовке;

участки автоклавов и термических печей;

участки механической обработки и утилизации отходов;

участок комплектовочной сборки и контроля;

лаборатория физико-механических испытаний.

Требования к производственным помещениям представлены в п. 1.6.3.

Средства механизированного и автоматизированного изготовления интегральных конструкций из ПКМ, а также для снижения ручных подгоночных работ при сборке могут быть представлены, например, следующими группами:

специализированное покупное оборудование: реакторы для приготовления связующего, линия пропитки тканей и лент, оборудование для получения лент для автоматизированной намотки, пултрузионные установки для механизированной выкладки препрегов: термопечи, автоклавы для автоматизированного процесса формования; многоэтажные прессы для склейки плоских панелей, устройства для декорирования панелей интерьера, устройства и аппаратура для неразрушающего контроля и пр.;

специализированное оборудование и устройства собственного (заводского) изготовления: установка для получения синпрегового заполнителя; установка для получения трубчатого заполнителя; устройство для механизированного извлечения внутренних оправок в балочных и многостеночных каркасных конструкциях;

универсальное оборудование: станки для механической обработки элементов конструкции из КМ, гидравлические прессы и др.;

механизированный инструмент: пневмоинструмент для механизированного раскроя препрегов на основе стекло-, органо- и углеполнителей (ткани и ленты), для раскроя отвержденных ПКМ, для вырезки пазов и окон, для зачистки поверхности и др.

1.6.6. СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ ТПП ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Основные мощности цехов подготовки производства конструкций из ПКМ связаны с изготовлением модельной, формовочно-склеечной и формообразующей (для обтяжки металлических листов) оснастки. Эти мощности (суммарные) должны составлять не менее 25...30 % мощности цехов производства конструкций из ПКМ.

Структура и состав производственных мощностей ТПП зависит в первую очередь от объема применения ПКМ в изделии и дополнительно также от объема применения полимерной формообразующей штамповой оснастки. Изготовление технологической оснастки обеспечивают как цеха подготовки производства предприятия, так и цеха основного производства (цех ПКМ, деревообрабатывающий цех, листоштамповочный цех, а в ряде случаев и цех сборки).

В деревообрабатывающем цехе изготовляют мастер-модели и болванки для производства формовочно-склеечной оснастки, а также стенки каркасов и рамы для производства крупногабаритной формообразующей штамповой оснастки для обтяжки металлических листов в листоштамповочном цехе.

При небольшом и даже среднем объеме применения ПКМ во вновь создаваемом изделии (например, ориентировочно в пределах 15 % массы планера самолета), кроме крупногабаритных сложных агрегатов типа кессонов крыла, килей, стабилизаторов и др., ТПП может осуществляться в пределах существующей структуры и мощностей предприятия, тем более что конструкции из ПКМ идут взамен металлических конструкций, на которые предусматривалась бы своя оснастка.

При изготовлении крупногабаритных агрегатов из ПКМ традиционные структуры подготовки производства уже не обеспечивают создание технологической оснастки для сборки этих агрегатов (например, комплектовочных стендов и сборочной оснастки), и поэтому к этой работе могут быть привлечены цеха основного производства.

Традиционная структура и мощности подготовки производства авиастроительного предприятия также не обеспечивают ТПП в направлении технологического оснащения уже при объеме применения ПКМ в изделии на уровне 15...20 %. В этом случае опытные и серийные предприятия изготовляют часть технологической оснастки на других предприятиях. Кроме того, серийные предприятия используют при изготовлении первых изделий часть оснастки, переданной из опытного производства, либо просто получают часть готовых конструкций из ПКМ, изготовленных в опытном производстве.

Для производства крупногабаритной формовочно-склеечной, формообразующей штамповой и другой объемной оснастки с применением ПКМ необходимо самостоятельное специализированное отделение цеха плазово-шаблонной и объемной оснастки, или, что более распространено, самостоятельный участок производственного цеха ПКМ. В последнем случае может быть использовано все оборудование этого цеха по переработке ПКМ.

Одними из основных условий эффективного производства, обеспечивающих высокое качество изделий, являются хорошо организованная транспортировка и хранение крупногабаритной объемной оснастки. При транспортировке цеховым транспортом оснастка должна располагаться на плоской грузовой площадке тележки или платформы, при этом все способы транспортировки должны включать ее укладывание штабелем при погрузке или разгрузке, сбрасывание с высоты и перемещение волокон.

Хранение формообразующей оснастки из полимерных материалов может быть организовано двумя способами. Первый способ хранения – в специальных многоярусных передвижных стеллажах централизованного хранилища; стеллажи объединены в блоки.

По второму наиболее рациональному способу хранения формообразующую оснастку для обтяжки листовых деталей хранят на территории заготовительно-штамповочного цеха. Склад для хранения оснастки в этом случае располагается в непосредственной близости от прессов и представляет собой изолированное подземное помещение.

Состав и организационная структура отделения так же, как и остальные производственные мощности, зависят от характера объектов производства и его масштабов.

1.6.7. ОПТИМИЗАЦИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТПП ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

1.6.7.1. АСТПП – ОСНОВА ОПТИМИЗАЦИИ ТПП

Оптимизация ТПП вызвана необходимостью решения основных задач (см. п. 1.6.1) для обеспечения резкого сокращения длительности цикла подготовки производства и затрат на нее. При этом каждая задача ТПП может быть решена в нескольких вариантах, что связано с переработкой большого объема информации. Особенно наглядно это проявляется в процессе проектирования технологической оснастки. Для определения ее оптимальной конструкции и стоимости необходимо провести сравнительные исследования многих вариантов конструктивных решений. Это и выбор конструктивных материалов для основной формы и мастер-модели, обеспечение прочности при различных структурах оснастки (каркасная, монолитная), обеспечение размерной устойчивости, теплостойкости, герметичности, минимальной термической массы, обеспечение необходимого соотношения температурных коэффициентов линейного расширения материала изделия и оснастки и пр. Оперативное и оптимальное решение этих и других важных задач ТПП может быть эффективно осуществлено только с помощью АСТПП на основе рекомендаций РД 50-54-86–88* и РД 50-54-88–88**.

Цель создания АСТПП – совершенствование ТПП на базе математических методов, оптимизация процессов проектирования и управления с применением современных средств вычислительной и организационной техники.

Объектами автоматизации являются:

проектирование ТП и средств технологического оснащения;

решения инженерно-технических и организационно-технологических задач;

решение задач управления ТПП;

информационный поиск деталей-прототипов, сведений о процессах их обработки и средств технологического оснащения для заимствования;

разработка программ для оборудования с программным управлением.

При разработке АСТПП изделий из ПКМ первостепенное значение для оптимизации построения системы подготовки производства имеет поэтапное решение следующих задач:

обеспечение системности автоматизированного проектирования с учетом комплекса внешних переменных факторов, непосредственно оказывающих влияние на проектируемый ТП с точки зрения его структуры, параметров качества продукции и показателей экономической эффективности машиностроительного производства (обеспечение материалами и их технологические свойства, сложность конструкции, наличие требуемого оборудования и производительных мощностей, тип производства и др.);

оптимизация формовочно-склеечной оснастки по параметрам стоимости, трудоемкости, циклу и точности изготовления;

оптимизация сочетания применяемых типовых и индивидуальных ТП на всех уровнях автоматизации, начиная от нулевого уровня, когда ЭВМ решает весьма ограниченный круг частных задач (в основном – вспомогательных – проведение трудоемких инженерных расчетов), и кончая высшим уровнем, когда все этапы автоматизированы.

Эффективность функционирования АСТПП определяется прежде всего качеством построения и использования единого банка данных технологического назначения. Этот банк данных содержит четыре группы документов: 1) конструкторские и технологические характеристики изделий, определяющие параметры сборочных единиц и деталей; 2) эксплуатационно-технические характеристики оборудования и технологической оснастки, применяемых на предприятии или находящихся в стадии проектирования; 3) организационно-технологическая документация, включающая маршруты, ТП изготовления деталей, сборки изделий, конструкторские и технологические спецификации, проекты линий, участков, производства; 4) нормативно-справочная документация, регламентирующая содержание и порядок работ ТПП, требования, предъявляемые к ним государственными, отраслевыми стандартами и нормативной документацией предприятий.

Укрупненная структурно-функциональная схема АСТПП приведена на рис. 1.6.4.

---

* Автоматизированная система технологической подготовки производства. Состав и порядок разработки.

** Автоматизированная информационно-поисковая система технологического назначения. Общие технические требования и правила разработки



Рис. 1.6.4. Укрупненная структурная схема АСТПП

На вход системы поступает конструкторская документация при наличии ранее введенной руководящей и справочной информации*, а выходной информацией являются данные для нормального функционирования АСУП в производственных подразделениях с целью освоения в производстве конструкций из ПКМ в заданные сроки и в необходимых количествах. При этом основой производственного планирования является сдаточно-цеховая единица (СЦЕ).

Ниже описаны шесть основных принципов, которые должны быть положены в основу АСТПП изделий из ПКМ.

Перечень запросов при ТПП конструкций из ПКМ зависит от решаемых задач и исполнителя ТПП. При проектировании цеха изделий из ПКМ и разработке технико-экономического обоснования запрашиваются общая трудоемкость каждого вида работ для данного изделия; суммарная потребность (по массе) в каждом армирующем наполнителе и каждом связующем; суммарная площадь конструкций с полимерным и алюминиевым сотовым или трубчатым заполнителем; перечень деталей, подлежащих изготовлению тем или иным методом, с заполнителем и без него; перечень всех размерных классов оснастки и количество оснастки по каждому классу.

Пользователями этих данных являются проектные организации и предприятия.

При общезаводском и общецеховом планировании работ производства конструкций из ПКМ необходимы данные: о выпускаемой

---

* Руководящая информация – это отраслевые стандарты, регламентирующие требования к технологическим процессам, оборудованию, оснастке, а также производственные инструкции, документация для выбора технологических нормативов (режимов обработки, нормы расхода материалов) и нормативов по технике безопасности и промышленной санитарии.

Справочная информация включает описание прогрессивных методов изготовления, каталоги, справочники, альбомы компоновок, прогрессивных средств технологического оснащения, планировок производственных участков.

продукции с указанием их габаритных размеров и массы; общей трудоемкости по каждому виду работ; трудоемкости по данному виду работ или суммарной по всем видам работ; трудоемкости изготовления 1 кг изделия. Проводится анализ служебных записок для данной СЦЕ; подетальной технологической комплектовке (без детализации компонентов на уровне препрегов) для СЦЕ с указанием степени технологической готовности входящих компонентов; запрашиваются перечень частей и деталей СЦЕ, поступающих на сборку в полуотвержденном или полностью отвержденном виде; перечень деталей, изготовляемых из данного ПКМ и их общая масса; данные о массе 1 м длины каждого из препрегов; массе 1 м длины каждого сухого армирующего и пропитанного армирующего наполнителя в зависимости от его ширины; всех входящих в агрегат (киль, стабилизатор, фюзеляж и др.) деталей из ПКМ; укрупненном маршруте изготовления деталей по участкам цеха ПКМ; сведения о количестве и сроках сдачи (изготовления) СЦЕ и плоских отвержденных деталей в соответствии с директивным технологическим процессом (ДТП) для данного изделия. Пользуются этими данными производственный отдел завода, цеха по производству объектов из ПКМ.

При подготовке технологической оснастки запрашиваются перечень и шифры необходимой оснастки с подразделением на оснастку металлическую, из ПКМ и деревянную для СЦЕ; перечень и шифры намоточной оснастки для данного изделия; перечень и шифры фильер для изготовления деталей данного изделия методом пултрузии, размерный класс; структура (наличие цулаги) и форма рабочей поверхности оснастки; габаритные размеры и материал цулаги оснастки. Пользователями этой информации служат цех, бюро проектирования оснастки.

При разработке рабочих техпроцессов запрашиваются перечень всех объектов из ПКМ, изготовляемых по данному технологическому процессу; краткое содержание ДТП с указанием оборудования и других данных; характеристики каждого технологического оборудования, представленного в данном ДТП; перечень рекомендуемых разделительных материалов и их характеристики; перечень рекомендуемых материалов для вакуумных мешков в зависимости от температуры отверждения ПКМ, воздухопроницаемости и др.; максимальное число слоев и их примерная ориентация для данной детали.

Эти данные передаются в техбюро цеха.

1. Информационная увязка АСТПП с другими системами, действующими на предприятии (АСУП, АСУК и др.), производя которую необходимо выделить на входе и выходе АСТПП все системы, которые с ней взаимодействуют, определить, посредством какой документации осуществляется эта взаимосвязь и увязать информационные языки АСТПП с языками других систем.

2. Оптимальность информационной увязки внутри АСТПП при передаче информации по этапам, выполняемым в соответствии с основными задачами ТПП. Например, длительный цикл и большая трудоемкость связаны с организацией "бумажной" технологии передачи информации на таких типовых четырех "стыках": проектирование конструкции – проектирование оснастки; проектирование – изготовление оснастки; изготовление – контроль оснастки, контроль оснастки – изготовление конструкции из ПКМ (рис. 1.6.5).

Поэтому оптимальной является автоматизированная ("безбумажная") информационная увязка между этапами ТПП. Примером такого успешного результата машинного проектирования в области ТПП изделий из ПКМ служат работы фирмы Мандонелл Дуглас Хеликоптер Компани. Автоматизированный информационный поток с применением электронных средств связи, начиная уже от концептуального проектирования детали из ПКМ до ее окончательного изготовления, состоит из стадий, приведенных на рис. 1.6.6.

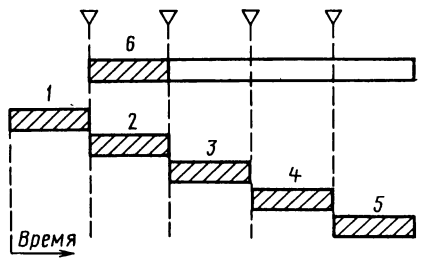


Рис. 1.6.5. Структура типового цикла ТПП (с прерывной передачей и обработкой информации между этапами работ; треугольниками обозначены моменты времени передачи информации):
1 – проектирование конструкции,
2 – проектирование оснастки,
3 – изготовление оснастки; *4* – контроль оснастки;
5 – изготовление конструкции,
6 – планирование и организация работ

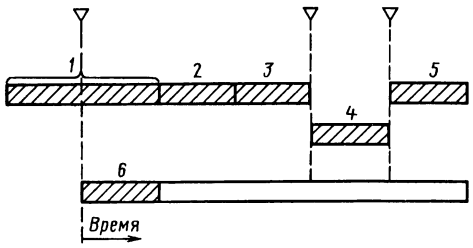


Рис. 1.6.6. Структура оптимального цикла АСТПП (с непрерывной передачей информации по электронным каналам связи и автоматизированной ее переработкой; треугольниками обозначены моменты времени передачи информации):
1 – проектирование и создание электронной поверхностно-объемной модели конструкции; *2* – проектирование оснастки; *3* – разработка программ для обработки оснастки и деталей; *4* – изготовление оснастки; *5* – контроль; *6* – планирование и организация работ

Технологи и программисты создают на машине поверхностно-объемную модель конструкции из ПКМ, и вся последующая информация получается на основе этой модели и даже та, которая требовалась при проектировании чертежей конструкции.

По электронной почте информацию о планируемой к изготовлению конструкции и ее модель передают в электронный цех, где с помощью компьютера определяется потребная оснастка и создаются ее чертежи. Определяются поверхности оснастки, требующие механической обработки, а затем на машине определяются траектории движения режущего инструмента. Полученная информация соответствующим образом интерпретируется и передается по электронным каналам связи в автоматизированный обрабатывающий центр, где на станках с ЧПУ фрезеруется не только оснастка (например, деревянная промежуточная форма), но и элементы детали (фрезеровка сотового заполнителя, сверление отверстий в отвержденной детали и т.д.).

И, наконец, на машине разрабатывается методика проверок, которые передаются в координатно-измерительную систему для контроля оснастки, а затем контроля конструкции из ПКМ и сравнения его с эталонной моделью. На верхней полосе рис. 1.6.6 указаны все операции, выполняемые на машине или на программном обеспечении, совместимом с этой машиной и связанным с ней в единый комплекс. Например, цикл от начала проектирования композитных внутренних профилей вертолета до начала летных испытаний составил всего 1,5 мес.

3. Оптимальность структуры АСТПП, являющейся сложной системой, обеспечивается рядом подсистем. Выделение совокупности задач в подсистему осуществляется на основе анализа информационных связей между задачами.

4. Базирование АСТПП на стандартах ЕСТПП, на передовых методах проектирования, на применении математических методов и прогрессивной организации производства.

5. Рациональное разделение функций технологического и программного комплекса АСТПП между компьютером и проектировщиками-технологами, поскольку АСТПП является человеко-машинной системой.

6. Построение агрегатированной АСТПП связано с разработкой типовых решений по элементам (этапам) ТПП.

Подсистема управления АСТПП решает задачи планирования, учета и оперативного регулирования работы подсистем АСТПП и отдельных подразделений технологической службы. Подсистема работает на основе данных о конструкторской документации на изделие, его технологичности, производственной программе вновь осваиваемого изделия, директивных сроках ТПП, спецификации изделия, а также на основе расчета подразделений технологической службы. Основными задачами, которые должны быть решены подсистемой, являются следующие: классификация конструкций из ПКМ с разработкой ведомостей деталей или сборочных единиц; расчет мощностей подразделений технологической службы; расчет сетевых графиков и их оптимизация; планирование и учет работы функциональных систем АСТПП и подразделений технологической службы по КМ.

Подсистема функционирует в автоматизированном, программном и человеко-машинном режимах, работает с информационными массивами, описывающими структуру подразделений, мощность подразделений технологической службы ПКМ, оборудование, виды производств и деталей, нормативы на проектные работы.

Выходными документами подсистемы являются ведомости применяемости деталей и сборочных единиц, приписанных к конкретному типо-представителю; укрупненный сетевой график, план работы отдельных подсистем

АСТПП с распределением номенклатуры, заданной по отдельным подсистемам и подразделениям, отчет о выполненных работах.

Подсистема АСТПП отработки конструкций из ПКМ на технологичность выполняет следующие функции: проведение с помощью математических методов и ЭВМ сравнительных оценок вариантов конструкции в процессе проектирования; определение технологичности изделий с помощью качественных и количественных оценок; представление сведений о деталях, в том числе разработка предварительного маршрута их изготовления. Важной задачей при отработке на технологичность является обеспечение взаимозаменяемости композитных конструкций (сборочных единиц) при их стыковом соединении между собой. Это эффективно обеспечивается при компьютерном проектировании.

Укрупненно в состав конструкторской модели самолета обычно последовательно входят: модель мастер-геометрии (МГ), модель распределения пространства и модель для рабочего проектирования элементов конструкций. В свою очередь, эти модели включают в себя подмодели. Например, модель МГ включает подмодель концептуального проектирования, подмодель окончательной формы самолета и др.

При применении ПКМ в крупногабаритных элементах конструкций отработка на технологичность может начинаться после определения окончательной формы самолета, и особенно интенсивно эта работа проводится на стадии рабочего проектирования. Здесь проектируют и увязывают между собой также и стыковые соединения (например, панели), при этом проверяются горизонтальные, вертикальные и другие стыковые участки узлов (панелей), наличие конструкторских и технологических баз, требуемых допусков, зазоров и др. Все это относится к первой стадии обеспечения взаимозаменяемости конструкций с помощью компьютерного проектирования.

Следующая стадия связана с элементарной частью (part)* в компьютерных моделях сборки узла, например панелей интерьера, представленных в тяжелой системе типа CADDS-5. В одном парте существуют взаимосвязанные между собой две модели, а именно: модель конструкции (конструкторская модель панели) и производная от первой – модель оснастки (технологическая модель оснастки), а также электронный чертеж конструкции детали, являющийся описанием модели конструкции. Электронный чертеж всегда можно преобразовать в твердую копию чертежа путем его вывода на бумажный носитель.

Исходными данными для указанной выше подсистемы являются эскизная и конструкторская документация на детали, узлы и агрегаты из ПКМ; спецификация, технико-экономическая характеристика, плановые задания по выпуску будущих элементов конструкций, массивы информации по материалам, трудовым нормативам, оборудованию и оснастке.

Оператор-технолог по соответствующей методике формирует математическую модель изготовляемой детали. В состав информационного блока входят массивы классификаторов деталей и типовых маршрутов, их изготовление, массивы сведений о типовых поверхностях и структурах объектов; о марках и сортаментах основных материалов, о технологическом оборудовании и типовой оснастке; массивы расчетных показателей технологичности.

Подсистема АСТПП проектирования технологических процессов предназначена для автоматизированного проектирования маршрутной и операционной технологии изготовления простых элементов конструкций различных классов и средней сложности: обшивки, нервюры, лонжероны, подкрепление (двухслойные) панели, трехслойные сотовые и трубчатые панели и др.

Исходными данными для автоматизированного проектирования служат описанные на формализованном технологическом языке сведения об изготовляемых элементах конструкций, о составе конструктивно-технологических групп деталей и узлов по предметно-технологическим участкам. Возможные варианты маршрута изготовления деталей и узлов выбираются, исходя из их конструктивных особенностей, состава и технической характеристики оборудования и оснастки, а также с учетом номенклатуры основных материалов. Проектирование операционной технологии осуществляется на основе сведений, полученных из программ "Маршрут" (вид операции, перечень формуемых и обрабатываемых элементов, а также методы их изготовления, типоразмеры оборудования и оснастки для данной операции), а также на основе информации

* В операционной системе UNIX это директория, хранящая различные виды информации в файловой системе

об изготовляемой детали (узле) и программе выпуска.

Основные задачи, которые решает подсистема: определение рациональных методов изготовления отдельных элементов детали (узла) в целом; определение наиболее целесообразной формы и размеров полуфабрикатов, наиболее рациональный порядок выкладки слоев ПКМ, формирование технологических операций; определение последовательности операций и переходов; выбор оборудования, оснастки и измерительного инструмента, определение времени выполнения операции.

Подсистема может работать на основе ранее разработанных программ проектирования и при составлении маршрутов изготовления простых деталей и деталей (узлов) средней сложности или на основе использования технологических указаний, введенных технологом перед началом проектирования операции. Подсистема может работать в автоматическом и в человеко-машинном режиме с отображением промежуточных результатов проектирования той или иной операции на экране дисплея и оперативным внесением изменений технологом на основе анализа результатов машинного решения задач операционной технологии.

В состав информационного банка данной подсистемы входят следующие массивы: технологические маршруты изготовления оригинальных деталей, типовые ТП на общие виды работ (приготовление связующих, пропитка наполнителя, подгонка и склейка сотового заполнителя, формовочно-термические операции и другие – всего при нескольких марках ПКМ примерно 12 – 15 процессов), типовые процессы на изготовление типовых деталей (узлов) из ПКМ: перечень и технологическая характеристика оборудования и типовой оснастки; таблица технологических припусков и допусков, условия поставки элементов конструкций из цеха ПКМ в цех узловой и агрегатной сборки.

Подсистема АСТПП расчета программ составляет программы для многокоординатного оборудования с ЧПУ трех видов: формовочно-наслаивающего, обрабатывающего и контрольно-измерительного. Среди этого оборудования станки: намоточные и выкладочные (четырех-шестикоординатные), фрезерные (трех-пятикоординатные), сверлильные, а также контрольно-измерительные машины.

Указанное оборудование применяется при изготовлении конструкций из ПКМ и технологической оснастки. Например, фрезерные станки с ЧПУ используются при фрезеровке сотового заполнителя и отвержденных деталей из ПКМ, при фрезеровке плоской (шаблоны, лекала, рубильники) и объемной оснастки (мастер-модели, болванки и др.).

Процесс программирования, контроля программ и эксплуатации оборудования с ПУ является сложным и разветвленным и состоит из следующих этапов: отработка конструкций на технологичность; геометрический расчет, кодирование исходных данных и запись на машинные носители или использование математической модели образа детали; контроль управляющей программы (УП), в том числе графического представления получаемой детали и траектории инструмента.

Подсистема АСТПП расчета загрузки оборудования, механических рабочих мест, сводных технико-экономических нормативов производит необходимые расчеты и формирует сводные технологические нормативы, необходимые для функционирования АСУП. Исходными данными являются сведения о трудоемкости и себестоимости операций, нормы расхода материала на деталь, перечень необходимой оснастки. Эти данные получают из подсистемы проектирования операционной технологии.

В подсистеме решаются следующие основные задачи: расчет загрузки рабочих мест в цехе ПКМ с учетом возможных производственных возмущений и расчет сводных норм расхода материалов на детали и узлы в соответствии с программой выпуска изделий; формирование сводных спецификаций необходимой оснастки и инструмента. Режим работы системы – автоматизированный и человеко-машинный. Все сводные нормативы составляются программным способом. В результате функционирования системы формируется комплекс сводных ведомостей.

Подсистема АСТПП автоматизированного проектирования формовочной технологической оснастки. В данной подсистеме речь идет о реализации интегрированной системы автоматизации проектирования и технологической подготовки производства САПР/АСТПП, которая для краткости называется ИПТ (интеграция проектирования и технологии).

Основная номенклатура проектируемой оснастки в ТПП составляет оснастка для выкладки, намотки и вакуум-автоклавного формования конструкций из ПКМ.

Упрощенная методика проектирования базируется на информации о стандартных и унифицированных сборочных единицах и деталях форм.

Опыт показывает, что сокращение цикла и трудоемкости подготовки УП для указанных видов оборудования может быть осуществлено при использовании графической электронной поверхностно-объемной модели конструкции из ПКМ.

Исходными данными при расчете программ для станков с ЧПУ служит информация, полученная в результате кодирования сведений о геометрическом образе детали или полученная из ранее разработанной математической модели и проектирования операционной технологии изготовления детали.

Одним из направлений, обеспечивающих достаточно высокий уровень механизации работ, сокращение цикла производства, является запись программ с плаза, которую можно осуществлять несколькими принципиально различными вариантами.

Выходная документация выдается подсистемой в виде УП на машинных носителях для управления станком с ЧПУ, таблиц координат траектории движения режущего инструмента или раскладчика при обработке или наслаивании и холостых перемещениях для визуальной проверки правильности изготовления с указанием режимов резания или наслаивания.

Режимы работы подсистемы: автоматический в случае, когда технолог-проектировщик перед началом расчета программы задает технологические указания, определяющие начальные и конечные точки траектории, а также порядок обработки контуров; человеко-машинный с отображением расчетной траектории на экране дисплея, при этом имеется возможность оперативной корректировки отдельных участков траектории.

Входные данные: сведения о форме детали, сведения о заготовке (материал, размеры и др.); сведения о типе проектируемой формы, особенностях ее конструкции; данные о применяемом оборудовании, поступающие из подсистемы проектирования операционной технологии. В состав информационных массивов входят данные о плитах-основаниях оснастки, лекалах, крепежных элементах, формообразующих листах и других элементах форм, а также технологическая характеристика оборудования.

Базовыми составляющими реализации системы ИПТ при автоматизированном проектировании являются: трехмерное моделирование, двухмерное черчение и подготовка чертежа, контроль и управление данными, контроль за конструкторскими изменениями проекта, сеть связи, реляционная база данных, семейство типовых деталей и др.

1.6.7.2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТПП

Эффективность ТПП проявляется в технико-экономическом уровне проектируемых изделий и их производства. Обычно оценке подвергаются три вида свойств изделий из ПКМ: функциональные, ресурсосберегающие и природоохранные.

Функциональные показатели качества продукции подразделяют на показатели технического эффекта, надежности, эргономичности и эстетичности.

Для изделий из ПКМ показателями технического эффекта являются уровень применения ПКМ, снижение массы по сравнению с металлическими аналогами, а также эксплуатационные показатели. Уровень применения ПКМ может быть представлен коэффициентом

$$K_{км} = M_{км} / M,$$

где $M_{км}$ – масса всех конструкций из ПКМ; M – масса изделия, кг.

К основным свойствам, характеризующим надежность изделий из ПКМ, относят их безотказность, долговечность и сохраняемость.

Показатели надежности по существу дополняют характеристику свойств продукта труда, оцениваемых показателями технического эффекта.

Так, например, для изделия, имеющего срок службы $T_{сл}$ и способного при безотказной работе выработать в течение года полезный эффект $Э_г$, суммарный или общий полезный эффект за весь период функционирования с учетом степени безотказности и полноты проявления технического эффекта равен:

$$Э_{сб} = Э_г T_{сл} \eta_н,$$

где $\eta_н$ – коэффициент, учитывающий степень безотказности и полноты проявления технического эффекта, который при изготовлении изделий из ПКМ зависит от уровня механизации и автоматизации ТП. Именно механизированные процессы обеспечивают точную ук-

ладку и число армирующих слоев, обеспечивают точное соотношение компонентов ПКМ, требуемый уровень отверждения и т.д. Кроме того, этот показатель влияет на производительность труда и характеризует надежность технологической системы.

При оценке качества изделия с точки зрения эргономических свойств в изделиях, в том числе из ПКМ, выделяют те элементы, которые оказывают влияние на работоспособность, производительность и утомляемость человека. В современных машинах, например, выделяют интерьер, кабину и их оборудование (люки, окна, вентиляционные устройства, коммуникации и др.), а также кресла, сиденья, шкафы, столы и др.; индикаторные устройства (панели, приборы со шкалами, пневмосхемы и т.п.), ручные органы управления.

Состав эстетических показателей качества назначается обычно с учетом специфических особенностей и назначения изделия. Например, для изделий из ПКМ в качестве эстетического может быть принят показатель внешнего вида (подбор по цвету и текстуре материалов, отделка, качество покрытий и т.д.).

В общем случае ресурсосберегающие свойства технических объектов могут быть разделены на две группы: во-первых, свойства, обусловливающие определенную величину затрат ресурсов на разработку и изготовление продукции, а также на поддержание ее качества при эксплуатации (эксплуатационная технологичность конструкции изделия), и, во-вторых, свойства, определяющие степень использования ресурсов, выделяемых на непосредственное применение продукции по назначению.

К технологическим свойствам изделий из ПКМ относят материалоемкость, энергоемкость, трудоемкость изготовления или ремонта, поскольку основными видами затрачиваемых ресурсов являются материалы, энергия, труд и время. Важным показателем является коэффициент общей удельной трудоемкости производства изделия из ПКМ

$$K_{\text{уд}} = T_{\text{р}} / M_{\text{км}},$$

где $T_{\text{р}}$ – общая трудоемкость производства конструкции из ПКМ, н · ч,

$$T_{\text{р}} = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{уд}i} M_i,$$

где $C_{\text{уд}\,i}$ – удельная трудоемкость переработки 1 кг материала для данного вида работ в i-й технологической операции; M_i – масса ПКМ для данного вида работ; $M_{\text{км}}$ – масса конструкций из КМ производимого изделия.

Показатель $K_{\text{уд}}$ зависит от вида ПКМ (стекло-, органо- или углепластик) и вида армирующего наполнителя (нить, лента, ткань); от типа производства (единичное, серийное, массовое), от уровня механизации и автоматизации работ, а также от объема применения интегральных конструкций, от технологичности конструкции всего изделия.

При высоком уровне механизации и автоматизации для конструкций из стекло- и органопластика этот показатель колеблется практически в пределах $K_{\text{уд}} = 2\ldots4$ н · ч/кг, а для конструкций из углепластика $K_{\text{уд}} = 5\ldots10$ н · ч/кг.

В опытном производстве (по данным АНТК им. О.К. Антонова) в качестве нормативных единиц нормирования выбран один килограмм конструкции и один квадратный метр поверхности.

Трудоемкость одного килограмма углепластиковой конструкции за период до начала мелкосерийного производства снизилась с 80 до 28 н · ч, а трудоемкость сборки-склейки трехслойных конструкций за тот же период снизилась с 80...105 н · ч до 33...48 н · ч.

Показатели экологичности отражают уровень вредных воздействий продукции на окружающую среду в процессах производства и эксплуатации. Используют их для разработки и реализации инженерных, в первую очередь проектировочных решений, ограничивающих до допустимых норм или исключающих полностью поступления в природную среду вредных веществ, возникающих при изготовлении и эксплуатации изделия.

Номенклатура показателей экологичности устанавливается на основании результатов анализа вредных воздействий (химических, механических и др.) продукции на окружающую среду. К ним относят содержание вредных компонентов или примесей, выбрасываемых в окружающую среду. Оценка уровня качества продукции по показателям экологичности проводится путем сопоставления фактических значений этих показателей с установленными нормами по охране природы.

К важным природоохранным показателям производства изделий из ПКМ относят и степень утилизации отходов. Отходы произ-

водства должны подвергаться утилизации или другим видам переработки в соответствии с нормативно-технической документацией на эти вещества и материалы.

К функциональным показателям производства конструкций из ПКМ относят показатели производительности труда, надежности и гибкости технологической системы.

Ускоренное наращивание объема выпускаемой продукции при сохранении или уменьшении затрат живого и общественного труда достигается с помощью разнообразных технических и организационных мероприятий: механизация и автоматизация производства, внедрение прогрессивных технологических процессов, например, интегральных, рациональное технологическое оснащение, переход на бригадную форму организации труда и т.п.

Важным вопросом при изготовлении конструкций из ПКМ является оценка уровня механизации и автоматизации $K_{м(а)}$ изготовления какого-либо узла или агрегата. Механизация и автоматизация процессов позволяет существенно снизить трудоемкость изготовления, повысить устойчивость и качество процесса, повысить качество конструкций из ПКМ, улучшить условия труда при работе с вредными веществами, повысить коэффициент использования материала. Указанную оценку можно проводить по формуле:

$$K_{м(а)} = \frac{\sum p_i C_{уд\,i} K_{м(а)}}{\sum p_i C_{уд\,i}},$$

где $\sum p_i C_{уд\,i}$ – сумма всех удельных операционных трудоемкостей на данный агрегат, при этом p_i – масса перерабатываемого композиционного материала в i-й операции.

Например, для приготовления 1 кг эпоксидного связующего можно принять, что $C_{уд\,i} = 0{,}3$ н · ч, $K_{м(а)\,i} = 80$ %; для автоматизированной пропитки тканей углеленты $C_{уд\,i} = 0{,}4$ н · ч; $K_{м(а)\,i} = 80$ %; для автоматизированной разрезки пропитанной тканой ленты на узкие ленты $C_{уд\,i} = 0{,}15$ н · ч; $K_{м(а)\,i} = 80$ %; для намотки узких лент на оправку сложной формы $C_{уд\,i} = 2$ н · ч; $K_{м(а)\,i} = 80$ %; вакуум-автоклавное формование крупногабаритного агрегата $C_{уд\,i} = 0{,}6$ н · ч; $K_{м(а)\,i} = 80$ %.

Одним из показателей прогрессивности ТП производства изделий из ПКМ является показатель уровня интегральности конструкций из КМ:

$$K_{инт} = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_{инт\,i}}{M_{км}},$$

где $M_{инт\,i}$ – масса изделий i-го вида панелей, узлов, агрегатов интегральной конструкции, поставляемых из цеха ПКМ на узловую, агрегатную и общую сборку изделия; n – общее число интегральных конструкций; $M_{км}$ – масса всех конструкций из КМ на изделие.

Показатели $K_{уд}$, $K_{м(а)}$, $K_{инт}$ относят также и к показателям технологичности конструкций всего изделия.

Для изготовления конструкций из ПКМ характерны индивидуальная бригадная формы организации труда. Например, изготовление крупногабаритного многолонжеронного киля и стабилизатора, многонервюрных каркасов руля высоты и направления, элеронов и других деталей возможно только при бригадной форме организации труда, поскольку здесь в комплексе необходимы операции намотки и выкладки, изготовление синпреговых, трубчатых и сотовых заполнителей, выклеечная, узловая и агрегатная сборки, формование, соединение компонентов интегральной конструкции и др.

Оценка надежности технологической системы по показателям производительности проводится с учетом внутренних и внешних факторов, воздействующих на ее работоспособность. К внутренним факторам относят факторы, характеризующие состояние элементов функционирования технологической системы (отказы оборудования, разгерметизация вакуумных мешков, нарушение технологических режимов операций и др.), к внешним – факторы, характеризующие состояние обслуживающей и обеспечивающей систем (отсутствие компонентов ПКМ и препрегов, отклонения в оснастке и стапелях и др.).

С учетом величины отказов в течение времени производства изделия из ПКМ производительность может быть определена зависимостью

$$П(t) = П_0(t)\eta_i,$$

где $П_0(t)$ – расчетная производительность при безотказном функционировании технологической системы; η_i – коэффициент, учитывающий степень безотказности технологической системы при ее функционировании в течение времени ($i = 1$ – опытное, $i = 2$ – серийное про-

изводство). Анализ показывает, что при изготовлении первой (опытной) партии изделия $\eta_1 = 0{,}5...0{,}9$; в серийном производстве $\eta_2 = 0{,}8...1{,}0$. Меньшее значение η_i относится к изготовлению крупных интегральных агрегатов типа киля и стабилизатора, интегральных многонервюрных каркасов рулей направления и высоты, элеронов и др. Средние значения характерны для изготовления крупногабаритных подкрепленных, трехслойных панелей и др. Наиболее высокие значения η_i характерны для малогабаритных и простых по форме деталей.

Важнейшими экономическими показателями производства, выражающими его рациональность и эффективность, являются ресурсные показатели производства. Их подразделяют на подгруппы в зависимости от видов используемых ресурсов. К основным подгруппам относят показатели использования материальных и топливно-энергетических ресурсов. Применение ПКМ по сравнению с металлами означает меньший расход материалов и топливно-энергетических ресурсов от получения сырья до их переработки в изделия.

В машиностроении при оценке эффективности работы предприятия и технического уровня ТП используется коэффициент использования материалов

$$K_{им} = M / M_н,$$

где M – фактическая масса материала в изделии; $M_н$ – норма расхода материала на изделие.

В производстве изделий из ПКМ $K_{им} = 0{,}7...0{,}9$. Это позволяет в определенной мере погасить издержки, связанные с более высокими стоимостями ПКМ по сравнению с металлами. Одним из способов экономного расходования материалов является возвращение в производство для повторного использования отходов и так называемых безвозвратных потерь, например, летучих растворителей, в том числе паров спирта и ацетона. Их улавливание на выходе пропиточных установок и регенерация вполне осуществимы.

Показатели использования топливно-энергетических ресурсов характеризуют степень использования различных источников и видов энергии (топлива, тепловой и электрической энергии и др.). Обычно в приведенной выше зависимости для $K_{им}$ заменяют M и $M_н$ соответственно на фактические величины потребляемых топливно-энергетических ресурсов Q и нормы их расхода $Q_н$.

Основными направлениями снижения топливно-энергетических ресурсов при производстве изделий и оснастки из ПКМ является применение быстроотверждающихся связующих, позволяющих, например, при 180...200 °С в течение 3...5 мин провести полное отверждение композита, или применение связующих с умеренной температурой отверждения (90 °С) . В судостроении, например, широко применяются связующие холодного отверждения. Следующим эффективным направлением является снижение автоклавного давления с 0,5...0,7 МПа до 0,2...0,3 МПа или даже его исключение (используют только давление, создаваемое вакуумным разрежением).

В судостроении широко применяется метод контактного формования, исключающий использование электрической энергии. Большую экономию энергетических затрат дает применение упомянутых выше интегральных конструкций.

Основные исходные данные для расчета ресурсных показателей производства приводятся обычно в паспорте производственного объединения (предприятия).

Оценка эффективности системы подготовки производства объектов из ПКМ характеризуется традиционными показателями: трудоемкостью цикла подготовки производства $T_ц$, в которой отражаются трудовые затраты в процессе подготовки производства; длительностью цикла подготовки производства (освоения) $\tau_{ос}$, отражающей затраты времени на выполнение научно-технических разработок на всех стадиях подготовки; показателями эффективности производства, отражающими полезный эффект от улучшения технических параметров и характеристик совокупности элементов производства, разрабатываемых и совершенствуемых при его научно-технической подготовке на единицу затрат; показателем эффективности продукции, отражающем полезный эффект от внедрения результатов научно-технических разработок на единицу затрат. Поскольку при ТПП изделий из ПКМ затраты на специализированную оснастку являются определяющими, при большом объеме применения ПКМ на изделие одно предприятие практически не может изготовить всю номенклатуру оснастки, и оно прибегает к размещению определенной части ее на других предприятиях. Традиционный коэффициент технической оснащенности производства, характеризующий возможность изготовления изделий из ПКМ, имеет вид



Рис. 1.6.7. Структура обобщенного показателя качества конструктивно-технологических решений оснастки

$$K_{\text{ос}} = N_{\text{ос}} / N_{\text{дет}},$$

где $N_{\text{ос}}$ – количество специальной оснастки, необходимой для изготовления всех конструкций ($N_{\text{дет}}$) изделия из ПКМ, за исключением плоских листовых деталей, прессуемых на универсальных формах. Например, для производства самолета Ан-70 с большим объемом применения ПКМ ($K_{\text{км}} = 0{,}22$), $K_{\text{ос}} = 0{,}9$, $N_{\text{ос}} = 2000$. Кроме того, среди показателей, оценивающих эффективность системы подготовки производства из ПКМ в направлении оснащенности дополнительно должен быть выделен показатель технической эффективности оснастки, структура которого представлена на рис. 1.6.7.

1.6.8. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Общие данные. Меры техники безопасности при работе с ПКМ связаны с изготовлением материала, обращением с компонентами и с самим ПКМ при переработке в изделия, с механической обработкой ПКМ и изделий из них. Вредными для здоровья факторами являются пыль, пары, газы и брызги, образующиеся при технологических операциях с ПКМ. Вредные вещества могут попадать в легкие, в желудочно-кишечный тракт, на кожу, слизистые оболочки, в глаза и кровяную систему, вызывая профессиональные заболевания, в том числе дерматиты, нарушения функции легких, почек, печени и центральной нервной системы, а также опухоли. При производстве деталей, узлов и агрегатов из ПКМ в качестве наполнителей используют волокнистые материалы (стекло-, базальто-, органо-, угле- и борное волокно в виде жгутов, лент, нетканых материалов, тканей и т.д.). Пыль указанных волокон воздействует на органы дыхания, может вызвать дерматоз, а обломки волокон, особенно борных, способны прокалывать незащищенные участки кожи работающих.

В качестве матриц используют эпоксидные, фенольные, полиамидные и другие смолы, растворителями которых являются различные органические жидкости (спирт, ацетон и др.). Вредность эпоксидных смол определяется

наличием в них летучих примесей (эпихлоргидрина, толуола), которые могут быть причиной заболевания кожи, возникающего как от непосредственного прикосновения, так и в результате сенсибилизации (повышения чувствительности организма). Вредность фенольных смол определяется действием остаточных непрореагировавших низкомолекулярных веществ: фенола и его производных, формальдегида и аммиака. Пары фенола и формальдегида оказывают действие на слизистую оболочку, а также могут вызвать поражение кожи. Аммиак оказывает раздражающее действие на слизистую оболочку. Полиамидные связующие применяют в производстве угле- и боропластиков в виде раствора ароматических диангидридов и диаминов в ацетоне (иногда с добавлением пирролидона). Вредность этих связующих определяется токсичностью паров растворителей и остаточным количеством мономеров.

Ацетон при предельно допустимой концентрации (ПДК) обладает слабым наркотическим действием, острых отравлений не вызывает.

Действие ароматических диангидридов и диаминов может быть причиной кожных дерматозов и заболеваний дыхательных путей.

Основными мерами обеспечения безопасности персонала являются: приточно-вытяжная вентиляция, соблюдение правил личной и пожарной безопасности, регулярные медосмотры для раннего выявления профзаболеваний и индивидуальные средства защиты: перчатки, очки или маска, респиратор и защитная одежда. Следует правильно подбирать эти средства и регулярно очищать их от попадающих на них вредных веществ. Кроме того, следует строго соблюдать правила хранения вредных веществ, используемых в производстве ПКМ, и обращения с ними. Следует также содержать в чистоте рабочее место, оборудование и инструменты, не загромождать проходы к кранам для промывки глаз и кожи и к средствам пожаротушения.

Требования по технике безопасности к технологическому процессу. При проведении ТП изготовления деталей из ПКМ должны предусматриваться меры защиты от действия следующих опасных и вредных производственных факторов:

повышенного содержания пыли волокон, а также паров и аэрозолей в воздухе рабочей зоны;

подвижных частей оборудования, движущихся материалов, деталей;

повышенной температуры поверхностей оборудования, оснастки;

повышенной температуры воздуха рабочей зоны;

повышенного напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; повышенного уровня статического электричества;

повышенного уровня шума на рабочем месте;

повышенного уровня вибрации;

острых кромок, заусенцев на поверхностях заготовок, оборудования, инструмента;

недостаточной освещенности рабочей зоны;

пожаро-, взрывоопасности применяемых веществ, материалов.

Организация и проведение технологических процессов изготовления деталей из ПКМ должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.3.002–75 "Санитарные правила организации технологических процессов и гигиенические требования к производственному оборудованию" и требованиям следующих стандартов:

ОСТ 1.142323–86 "ССБТ. Изготовление деталей из полимерных композиционных материалов. Общие требования безопасности", устанавливающего соответствующие требования на процессы: подготовки оснастки; намотки и выкладки пакета заготовки деталей; сборки технологического пакета; формования заготовок деталей; механической обработки заготовок деталей.

ОСТ 1.42.223–85 "ССБТ. Изготовление препрегов полимерных композиционных материалов. Общие требования безопасности" устанавливает общие требования безопасности для всех стадий производства препрегов методами пропитки и электростатического нанесения связующего.

Концентрация паров аэрозолей вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должна превышать значений, установленных ГОСТ 12.1.005–88 "Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны" и "Перечнями допустимых концентраций вредных веществ в воздухе рабочей зоны" (табл. 1.6.8).

Температура нагревающихся поверхностей оборудования, оснастки, с которыми соприкасается работающий, не должна превышать установленной "Санитарными нормами проектирования промышленных предприятий" СН-245–71.

1.6.8. Предельно допустимые концентрации вредных паров пыли в воздухе рабочей зоны

Вещества	ПДК, мг/м^3
Этиловый спирт	1000
Бутиловый спирт	10
Этиловый эфир	300
Этилацетат	50
Ацетон	200
Бензин-растворитель (Б-70)	100
Бензол	5
Хлорбензол	50
N-Метилпирролидон	100
Эпихлоргидрин	1
Углеводороды алифатические предельные	300
Четыреххлористый углерод	50
Уайт-спирит	300
Скипидар	300
Толуол	50
Фенол	0,3
Формальдегид	0,5
Аммиак	20
Дихлорэтан	50
Соляная кислота	5
Серная кислота	1
Угольная пыль	4
Пыль стекловолокна	4
Перхлорэтилен	10
Этиленгликоль	5

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при работе электроустановок оборудования, нормированы ГОСТ 12.1.038–82.

Уровень шума на рабочих местах регламентирован ГОСТ 12.1.003–83. Уровни вибрации, воздействующие на работающих, не должны превышать значений, указанных в "Санитарных нормах и правилах при работе с машинами и оборудованием, создающими локальную вибрацию, передающуюся на руки".

Освещенность рабочих мест должна соответствовать требованиям СНиП 11-4–79 "Естественное и искусственное освещение" и "Нормы естественного и искусственного освещения предприятий отрасли".

Количества пожаровзрывоопасных веществ в воздухе помещений обусловлены их предельно допустимой взрывоопасной концентрацией (ПДВК).

Для исключения возможности образования и накопления зарядов статического электричества на поверхностях узлов оборудования, оснастки при обезжиривании и нанесении антиадгезионной смазки на оправки, зашкуривании поверхностей деталей должны выполняться требования ГОСТ 12.1.018–93, ГОСТ 12.4.124–83, отраслевых "Правил защиты от статического электричества и вторичных проявлений молний".

Работа с пожаровзрывоопасными веществами и материалами (растворителями, клеями, антиадгезионными смазками, связующими и др.) должна выполняться с соблюдением требований ГОСТ 12.1.004–91, ГОСТ 12.1.010–76, ГОСТ 12.1.018–93, "Типовые правила пожарной безопасности для промышленных предприятий".

При работе с клеями следует выполнять требования ОСТ 1.4249–84, при работе с герметиками – требования ОСТ 1.42115–81.

При автоклавном формовании деталей должны соблюдаться требования "Правил по безопасности труда при автоклавном формовании полимерных материалов".

Механическая обработка деталей из ПКМ должна производиться на станках, отвечающих требованиям ГОСТ 12.2.009–99.

При работе с абразивным инструментом должны выполняться требования ГОСТ 12.3.028–82, при работе с алмазным инструментом – ГОСТ 12.3.023–80, а также ОСТ 1.42189–84.

Требования к производственным помещениям, оборудованию и вентиляции. Участки цеха по переработке полимерных ПКМ следует размещать, как правило, в изолированных помещениях, которые должны соответствовать действующим строительным и санитарным нормам проектирования промышленных предприятий, в том числе ОСТ 1.42223–85, ОСТ 1.42323–86, ГОСТ 12.1.005–88, СН 245–71 и др.

Внутренние поверхности стен, потолков, строительных конструкций должны быть ок-

рашены краской и отделаны другими материалами светлых тонов, не допускающими сорбции веществ, применяемых в производстве и позволяющими производить влажную уборку. При этом внутренние поверхности стен в помещениях по приготовлению связующих и изготовлению полуфабрикатов следует облицовывать светлой глазурированной плиткой на высоту не менее двух метров. Цветная отделка интерьеров помещений должна соответствовать требованиям "Указаний по проектированию цветной отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий".

Полы в производственных помещениях должны быть не скользкими, прочными, удобными для механизированной уборки, выполненными из несгораемых материалов светлых тонов, стойких к агрессивным веществам, не допускающим сорбции применяемых веществ и не дающих искр при трении и ударах.

Применяемое при проведении технологических процессов оборудование должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.3.002–75 и ГОСТ 12.2.003–91.

Применяемое электрооборудование, устройства электроосвещения должны соответствовать ГОСТ 12.1.019–79 "Правила устройства электроустановок" (ПУЭ), ГОСТ 12.2.0070–75. Заземление оборудования должно быть выполнено в соответствии с ГОСТ 12.1.030–81.

Производственные помещения должны быть оборудованы механической приточно-вытяжной вентиляцией. Эксплуатация и устройство вентиляционных систем должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.4.021–75, СНиП II-33–75 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Нормы проектирования", а также отраслевым "Правилам проектирования, монтажа, приемки и эксплуатации вентиляционных установок".

Расчетные параметры воздуха рабочей зоны принимаются в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005–88 по категории работ IIб тяжести.

Удаляемый из производственных помещений и от оборудования воздух должен перед выбросом в атмосферу очищаться от вредных веществ в соответствии с требованием "Санитарных норм проектирования промышленных предприятий" СН 245–71.

В табл. 1.6.9 приведен примерный состав участков цеха ПКМ и некоторые требования к ним на примере производства конструкций из стекло- и стеклоорганопластиков самолета типа Ан-140.

1.6.9. Состав цеха ПКМ и требования к помещениям

Наименование участков	Класс чистоты воздуха	Относительная влажность воздуха, %	Температура, °С
Восстановление и зачистка формовочно-склеечной оснастки	7	По нормам ГОСТ 12.1.005–88	
Подготовка оснастки: обезжиривание и нанесение жидких разделительных слоев	6	До 70	18...24
Приготовление связующих	4	До 70	18...24
Приготовление клеев	4	До 70	18...24
Изготовление препрегов и синпрегов	5	До 70	18...24
Изготовление пенопластовых и микросферотекстолитовых блок-заготовок	6	До 70	18...24
Подгоночные работы под склеивание и выкладку	6	До 70	18...24
Раскрой и выкладка препрегов, подготовка к формованию	5	До 70	18...24
Нанесение клеев, сборка и подготовка к склеиванию слоистых и сотовых конструкций	4	До 70	18...24

Продолжение табл. 1.6.9

Наименование участков	Класс чистоты воздуха	Относительная влажность воздуха, %	Температура, °С
Формование и обработка в автоклавах	7	По нормам ГОСТ 12.1.005–88	
Формование и склейка в термопечах	7	По нормам ГОСТ 12.1.005–88	
Место распрессовки технологических пакетов после формования и склейки	7	По нормам ГОСТ 12.1.005–88	
Сборка и комплектация узлов интерьера из КМ	6	До 70	18...24
Механическая обработка и утилизация отходов	7	По нормам ГОСТ 12.1.005–88	
Обрезка на автоматизированной установке водяной струей	6	До 70	18...24
Нанесение декоративных покрытий на панели интерьера	4	До 70	18...24
Контроль неразрушающими методами деталей и узлов	6	До 70	18...24

Санитарно-гигиенические требования, индивидуальные средства защиты. К работам по изготовлению деталей из ПКМ допускаются лица, прошедшие медицинский осмотр, а также обучение и инструктаж по выполняемым работам в соответствии с ГОСТ 12.0.004–90, ОСТ 1.42159–83, ОСТ 1.4221–84. К работе с вредными веществами и материалами допускаются лица не моложе 18 лет.

Санитарное содержание производственных и вспомогательных помещений должно отвечать требованиям "Инструкции по санитарному содержанию помещений и оборудования производственных предприятий".

В цехах должны быть предусмотрены бытовые помещения, изолированные от производственных помещений и состоящие из гардеробной, умывальной, душевой и туалета. Бытовые помещения должны соответствовать требованиям "Санитарных норм проектирования промышленных предприятий" и нормам "Проектирования вспомогательных зданий и помещений промышленных предприятий".

Каждый работающий должен иметь свой шкаф с двумя изолированными отделениями для раздельного хранения домашней одежды и средств индивидуальной защиты.

Хранение пищевых продуктов, прием пищи и курение в цехах (участках) запрещается.

В производственных помещениях цехов (участков) должны быть установлены умывальники с холодной и горячей водой, снабженные мылом, бумагой или воздушным полотенцем.

Применяемые средства индивидуальной защиты должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.4.011–89. Выбор конкретных типов (марок) средств индивидуальной защиты должен проводиться в зависимости от опасных и вредных свойств используемых веществ, материалов, а также условий применяемого производственного процесса, операции и применяемого оборудования, оснастки, инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Амиров Ю.Д.** Научно-техническая подготовка производства. М.: Экономика, 1989. 226 с.

2. **Боголюбов В.С.** Формообразующая оснастка из полимерных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 183 с.

3. **Боголюбов В.С.** Перспективы развития композитного авиастроения // Технологические системы. УкрНИИАТ. 1999. № 1. С. 40 – 47.

4. **Бойко В.В.** Научные основы комплексной стандартизации технологической подготовки производства. М.: Машиностроение, 1982. 319 с.

5. **Гавриш А.П., Ефремов А.И.** Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства. Киев: Техніка, 1982. 21 с.

6. **Гайдачук А.В.** Общие принципы и правила проектирования технологических процессов и операций производства изделий авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2003. Вып. 4(39). С. 165 – 171.

7. **Гребеников А.Г., Глушкова А.И., Волокитин И.Г.** Особенности разработки чертежей форм для выклейки деталей интерьера салона пассажирского самолета из композиционных материалов с использованием графической системы КОМПАС. График 5-5 // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков: ХАИ, 1998. Вып. 2. С. 275 – 280.

8. **Забашта В.Ф.** Об интегральных сборочных конструкциях из композиционных материалов // Авиационная промышленность. 1995. № 3 – 4. С. 23 – 28.

9. **Забашта В.Ф.** Техническая подготовка производства конструкций из композиционных материалов. Киев: Техніка, 1993. 147 с.

10. **Забашта В.Ф., Кривов Г.А., Бондарь В.Г.** Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения. Киев: Техніка, 1993. 157 с.

11. **Забашта В.Ф., Бондарь В.Г.** Технологическая подготовка производства конструкций из композиционных материалов // Технологические системы. 1999, № 2. С. 41 – 42.

12. **Климакова Л.А., Комиссар О.Н.** Методология создания интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов для перспективной авиационно-космической техники // Авиационная промышленность. 2000. № 7. С. 19 – 22.

13. **Король В.Н.** Организация научно-производственной базы для создания конструкций из КМ // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2003. Вып. 3(38). С. 108 – 114.

14. **Крысин В.Н.** Технологическая подготовка авиационного производства. М.: Машиностроение, 1984. 200 с.

15. **Матусевич В.И., Бойко Ю.Р.** Концепция и планы комплексного решения задач автоматизированного проектирования технологической подготовки и управления самолетостроительным производством // Технологические системы. УкрНИИАТ. 1999. № 1. С. 77 – 82.

16. **Мялица А.К.** Основные принципы технологической подготовки машиноориентированного производства авиационной техники // Открытые информационные компьютерные интегрированные технологии. Харьков: ХАИ, 1998. Вып. 2. С. 3 – 8.

17. **Павлов И.В., Забашта В.Ф.** Информационные системы в организации и управлении производством // Технологические системы. 1999. Вып. 1/99. С. 72 – 77.

18. **Петропольский В.С.** Разработка рациональных конструктивно-технологических решений формообразующей оснастки для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов: Дис. канд. техн. наук. Киев, 1998. 17 с.

19. **Rapid** Fabrication of Flight Worthy Composite Parts / Pierre H. Jouin, C. John etc // 37th International. SAMPE Symposium. March 9 – 12, 1992. P. 878 – 891.

20. **Fabrication** of Low Cost Composite Tooliny for Filament Winding Large Structures / Timathy S. Miller etc // 37th International SAMPE Symposium. March 9, 1992. P. 1160 – 1169.

Глава 1.7

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ НАМОТКИ

1.7.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ НАМОТКИ

Намоткой называют технологический процесс формирования заготовок деталей, имеющих форму тел вращения (например, из волокнистых композиционных материалов – КМ) посредством подачи и укладки на поверхность технологической оснастки (оправки), один из элементов которой вращается по заданным траекториям и с заданным натяжением непрерывного армирующего наполнителя (в виде нитей, жгутов, лент, тканей, пленок и т.д.), пропитанного полимерным связующим (СВ). Оправка обычно имеет конфигурацию и размеры, соответствующие внутренним размерам изготовляемой детали. Во время намотки или после нее следует уплотнение структуры заготовки и термообработка (отверждение), в результате чего фиксируется форма детали и образуется окончательная структура полимерного композиционного материала (ПКМ). Оправка после отверждения материала обычно удаляется. В некоторых случаях она (или ее элементы) могут оставаться и выполнять функцию конструктивных элементов детали.

Намотка – один из самых производительных способов изготовления (рис. 1.7.1). Одной из особенностей метода является сложная взаимозависимость оборудования, оснастки, технологических режимов и исходных компонентов ПКМ для получения деталей с необходимыми свойствами.

При намотке решаются одновременно две задачи: формирование КМ с заданными структурными параметрами; формование основных поверхностей детали требуемой геометрии, точности и чистоты.

Основным преимуществом этого метода является возможность точно ориентировать армирующий материал (АМ) в заданном направлении с натяжением в соответствии с распределением напряжений в элементе конструкций, т.е. получать КМ с заданной анизотропией прочности и жесткости.

Метод намотки активно развивается с 60-х годов XX столетия. Он применяется для изготовления труб различного диаметра, емкостей, сосудов, трансмиссионных валов, элементов конструкций, являющихся телами вращения, изделий коробчатого сечения, деталей геометрической формы типа лопастей и более сложного вида и др. Технологическое оборудование позволяет получать детали с характерными размерами от нескольких десятков миллиметров до 10 м и более.

Существует несколько классификаций видов намотки в зависимости от выбранных признаков.

По способу получения заготовки виды намотки делятся на "сухую" и "мокрую". Суть сухого метода намотки заключается в том, что АМ перед установкой на намоточный станок предварительно пропитывается связующим на пропиточных машинах. Это позволяет обеспечить не только качественную пропитку, но и равномерное содержание СВ. Для регулирования вязкости СВ применяют различные растворители. Полученные таким способом полуфабрикаты (ПФ) называют препрегом. После нанесения связующего препреги проходят через камеры предварительной сушки, в которых происходит удаление растворителя и увеличение вязкости СВ.

Особенно эффективен этот метод для получения заготовок на основе ровингов, полотен из стекло-, угле-, органонитей и лент.

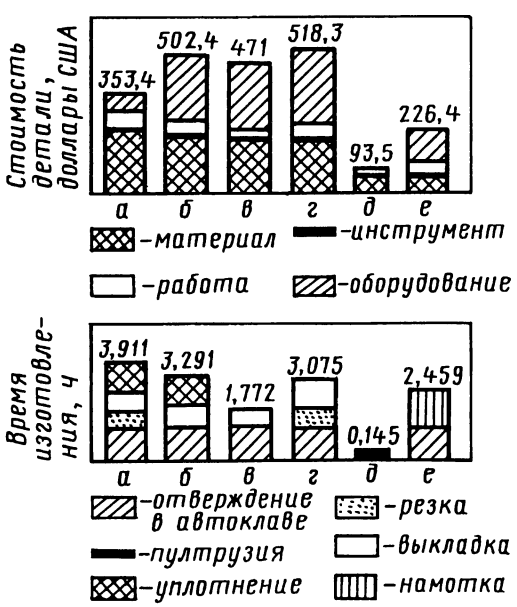


Рис. 1.7.1. Сравнительная характеристика методов изготовления 24-слойной детали объемом 0,09 м^3 при годовом выпуске 2000 шт:

а – ручная выкладка; *б* – автоматизированная резка; *в* – выкладка на станке; *г* – выкладка с помощью робота; *д* – пултрузия; *е* – намотка

При использовании сухой намотки улучшаются условия и культура производства. Кроме того, повышается производительность процесса намотки в 1,5 – 2 раза благодаря повышению скорости намотки. Предварительная пропитка с использованием растворителя позволяет использовать практически любые СВ: эпоксидные, эпоксидно-фенольные, фенолформальдегидные, полиамидные.

Однако "сухая" намотка предусматривает необходимость использования специальных устройств, которые размягчают СВ в препреге (например, горячим воздухом, радиационными или контактными нагревателями). Объемное содержание АМ в препреге выше 65 %; имеет технологические ограничения при формировании фасонных поверхностей. Стоимость деталей, полученных этим способом, более высокая по сравнению с "мокрым" способом.

Для обеспечения качественного соединения между собой отдельных слоев и монолитности требуются значительные усилия и предварительный нагрев препрега. Жизнеспособность препрегов составляет лишь несколько месяцев. Эти ограничения обусловили более широкое распространение "мокрой" намотки, хотя для него характерен больший расход СВ.

Мокрая намотка отличается тем, что АМ пропитывается СВ непосредственно перед укладкой на оправку. Необходимая вязкость связующего обеспечивается выбором соответствующего СВ и его подогревом в пропиточном устройстве. Этот способ требует более низкого контактного давления формования, а следовательно, и оборудования с меньшей мощностью привода. Преимущества этого способа наиболее полно проявляются при изготовлении крупногабаритных деталей сложной конфигурации. В дальнейшем основное внимание будет уделено именно "мокрой" намотке.

По схеме укладки выделяют тангенциальную (окружную, поперечную), продольную, спиральную намотки, их комбинацию или совмещение. Некоторые кинематические схемы спиральной намотки оболочек двойной кривизны приведены на рис. 1.7.2. Совмещенная намотка позволяет получить плетеную структуру стенки детали в отличие от слоистой, осуществляемой при последовательной реализации способов (рис. 1.7.3). Возможные варианты продольно-поперечной намотки приведены на рис. 1.7.4.

Так как окончательно не выработана общепризнанная единая классификация наматываемых тел, то наиболее целесообразно использовать классификатор, основанный на конфигурации изготовляемых деталей и условии обеспечения равновесия КВП на поверхности оправки (табл. 1.7.1).

По условию обеспечения равновесия ПФ на поверхности оправки различают следующие виды намотки: геодезическую; негеодезическую; кусочно-непрерывную.

Геодезическая намотка предусматривает укладку ПФ по траекториям без учета сил трения, т.е. ПФ находится в положении равновесия на всей траектории укладки.

Негеодезическая намотка (укладка ПФ в пределах линий предельного отклонения) предусматривает укладку ПФ по траекториям с учетом сил трения.

Кусочно-непрерывная намотка состоит из геодезических (негеодезических) траекторий укладки ПФ на ограниченных участках поверхности оправки с точками перехода с участка на участок, в которых ПФ удерживается механическим способом (например, с помощью штырей).

Преимущество предложенного классификатора заключается в возможности к расширению и дроблению по вертикали. Так, класс "тела вращения" может быть разбит на подклассы: с прямой образующей (цилиндр, конус), с криволинейной образующей (полусфера, сфера и т.д.), с комбинированной образующей (цилиндрические баллоны давления). Поэтому в классификаторе количество классов и подклассов может постоянно изменяться по мере развития метода намотки.

Примененная выше классификация намотки по схеме укладки ПФ является частным случаем предложенного классификатора:

кольцевая укладка — геодезическая (негеодезическая) укладка с углом армирования, близким к 90°;

веерная и продольная – геодезическая (негеодезическая) с углом армирования, близким к 0°;

спиральная и плоскостная – геодезическая (негеодезическая) с переменным углом армирования.

Намотка может также применяться как метод предварительной укладки ПФ с последующим формированием заготовки другими способами.

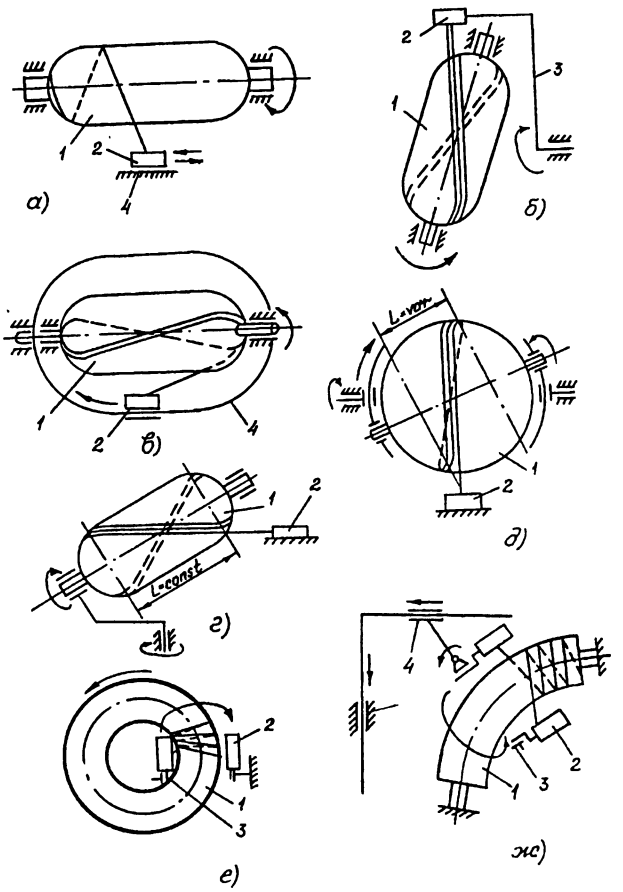


Рис. 1.7.2. Кинематические схемы спиральной намотки оболочек двойной кривизны (*1* – оправка; *2* – нитераскладчик (НР); *3* – планшайба; *4* – направляющая):
движущиеся НР, *а* – возвратно-поступательно, *б* – по окружности; *в* – по замкнутой криволинейной направляющей, неподвижные НР и вращательное движение оправки *г* – в двух плоскостях, *д* – в трех плоскостях, вращение НР на планшайбе· *е* – вокруг кольцевой оси торовой оправки; *ж* – вокруг оси оправки и движение планшайбы по системе направляющих вдоль оси оправки

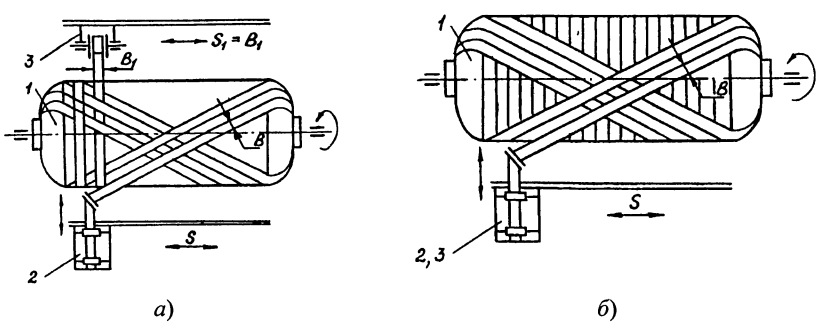
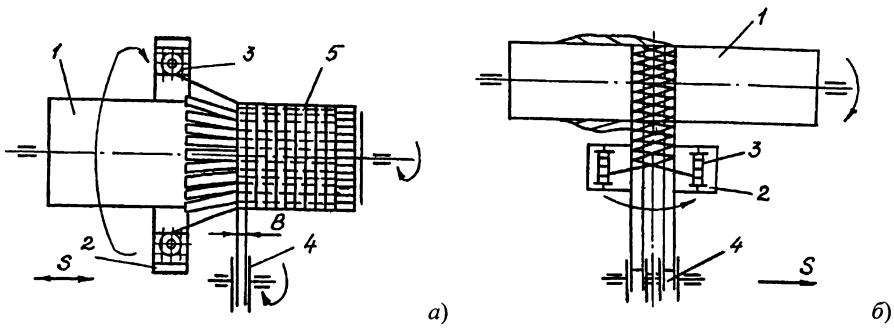
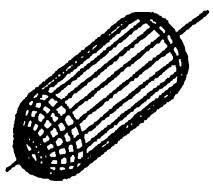
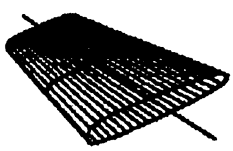
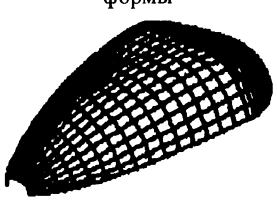


Рис. 1.7.3. Схемы совмещенной (*а*) и последовательной (*б*) спирально-кольцевой намотки:
1 – оправка; *2* – НР спиральной намотки, *3* – НР кольцевой намотки



1.7.4. Схемы продольно-поперечной намотки:
а – продольно-кольцевая; *б* – косослойная; *1* – оправка; *2* – вертлюг; *3* – катушки АМ продольного направления; *4* – катушки АМ кольцевого направления

1.7.1. Классификатор наматываемых деталей

Конфигурация изделия	Траектория укладки ПФ на оправку		
	геодезическая	негеодезическая	кусочно-непрерывная
Тела вращения 	+	+	+
Тела выпуклого сечения с прямой образующей 	+	–	–
Тела произвольной формы 	–	–	–

Примечание. "+", "–" обозначено наличие или отсутствие методов расчета программ управления намоткой (ПУН).

Развитие метода намотки продолжается в направлении изготовления неосесимметричных тел и тел более сложной формы и создания изделий с новыми структурными схемами армирования.

1.7.2. ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА

Основными элементами технологического оснащения процесса намотки являются: намоточные станки (НС); лентоформующие тракты (ЛФТ); технологические оправки; дополнительная технологическая оснастка.

К нему предъявляются следующие требования: высокий уровень автоматизации в целях исключения влияния субъективного фактора на результаты точности и качества формирования заготовки при одновременном повышении стабильности свойств получаемых деталей; универсальность с целью сокращения сроков освоения новых видов деталей; простота и экономичность в эксплуатации; обеспечение контроля и возможности корректировки параметров процесса изготовления деталей; высокая производительность изготовления деталей; низкая стоимость.

Модель НС, вид оснастки и тип ЛФТ определяются назначением, конструкцией и конфигурацией изготовляемой детали.

НС по конструктивному исполнению условно можно разделить на следующие основные группы: кабельного типа (для непрерывной намотки труб) (рис. 1.7.5); токарного или шлифовального типа (для намотки деталей различной формы) (рис. 1.7.6); специальные (для намотки деталей конкретного вида: тора, шара или колена) (см. рис. 1.7.2).

Наиболее распространенными являются станки токарного типа.

Для программного управления рабочими органами НС применяются следующие системы:

1. Механическая, использующая системы с индивидуальным приводом (кулачки, механические копиры, фотокопировальные устройства), которая по жесткой программе управляет циклической намоткой определенного типа деталей с жесткой схемой армирования (рис. 1.7.7);

2. Электронная, использующая системы ЧПУ на базе микропроцессорной техники или ЭВМ, которая позволяет расширить возможные схемы армирования и даже вести намотку деталей сложной формы с нециклическими схемами армирования (рис. 1.7.8).

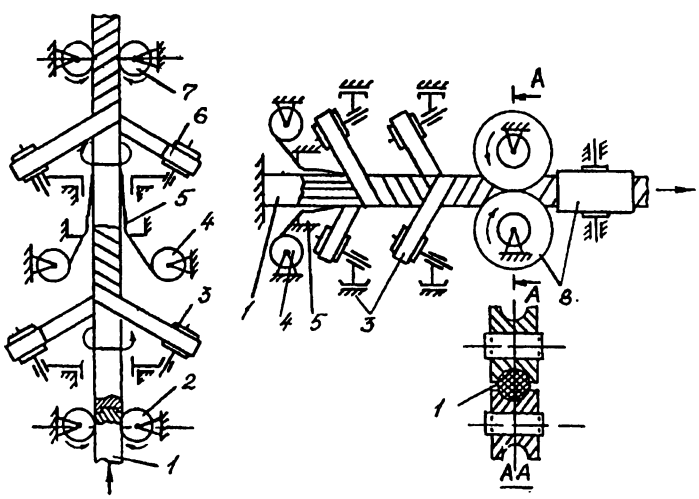
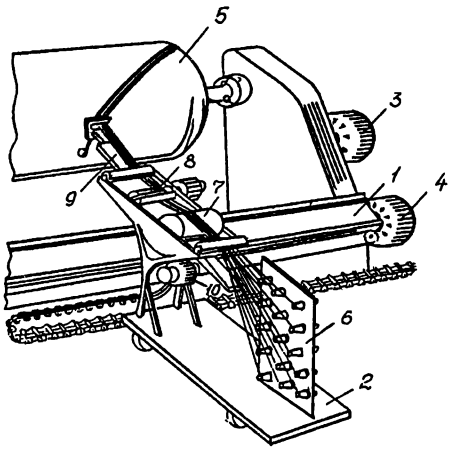


Рис. 1.7.5. Схема НС для непрерывной намотки труб с наращиваемой (*а*) и неподвижной (*б*) оправками:
1 – оправка; *2*, *7* – подающие и приемные центрирующие валки; *3*, *6* – планшайбы с НР рулонного наполнителя; *4* – направляющие устройства для продольного армирования, *5* – наполнитель для продольного армирования; *8* – тянущие валки (обогреваемые)



1.7.6. Общий вид НС токарного типа с ЛФТ:
1 – станина; *2* – суппорт; *3* – привод главного движения; *4* – привод подач суппорта; *5* – оправка; *6* – шпулярник, *7* – пропиточный узел; *8* – натяжное устройство; *9* – НР; *10* – привод подач НР

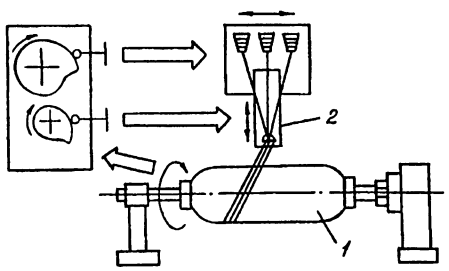


Рис. 1.7.7. НС с механической координацией вращения оправки и движения НР ленты:
1 – оправка; *2* – НР

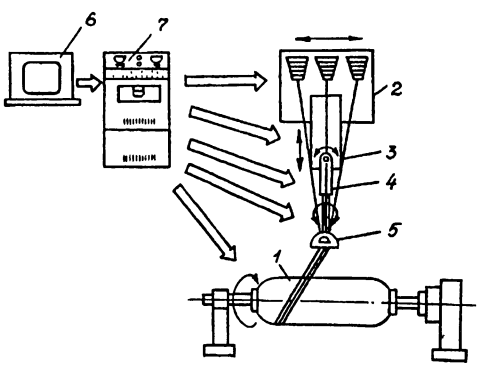


Рис. 1.7.8. НС с системой ЧПУ:
1 – оправка, *2* – суппорт; *3* – НР; *4* – разворот головки НР, *5* – разворот ленты; *6* – ЭВМ; *7* – устройство связи с объектом

Технико-экономические характеристики НС с ЧПУ приведены в табл. 1.7.2.

Основные назначения ЛФТ – сформировать ленты определенной ширины и толщины или системы прядей из исходного АМ и предварительно подготовленного СВ с необходимым их соотношением.

ЛФТ состоят из нескольких устройств (табл. 1.7.3, рис. 1.7.6). Их перечень и последовательность расположения могут быть различными. Каждое устройство кроме основных функций выполняет и дополнительные (табл. 1.7.4).

Эти особенности намотки приводят к тому, что при задании на выходе из различных ЛФТ одинаковых значений основных технологических параметров (натяжения, наноса связующего и др.) получают заготовку, а, следовательно, и ПКМ, с различными физико-механическими характеристиками. Поэтому директивные технологические материалы должны включать в себя структуру ЛФТ, схему движения и зависимость изменения натяжения препрега по длине тракта (рис. 1.7.9).

Важным параметром, определяющим рациональный выбор шага намотки, ширины ленты является характеристика ЛФТ. Она представляет собой зависимость изменения усилия, регистрируемого на выходе ЛФТ, при протягивании j нитей из ленты, состоящей из n нитей.

1.7.2. Технико-экономические характеристики намоточных станков

Модель станка	Страна	Диаметр наматываемых деталей, м	Масса оправки с деталью (макс), т	Длина наматываемых деталей (макс), м	Углы намотки, °	Число управляемых координат	Ширина укладки, мм
КУ421М	СССР	0,3. 2,5	3	10	10 90	5	100 900
КУ463Ф3		0,12 2,8	14. 45	10	8 90	5	120 900
КУ479Ф3		0,12 3,6	14 45	6	8 90	6	50 900
КУ489Ф3		0,15 1	6	4	6 90	5	40 300
КУ499Ф3		0,02 1,2	5	2,5	< 90	3	80 .300
РПН600Ф3		0,05 0,6	2	3,5	10.. 90	4	40 450
НК-9ПУ		0,05 0,5	–	0,4. 2	10 90	–	25
НК-10ПУ		0,5 1,6	–	0,5 4	5 90	–	50
НК-11ПУ		0,5 2,5	–	3 10	5 90	–	50
НК0,8-4		0,8	–	4	–	–	–
НК1,6-8		1,6	–	8	–	–	–
НК2,5-8		2,5	–	8	–	–	–
НК2,5-12		2,5	–	12	–	–	–
СПН-5М		0,2 . 2,9	10	0,8 2,5	–	–	10 300
WE-250/120	Германия	0,15. .2,5	3. 7,5	7,5	15 .90	3	160 900
WG-550/205B		0,15 . 5,5	8 . 140	16,5	25 90	3	350 900
WEH-350/1600H5/40		0,3 .3,5	7. 40	12	12 90	3	120 ..900
WEH-350/1800E5/40		0,3 . 3,5	7 .40	12	12 90	3	120 . 900
160J	США	< 4,1	45,4	11,7	–	4	63,5
RP-04/06	Италия	0,03. 0,6	1,6	2	0 90	4	–
ЛУНС-02	Украина	0,02 0,5	0,05	0,8	0 90	3	25
ЛУНС-03		0,02 0,4	0,04	1,5	0 . 90	2	25

с программным управлением

Натяжение ленты при намотке, кН	Усилие прикатки, кН	Точность геодезической укладки, мм	Скорость продольного и поперечного перемещения каретки, м/мин	Частота вращения оправки, $мин^{-1}$	Габаритные размеры L×B×H, м	Масса станка, т
2 3,5	0,5 ..2	+3	< 12	< 16,6	25,8×8,6×3,3	81,0
1,8 . 6	< 5	+2	< 24	< 33,3	26,6×8,5×3,5	55,0
0,12 6	< 6	+1	< 24	< 33,3	28,2×9,5×3,6	93,6
0,02 3	0,8...3	+2	< 24	< 16,6	16,6×7,0×2,6	35,2
0,01 2,5	< 2	+3	< 15	–	11,9×5,5×3,4	40,0
0,36 .1,8	0,5. 1,5	+1,5	< 30	< 66,6	10,4×5,3×2,1	14,3
–	0,05 0,5	–	0,1. .24	2 100	4,75×2,0×1,6	3,5
–	0,05 0,8	–	0,1 24	0,25 10	11,3×5,0×1,9	12,0
–	0,05 .0,8	–	0,1 24	0,25.. 10	18,0×6,0×2,5	25,0
–	–	–	24	60	–	18,5
–	–	–	24	20	–	24,5
–	–	–	24	10	–	28,0
–	–	–	24	10	–	31,0
0,2 2,5	–	–	18	–	6,95×5,3×2,5	18,1
< 2,0	–	+3	12 ..60	< 56,2	16,0×7,0×1,6	12,0
< 2,4	–	+3	< 45	< 60,6	26,0×8,2×4,0	20,0
< 2,5	–	+3	< 60	< 54,3	22,7×9,9×2,4	25,0
< 2,5	–	+3	< 45	–	24,7×9,9×2,4	–
< 3,0	–	–	< 76,2	< 20,0	–	–
< 0,75	–	–	–	< 60	4,6×4,4×1,7	–
0,2	–	+3	< 18	< 20	3,0×1,5×1,0	1,5
0,3	–	+1	< 18	< 18	2,5×1,5×1,5	0,5

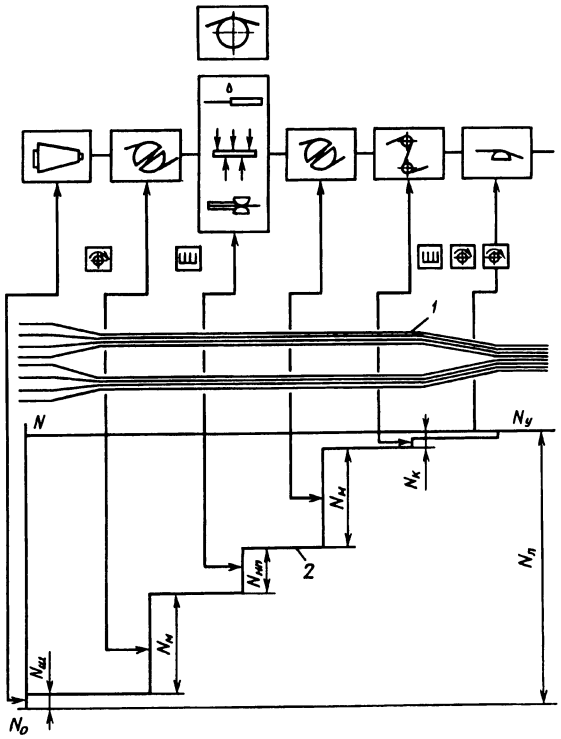
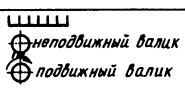


Рис. 1.7.9. Структура ЛФТ станка СНП-4:
1 – схема движения АМ по ЛФТ; *2* – изменение натяжения АМ и ПФ по длине ЛФТ

1.7.3. Условные обозначения устройств ЛФТ и выполняемых ими функций

Символ	Наименование устройства	Наименование функции
	Шпулярник	Снять АМ
	Наносное	Совместить АМ иСВ
	Пропиточное	Пропитать АМ СВ
	Отжимное	Убрать лишнее СВ
	Натяжное	Натянуть ПФ
	Выравнивающее	Выровнять ПФ
	Направляющее и разделяющее	Направить и разделить
	Компенсирующее	Скомпенсировать обратный ход ПФ
	Раскладывающее	Сформировать микроструктуру ПФ

1.7.4. Параметры, определяющие выполнение основных и дополнительных функций

Наименование устройства	Основная функция	Дополнительные функции	Основные параметры
Шпулярник	Разместить и подать исходные АМ с заданным натяжением	–	Натяжение АМ
Наносное устройство	Подать нужное количество связующего	Частично пропитать; частично натянуть; частично выровнять	Степень наноса (может не регулироваться); натяжение АМ в момент наноса контактное давление в зоне наноса; вязкость СВ; температура СВ и АМ; направление наноса СВ
Пропиточное устройство	Пропитать АМ равномерно по всему сечению	Частично натянуть; частично выровнять	Натяжение; контактное давление; вязкость; температура; скорость протяжки; расположение ПФ в процессе намотки
Натяжное устройство	Обеспечить заданное натяжение ПФ при укладке на оправку	Частично пропитать; частично удалить из структуры СВ	Силы трения; силы взаимодействия с элементами, обеспечивающими натяжение; контактное давление; углы обхвата элементов
Отжимное устройство	Обеспечить заданное количество СВ в ПФ	Дополнительно пропитать; частично натянуть	Усилие отжима
НР	Обеспечить заданную форму ПФ и внутреннюю микроструктуру	Частично натянуть; дополнительно пропитать	Контактное давление; температура раскладчика; углы обхвата элементов

По виду характеристик ЛФТ делятся на четыре группы (рис. 1.7.10). Наиболее предпочтительные ЛФТ с характеристиками *1*-го и *3*-го видов. Большинство промышленных ЛФТ имеют характеристику видов *2* и *4*.

На этапе технологической подготовки производства особое внимание необходимо уделять выбору конструкции технологической оправки и материала для нее [16]. При проектировании оправок необходимо учитывать следующие рекомендации:

наружная поверхность оправки и внутренняя поверхность детали должны соответствовать по точности формы и размеров;

форма и размеры оправки должны быть стабильными под действием силовых и температурных полей, возникающих при намотке и отверждении СВ;

оправка должна быть технологичной (минимум затрат труда и времени на изготовление и извлечение готовой детали, минимум массы).

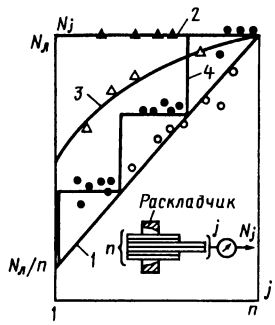


Рис. 1.7.10. Характеристики ЛФТ:
1 – с независимым движением нитей;
2 – с полным взаимодействием на уровне ленты;
3 – с частичным взаимодействием на уровне ленты;
4 – с полным взаимодействием на уровне пряди и независимым движением прядей друг относительно друга; $N_л$ – натяжение ленты

По заданному количеству циклов использования оправки можно разделить на следующие:

1. Одноразового применения;
2. Многоразового применения;
3. Комбинированного применения.

По способу изготовления и назначению оправки разделяются на неразборные, разборные из одного материала и разборные из нескольких материалов (табл. 1.7.5).

Свойства некоторых материалов для разрушаемых оправок приведены в табл. 1.7.6.

К дополнительной технологической оснастке относятся устройства для создания давления, уплотняющего структуру ПФ (ролики, прикаточные валики и т.д.), локального нагрева, технологического контроля и др.

1.7.5. Классификация оправок

Способ изготовления	Свойства оправок	Область применения
Неразборные оправки		
Металлические литые	Простая конструкция; материал – сталь, чугун, алюминий; большая трудоемкость изготовления; многоразовое применение	Крупносерийное производство, цилиндрические отсеки, трубы, конусы
Разборные оправки		
Металлические сборные	Высокая стоимость; большая трудоемкость сборки/разборки; многоразовое применение	Цилиндры с днищами ∅ 910...1520 мм
Растворимый алебастр	Большая трудоемкость изготовления; продолжительное время нахождения в пластическом состоянии; легко вымывается	Детали большого диаметра, малой серии
Хрупкий алебастр (гипс)	Требуется крепление, трудная удаляемость; одноразовое применение	Детали большого диаметра малой серии
Резиновые пневмооправки	Малая трудоемкость изготовления; легкая удаляемость; многоразовое применение	Детали небольшого диаметра, сферические оболочки
Водорастворимые песчано-полимерные	Большая трудоемкость изготовления; легкая удаляемость; одноразовое применение	Детали ∅ ≤ 01500 мм, небольшие партии
Низкоплавкие сплавы	Высокая плотность; склонность к ползучести	Сосуды длиной и диаметром ≤ 300 мм
Эвтектические сплавы, литье и медленное вращение	Легкая удаляемость	Сосуды ∅ ≤ 600 мм
Разжимные оправки	Большая трудоемкость изготовления; пригодность для высокопрочных деталей; многоразовое применение	Серийное производство цилиндров с днищами большого диаметра

1.7.6. Свойства материалов, применяемых для изготовления оправок

Свойства	Алебастр		Растворимая соль	Вымываемая смесь песка с поливиниловым спиртом
	вымываемый	хрупкий		
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	4,8	26,2	96,5	3,5
Плотность, кг/м^3	1250	1360	2080	–
Максимальная температура эксплуатации, °С	204	204	177	177
Максимально допустимая продолжительность выдержки при высокотемпературном отверждении, мин	20...25	45...55	–	–

1.7.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА НАМОТКИ

Технологический процесс (ТП) изготовления деталей из ПКМ методом намотки состоит из следующих операций и переходов:

1. Подготовка и наладка станка (разработка и отладка управляющей программы или расчет кинематики движения раскладчика и оправки; установка АМ или подготовленного ПФ в зависимости от выбранного способа намотки мокрого или сухого);

2. Подготовка оправки (сборка, закрепление закладных элементов, нанесение антиадгезионного слоя и, при необходимости, герметизирующих слоев и монтаж на станке);

3. Заправка и протяжка АМ или ПФ по ЛФТ намоточного станка, настройка узлов на поддержание заданных основных технологических параметров и проверка рисунка намотки путем пробной укладки нескольких витков;

4. Намотка заданного количества ПФ для создания необходимой толщины и структуры стенки детали. При этом ведется контроль основных технологических параметров;

5. Окончание процесса намотки, снятие оправки с заготовкой детали со станка и помещение их в термокамеру и автоклав;

6. Отверждение по заданному режиму, определяемому типом СВ, размерами детали и т.д.;

7. Снятие детали с оправки;

8. Термо- и механическая обработка детали (последнее при необходимости);

9. Контроль прочности, геометрических размеров и других параметров (герметичности, теплофизических и др.).

Последние две и шестая операции представляют самостоятельные этапы ТП и в данном разделе не рассматриваются.

Применение любого способа намотки связано с выбором рациональных параметров технологического процесса и обеспечением их контроля. Наибольшее распространение метод намотки получил при изготовлении тел вращения, обычно, укладкой ПФ в двух направлениях (например, спирально-кольцевая для баллонов высокого давления, продольно-поперечная для элементов трубопроводов, продольно-спиральная для карданных валов). Основные параметры "мокрого" метода намотки таких изделий условно можно разделить на три группы: технологические, дискретные и структурные (рис. 1.7.11).

Рациональные значения параметров первой группы определяются экспериментально и зависят от типа и вида используемого АМ, СВ, характерных размеров изготовляемой детали, конструктивных особенностей ЛФТ. В процессе намотки их величина поддерживается с точностью 3...10 %.

Параметры второй группы являются величинами дискретными, которые определяют

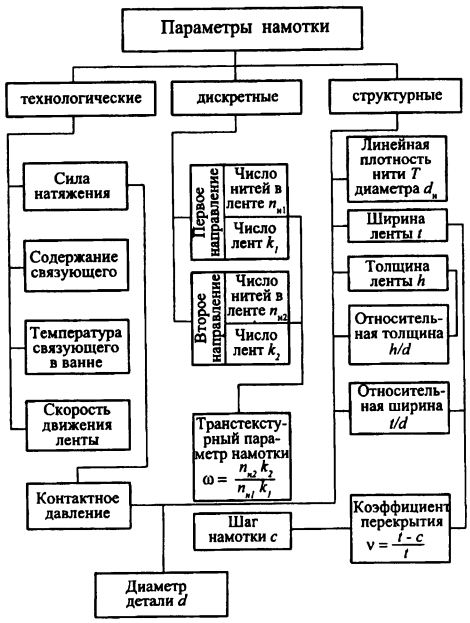


Рис. 1.7.11. Основные параметры технологического процесса намотки

структуру цикла намотки и контролируются счетными устройствами.

Параметры третьей группы определяют структуру ПКМ как на уровне элементарного слоя, так и на уровне пакета в целом. Причем, они применимы, когда к ПКМ в конструкции предъявляются требования по реализации максимальной удельной прочности. В случае выдвижения иных требований (обеспечения заданных теплофизических, жесткостных характеристик и т.д.) необходим иной подход к выбору рациональных значений параметров.

В качестве армирующих элементов в конструкционных ПКМ, получаемых намоткой, применяют непрерывные волокна в виде нитей и жгутов различной линейной плотности и степени крутки. В качестве матриц – эпоксидные, эпоксифенольные, полиэфирные, фенолоформальдегидные, полиимидные и другие полимеры.

Подготовка АМ включает в себя: испытание АМ на соответствие паспортным данным; расшлихтовку; аппретирование; снование (перематывание).

Контроль исходного АМ заключается в испытании его на соответствие техническим требованиям по механическим характеристикам, размерам, номеру нити, плотности ткани или ленты, содержанию влаги и замасливателя. Обычно проводятся контрольные испытания для определения прочности АМ при растяжении.

Расшлихтовка – удаление замасливателя с поверхности волокон перед пропиткой их СВ. Для этого АМ пропускают через бензин, водный раствор олеиновой кислоты (2 %) и триэтаноламина (1 %) или другие растворители. Удалить замасливатель можно также прокаливанием АМ при 200...450 °С. Хороший эффект дает отмывка замасливателя с применением ультразвука. Этот метод отличается универсальностью и применяется для удаления любой марки замасливателя. Чтобы ускорить расшлихтовку, иногда описанные методы сочетают.

Аппретирование – нанесение на поверхность волокон гидрофобных (водоотталкивающих) покрытий, которые повышают смачиваемость волокон СВ и снижают водопоглощение. Например, для стеклянных волокон в качестве аппретов применяют аминосилан, эмульсию этилгидросилоксановой жидкости, "волан" и др. Закрепляют аппреты нагревом волокон до 80...150 °С в течение 20...60 мин.

Снование волокон проводят в тех случаях, когда они поступают на бобинах, не приспособленных для намотки или пропитки.

Снование – это перемотка одной или нескольких параллельных нитей, жгутов, лент или тканей на одну паковку с параллельной укладкой строго встык. Если перематывается только одна нить, то снование называется перематыванием.

При сновании необходимо обеспечить равномерное натяжение перематываемого АМ в течение всей операции. Перематываться должно такое количество АМ, которое необходимо для выполнения полного технологического перехода и обеспечения непрерывной работы оборудования в течение заданного времени (часа, полусмены, смены). Для этого концы лент или тканей соединяют в непрерывный АМ. При сновании АМ укладывают в ровницу – однонаправленную полосу. Снование часто совмещают с пропиткой.

Полимерная матрица образуется после отверждения СВ. К СВ и матрицам предъявляется весьма широкий комплекс требований как в процессе обработки материала, так и при эксплуатации деталей из ПКМ. Комплекс требований на этапе обработки следующий: хорошая смачивающая способность и высокая адгезия к АМ; низкая усадка при отверждении; низкая вязкость; большая "жизнеспособность"; высокая скорость отверждения.

Комплекс требований, которые предъявляются к матрицам на этапе эксплуатации: высокие физико-механические характеристики; высокая термостойкость, стойкость к климатическим и биологическим факторам.

Выбор СВ определяется особенностями АМ, условиями изготовления и эксплуатации деталей.

В методе намотки выбор ЛФТ является более критичным, чем выбор АМ. Это приводит к отсутствию единого мнения о рациональных значениях технологических параметров. Поэтому их выбирают с учетом особенностей ЛФТ (его характеристики, структуры и т.д.).

Наиболее предпочтительной является конструкция ЛФТ, при которой обеспечивается независимое прямолинейное движение нитей по тракту. Это обеспечивается сведением в конструкции ЛФТ к минимуму количества вращающихся элементов, больших углов их охвата АМ и раздельной заправкой нитей по тракту.

Формирование структуры ПФ должно производиться непосредственно в месте его укладки на оправку. Для этого используют специальные конструкции НР.

Наиболее высокие и стабильные прочностные характеристики достигаются при фильерном способе отжима. В качестве отжимных элементов целесообразно применять фильеры из твердого сплава ВК-6 или ВК-8 (ГОСТ 9453–75), используемые при волочении проволоки. В этом случае рекомендуется следующая компоновка ЛФТ: шпулярник – пропиточный узел – отжимной узел – натяжитель – НР.

Выполнение вышеуказанных рекомендаций позволяет вести намотку с минимально возможным натяжением, не превышающим 0,05...0,1 Н/текс. Варьирование скорости намотки в пределах 0,1...0,5 м/с не приводит к существенному изменению прочности органопластика.

Температура СВ в пропиточной ванне для эпоксидных связующих обычно составляет 55...65 °С и поддерживается с точностью ± 2 %.

Оптимальное содержание СВ в ПФ равно 42...45 %, что достигается применением фильерного способа отжима.

Линейная плотность исходной нити выбирается в зависимости от требуемой толщины элементарного слоя. С точки зрения прочности и эффективной обработки предпочтительны нити 29,4 текс. Повышение линейной плотности нитей с 14,3 до 58,8 текс приводит к падению коэффициента реализации прочности АМ в ПКМ от 0,92...0,95 до 0,7...0,75.

Ширину технологической ленты рекомендуется выбирать не более 0,1 диаметра детали. В случае использования препрега (или при невозможности независимого движения нитей в ленте друг относительно друга) ширина ленты выбирается с учетом возможно допустимой степени реализации исходной прочности АМ в ПКМ (рис. 1.7.12).

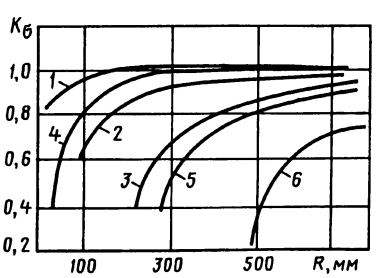


Рис. 1.7.12. Зависимость степени $K_б$ реализации прочности от ширины R ленты для различных наполнителей:
1, 4 – t = 5 мм; *2, 5* – t = 20 мм; *3, 6* – t = 50 мм; *1 – 3* – стеклоленты; *4 – 6* – углеродные ленты

Важным с точки зрения обеспечения качества является согласованный выбор диаметра фильеры и их количества. Сведение к минимуму влияния колебания натяжения в процессе намотки на содержание СВ (менее 5 %) достигается выбором количества нитей, проходящих через одну фильеру из рабочей зоны (рис. 1.7.13). Данные приведены для органонитей базовой линейной плотности 58,8 текс. При использовании нитей другой плотности их число необходимо привести к базовой.

Расчет содержания СВ можно провести по зависимости:

$$\psi = \psi_0 + \frac{n(\psi_n - \psi_0)(n-1)T}{\pi\rho\psi_n d_0^2 - nT},$$

где n – число нитей, проходящих через фильеру; ρ, T – удельная и линейная плотности нитей; ψ_0, ψ_n – коэффициенты, определяемые экспериментально (для нитей СВМ и АРМОС $\psi_0 = 0{,}22...0{,}23$; $\psi_n = 0{,}83...0{,}85$).

При этом для попадания в рабочую зону расчетное значение ее должно быть не ниже, чем

$$\psi = -0{,}963 + 2{,}3557 d_\text{ф} - 2{,}8067 d_\text{ф}^2 + 1{,}2047 d_\text{ф}^3.$$

Если пропускание всех нитей через одну фильеру не позволяет им находиться в рабочей зоне, то нити разделяются на два потока или более и подбирается новый диаметр фильеры, дающий необходимое содержание СВ.

При изготовлении деталей типа баллонов высокого давления, к которым предъявляются повышенные требования по удельным весо-

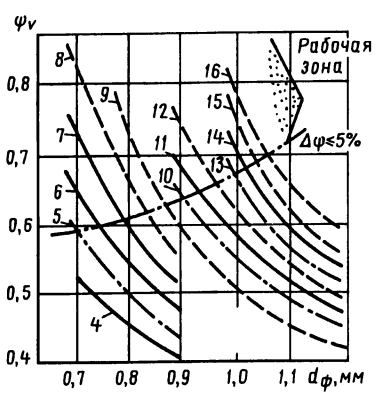


Рис. 1.7.13. Влияние диаметра $d_\text{ф}$ фильеры и количества n нитей в ленте на значение коэффициента ψ_v армирования

вым параметрам, необходимо особенно осторожно подходить к выбору шага намотки, зависящего от конструктивного оформления ЛФТ, параметров технологической ленты и др. Задавшись минимально допустимой величиной теоретического коэффициента K_σ реализации прочности исходного АМ (обычно не ниже 0,8), необходимо рассчитать параметр

$$(\alpha)_\text{т} = \frac{(1-K_\sigma)\varepsilon_\text{в}^+}{2} 10^2,$$

где $\varepsilon_\text{в}^+$ – предельная осевая деформация АМ, %.

Затем рассчитывается параметр α:

$$\alpha = h/d,$$

где h – толщина технологической ленты; d – диаметр наматываемой детали.

Если $(\alpha)_\text{т} > \alpha$, то намотку рекомендуется вести, укладывая ленты встык (лента в ленту) либо с небольшим перекрытием. При $(\alpha)_\text{т} < \alpha$ выбор шага зависит от вида характеристики тракта. При характеристике вида *2* (см. рис. 1.7.10)

$$C = \left(1 - \frac{(1{,}7...1{,}95)h}{2h + d\varepsilon_\text{в}^+}\right),$$

где t – ширина ленты.

Если тракт имеет характеристику вида *4* (см. рис. 1.7.10) с n ступенями, то шаг выбирается из ряда значений, рассчитанных по формуле

$$C = \left(1 - \frac{(0{,}95...0{,}97)i}{n}\right) t,$$

где $i \le n$; $i = 1, 2, 3....$

Выбор дискретных параметров намотки тесно связан с прочностными расчетами, из которых определяется количество АМ, необходимого для укладки в том или ином направлении.

Для повышения стабильности прочностных характеристик деталей в партии рекомендуется после намотки до отверждения СВ выдерживать их при нормальной температуре (по возможности более 24 ч).

Замена намотки детали отдельными нитями на намотку ровницей снижает прочность на 15...20 %. Если при намотке произошел обрыв ленты, то связывание необходимо про-

изводить "по отдельным нитям", а не одним крупным узлом. Последнее может привести к снижению прочности на 10 %.

Косвенным параметром, зависящим от натяжения и угла намотки, является контактное давление. Экспериментально установлено существование зависимости между коэффициентом K_σ и соотношением контактного давления и натяжения (рис. 1.7.14). Этот факт необходимо учитывать при изготовлении малогабаритных деталей, для которых прочность слоев с различными углами армирования будет сильно различаться, что следует из рис. 1.7.14 и зависимости

$$\frac{q}{N} = \frac{\sin^2 \alpha}{R},$$

где α – угол армирования.

Для осуществления процесса намотки необходимо сложное программное обеспечение, позволяющее рассчитать траекторию укладки ПФ на поверхности оправки и соответствующие ей перемещения рабочих органов НС (вращение оправки, перемещения НР и др.). Рассчитанные перемещения рабочих органов УНП могут передаваться в систему ЧПУ НС с помощью перфолент, магнитных лент, гибких магнитных дисков и других носителей информации или через внешний интерфейс системы ЧПУ НС.

В общем случае расчет программы для реализации спиральной намотки тел вращения типа баллонов давления, конусных раструбов и других состоит из следующих этапов:

1 – подготовка геометрических данных о наматываемой детали;

2 – аналитическая или графическая интерпретация геометрических данных;

3 – проверка условия возможности намотки детали;

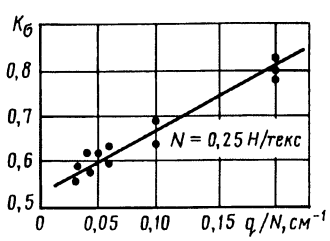


Рис. 1.7.14. Зависимость коэффициента K_σ реализации прочности АМ от соотношения q/N контактного давления и натяжения

4 – расчет траектории укладки ПФ на поверхности оправки;

5 – расчет перемещений рабочих органов НС;

6 – обеспечение плотной (без зазоров) укладки ПФ;

7 – подготовка программы в формате данных ЧПУ НС.

1.7.4. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НАМОТАННОЙ ДЕТАЛИ

Для деталей, полученных с применением намотки, необходим большой объем проверочных испытаний и рациональные методики их проведения. Это связано с особенностями метода, о которых упоминалось выше. Особенно возрастает роль испытаний для малогабаритных элементов конструкций из КМ, в частности, баллонов давления. Цель таких испытаний состоит в определении оптимального соотношения толщин кольцевых и спиральных слоев, обеспечивающих для заданного давления P получение минимальной массы конструкции при выбранных технологических параметрах намотки на данном ЛФТ.

Теоретической основой методики является инвариантная зависимость относительного коэффициента массовой эффективности от технологических параметров изготовления, найденная для малогабаритных баллонов давления.

Результатом испытаний должны быть данные о количестве АМ, которые необходимо заложить в кольцевые (количество лент первого направления) и спиральные (количество лент второго направления) слои.

Ниже приведена методика испытаний малогабаритных (до 250 мм) органопластиковых баллонов. Форма днища принята изотензоидная.

Методика предусматривает необходимость изготовления и испытания двух баллонов с характерными видами разрушения по кольцевым и спиральным слоям и контрольного баллона с оптимальными параметрами. Характерной особенностью контрольного оптимального баллона является одновременность разрушения спиральных и кольцевых слоев ПКМ. Методика учитывает отличие в конструкционной прочности слоев ПКМ различного направления, поэтому исходная прочность σ, используемая в расчетах баллонов с характер-

ными видами разрушения, принимается усредненной по имеющимся справочным данным.

1. Определение количества лент второго направления K_2, необходимых для намотки спирального слоя баллонов при выбранном значении коэффициента n запаса:

$$K_2 = \frac{\pi n p_p d^2 \rho_a}{4\sigma \cos(\varphi) T K_{н2}},$$

где d – наружный диаметр баллона; ρ_a – плотность арматуры; φ – угол армирования; T – линейная плотность нити; $K_{н2}$ – число нитей в ленте второго направления; p_p – разрушающее давление.

2. Определение количества лент первого направления, которое необходимо уложить на длине L цилиндрической части баллонов:

$$K_1 = \frac{L K_2 K_{н2} (3\cos^2(\varphi) - 1)}{\pi K_{н1} d \cos(\varphi)} \xi_{1,2},$$

где $K_{н1}$ – число нитей в ленте первого направления; $\xi_1 = 0{,}5...0{,}65$ – для первого баллона; $\xi_2 = 1{,}1... 1{,}25$ – для второго баллона.

3. Изготовление двух баллонов с параметрами по п. 1–2 и определение объема V и массы G_1, G_2 (без учета закладных элементов).

4. Проведение испытания баллонов с определением разрушающих давлений p_1 и p_2.

5. Расчет количества АМ для оптимального баллона, обладающего минимумом массы для заданного давления:

$$(K_2)_0 = \frac{\pi n p_p d^2 \rho_a}{4\sigma_0 \cos(\varphi) T K_{н2}};$$

$$(K_1)_0 = \frac{L(K_2)_0 K_{н2} (3\cos^2(\varphi) - 1)}{\pi K_{н1} d \cos(\varphi)} \xi_0;$$

$$\xi_0 = \frac{\xi_1}{2}\left(\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right) + \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{1/2}\right);$$

$$W_{max} = \frac{\xi_0^2 W_1}{\xi_1(2\xi_0 - \xi_1)};$$

$$\sigma_0 = \frac{W_{max}\left\{\xi_0\left[3\cos^2(\varphi) - 1\right] + 1\right\}}{\cos^2(\varphi)},$$

где $W_1 = \frac{p_1 V}{G_1}$; $W_2 = \frac{p_2 V}{G_2}$.

6. Изготовление контрольного баллона с параметрами по п. 5 для определения фактического разрушающего давления. В реальных условиях отклонение заданного давления от фактического не должно превышать +5 %.

Применение данной методики позволяет на 40...60 % сократить объем испытаний малогабаритных баллонов давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Росато Д.В., Грове К.С.** Намотка стеклонитью: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1969. 310 с.

2. **Калинчев В.А., Макаров М.С.** Намоточные стеклопластики. М.: Химия, 1986. 272 с.

3. **Забашта В.Ф., Кривов Г.О., Бондарь В.Г.** Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения. Киев: Техника, 1993. 160 с.

4. **Конструкционное** материаловедение / В.К. Борисевич, А.Ф. Виноградский, Я.С. Карпов, В.Я. Самойлов, Н.И. Семишов. Учебник: В 2 кн. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2002. Кн. 2. Неметаллы и композиты. 342 с.

5. **Цыплаков О.Г.** Научные основы технологии композиционно-волокнистых материалов. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1979. 317 с.

6. **Гайдачук В.Е., Кобрин В.Н., Молодцов Г.А.** Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов: Учеб. пособие. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. 332 с.

7. **Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В.** и др. Композиционные материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

8. **Теория** и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов – 21 век / Труды международной конференции 30 января – 2 февраля 2001, МГУ. М.: Изд-во НИАТ, 2001. 748 с.

9. **Теория** и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) / Труды международной конференции 27 – 30 августа 2003, МГУ. М.: Знание, 2004. 804 с.

10. **Материалы** и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3-х т. Т. 2. Передовые технологии производства / В.В. Скороход, Н.А. Никифоров, С.В. Резник и др.; Под ред. С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 296 с.

11. **Любутин О.С.** Автоматизация производства стеклопластиков. М.: Химия, 1969. 256 с.

12. **Рач В.А.** Влияние характеристик лентоформующих трактов намоточных станков на конструкционную прочность волокон в малогабаритных оболочках // Механика композитных материалов. 1991. № 1. с. 143 – 148.

13. **Любин Дж.** Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 2. М.: Машиностроение, 1988. 488 с.

14. **Шукшунов В.Е., Жуковский В.Г., Евченко А.И.** и др. Автоматизированные системы управления намоточными станками. М.: Машиностроение, 1985. 208 с.

15. **Поляков В.П., Зеленский Э.С.** Некоторые особенности технологии намотки изделий из композиционных материалов // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. 1978. № 3. С. 293 – 297.

16. **Рыбников С.И.** Автоматическое управление намоткой. М.: Энергия, 1972. 112 с.

17. **Зеленский Э.С., Кульков А.А., Куперман А.М.** и др. Технология намоточных пластиков // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. 1989. № 5. С. 515 – 520.

Глава 1.8

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В начале XXI века применение углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) реализуется преимущественно в перспективных объектах авиационно-космической техники, роль которой продолжает повышаться в решении актуальных проблем современного человечества.

Схема применения УККМ в различных температурных областях эксплуатации техники показана на рис. 1.8.1.

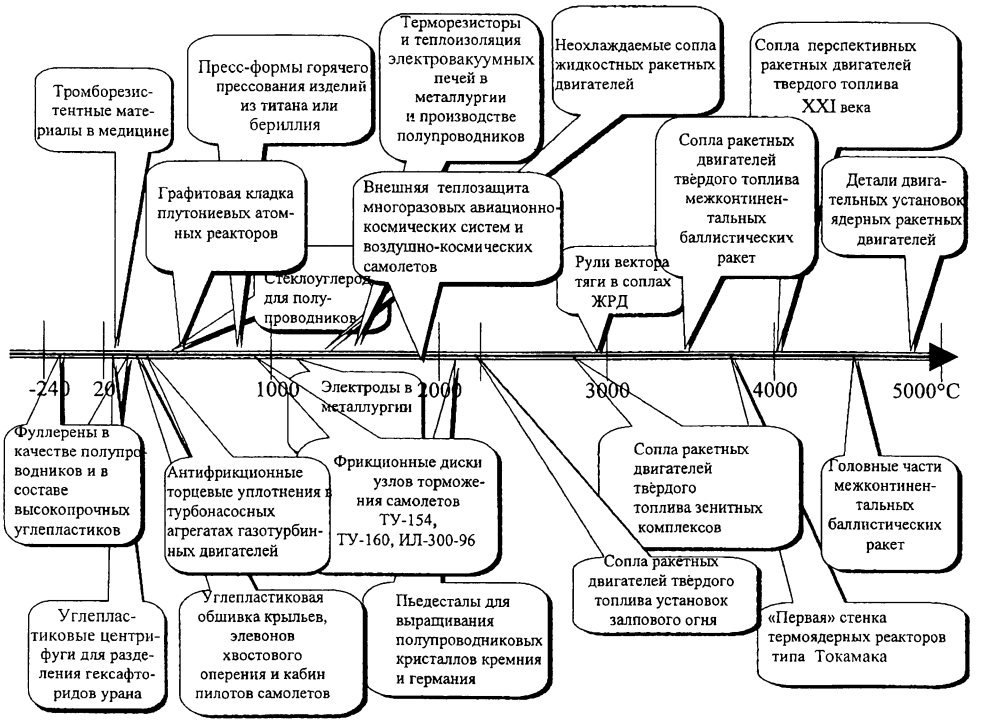


Рис. 1.8.1. Схема применения деталей из углерод-углеродных композиционных материалов в зависимости от температурных условий эксплуатации

1.8.1. МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН И ТКАНЕЙ

Производство углеродных волокон состоит из нескольких стадий, каждая из которых оказывает влияние на свойства конечного продукта. В общем виде стадии производства углеродных волокон можно перечислить в такой последовательности:

1) получение исходного продукта для формования олигомерного или полимерного волокна;

2) формование волокна и получение непрерывной комплексной нити или жгутов с различным числом элементарных волокон;

3) термостабилизация волокна в интервале температур 180 – 300 °С с целью создания в материале системы полисопряженных циклических структур в результате дегидрирования и образования межмолекулярных связей;

4) карбонизация в инертной атмосфере при температурах 300 – 1600 °С, в результате которой происходит основное увеличение содержания углерода в составе волокна;

5) высокотемпературная обработка (графитация) в инертной среде при температурах 1800 – 3200 °С, в результате которой волокно получает упорядоченную структуру;

6) модификация поверхности углеродного волокна путем электрохимической обработки или газовоздушного оксидирования при температуре около 700 °С;

7) аппретирование (или замасливание).

Промышленное производство углеродных волокон осуществляется из гидратцеллюлозных, полиакрилонитрильных или пековых волокон. Для изготовления исходных волокон используют компоненты, которые должны содержать минимальное количество примесей.

Для получения высокопрочных высокомодульных углеродных волокон применяют полиакрилонитрильные волокна, изготовленные с применением диметилформамидного или роданидного метода формования, линейной плотности 33,3; 425; 850; 1700 текс, а также многофиламентные ровинги линейной плотности 13300 и 53000 текс.

Еще одним исходным сырьем для получения углеродных волокнистых материалов служат композиционные материалы на основе волокон из нефтяного пека и триацетатцеллюлозной или полиамидной матриц.

Основными параметрами процесса являются температура и скорость нагрева, время изотермической выдержки, деформация вытяжки волокон и состав газовой среды. В процессе термохимической обработки исходных гидратцеллюлозных, полиакрилонитрильных (ПАН) и пековых волокон образуются твердые, жидкие и газообразные продукты, которые необходимо отделять друг от друга по мере их образования. Конденсация летучих продуктов загрязняет поверхность обрабатываемого волокна и может привести не только к снижению прочности, но и к потере гибкости волокна. Поэтому создаются условия селективного удаления летучих продуктов на всех стадиях процесса. В производстве сверхвысокопрочных углеродных волокон особые требования предъявляют к чистоте защитного газа – азота, в котором содержание кислорода не должно превышать 0,003 %.

В промышленности реализован ряд технологических схем изготовления углеродных волокон. Первая включает периодическое оксидирование и непрерывную термическую обработку (рис. 1.8.2). Исходный ПАН-жут формируется плетением или трощением из нитей линейной плотности 33,3 текс. Число нитей в жгуте в данной схеме может задаваться от 12 до 24. ПАН-жгут *1* наматывают на дюралюминиевый барабан *2* и оксидируют в термостате *4* в изотермическом состоянии. Далее жгут принимается на катушку *3*, которая затем переносится на шпулярник *5* агрегата непрерывной карбонизации. Длительность оксидирования зависит от плотности волокна, но не превышает 4 ч при температуре 235 °С. Оксидированное волокно подвергается высокотемпературному нагреву до 2400 °С в среде азота с вытяжкой 0…1 %. Одновременно обрабатывают 48 жгутов. Вытяжка жгутов обеспечивается двумя станами – семивальцами *6* и *9*, между которыми расположена высокотемпературная печь *7*. Время нахождения оксидированного волокна в зоне реакции не менее 40 с. Для приемки готового жгута используют шпулярник *13*. Выход жгутов осуществляется через водяной гидрозатвор *8*. После обработки в высокотемпературной печи углеродные жгуты подвергаются сушке от воды в печи *10*. Для улучшения адгезионных свойств волокон на них в ванне *11* наносят замасливатель, растворитель из которого удаляется в печи *12*. Летучие продукты пиролиза на первом этапе сжигаются в факеле *14* и каталитически разрушаются в печи *15*.

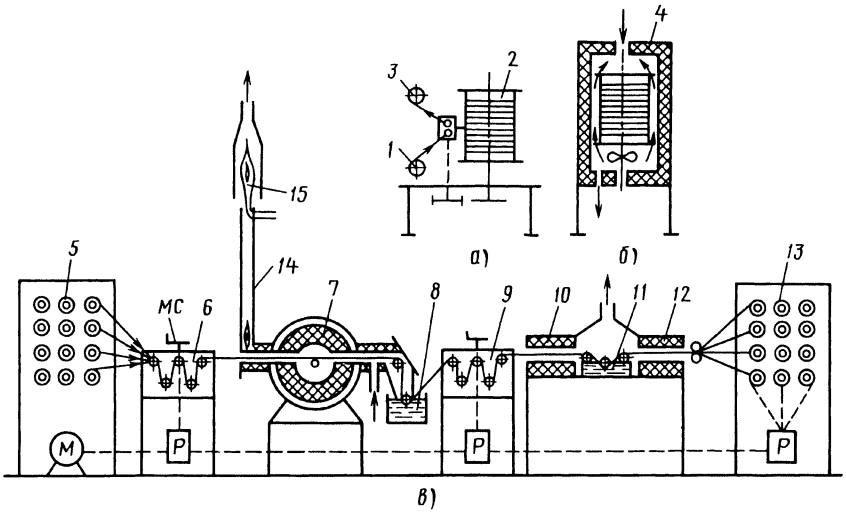


Рис. 1.8.2. Схема изготовления высокопрочных высокомодульных углеродных волокон:
а – намотка и сматывание жгута, *б* – оксидирование в термостате;
в – термическая обработка и нанесение замасливателя

По этой схеме производится отечественное углеродное волокно марки ВМН-4, которое применяется при изготовлении различных текстильных материалов методами ткачества и плетения, изготовлении деталей намоткой и для получения препрегов. Максимальная рабочая температура волокна не превышает 2400 °С.

Для получения высокомодульного углеродного волокна из ПАН-жгута, например, отечественной марки ВМН-4М, последний ускоренно нагревают до 3000 °С и в результате получают волокно с модулем упругости до 590 ГПа и рабочей температурой 2800 °С.

В промышленности реализованы также периодические способы термостабилизации и термообработки. Исходным сырьем в них является ПАН-жгут линейной плотности 425; 850; 1700; 13300 и 53000 текс. Как и в первой схеме, ПАН-жгут наматывается на дюралюминиевый барабан, который используется при оксидировании при 235 °С в специальном термостате при ступенчатом режиме нагрева. Оксидированный жгут разрезают на пасмы длиной до 70 мм и укладывают в графитовые тигли. Графитация волокна в тиглях проводится в течение нескольких десятков часов с нагревом до 3000 °С и затем с медленным охлаждением. Периодическая схема используется для изготовления отечественного высокомодульного дискретного волокна марки ВПР, предназначенного для получения композиционных материалов с хаотической схемой армирования.

Для изготовления углеродных волокон высокой прочности создана технологическая схема, включающая непрерывные способы термостабилизации и термообработки. Одновременно обрабатывают 144 ПАН-жгутов линейной плотности 450; 850 или 1700 текс.

Для изготовления углеродных тканей сначала из гидратцеллюлозного волокна методом ткачества получают техническую нить линейной плотности 192 текс, которую затем перерабатывают в ткань саржевого плетения 2/2 типа Атлас.

Вискозную ткань пропитывают водными органическими растворами стабилизаторов каталитического действия и затем сушат. При пропитке и сушке применяется обычное текстильное оборудование, но модифицированное с целью уменьшения механических нагрузок на нить. Для производства углеродных тканей и жгутов из вискозного сырья разработаны агрегаты карбонизации и графитации непрерывного действия. Промышленный агрегат для производства отечественных углеродных тканей марок УТМ-8 и ТЕКАРМ представляет собой щелевую многозонную двухкамерную печь с заданным последовательным распределением температурных зон от 100 до 800 °С и охлаждением (рис. 1.8.3).

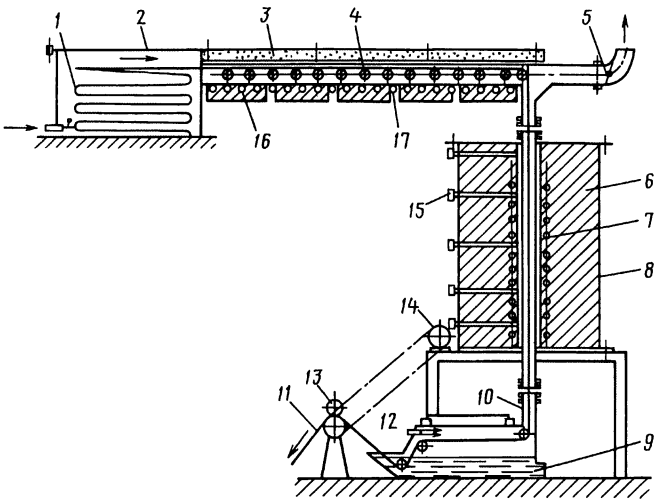


Рис. 1.8.3. Схема агрегата производства углеродных тканей:
1 – исходная вискозная ткань; *2* – загрузочная кассета; *3* – слой активированного угля; *4* – графитовые валики; *5* – патрубок отвода летучих; *6* – теплоизоляция; *7* и *16* – нагреватели; *8* – корпус печи карбонизации; *9* – водяной затвор; *10* – вертикальная камера; *11* – готовый продукт на выходе; *12* – подача сетевого газа; *13* – прижимной ролик; *14* – электропривод, *15* и *17* – термопары

Углеродную ткань получают в две стадии. Первая заключается в частичной карбонизации исходной ткани с нанесенными на ее поверхность веществами – стабилизаторами. При нагреве не выше 450 °С преобладают процессы дегидратации, происходит деструкция, расщепление глюкозидного звена гидратцеллюлозы по связям С-О и С-С, а также частичное дегидрирование. Эта стадия сопровождается значительной потерей прочности исходной вискозной нити. Вторая стадия заключается в термообработке при 800 °С частично карбонизованной ткани. При этом происходит структурирование волокна, сопровождающееся интенсивным дегидрированием.

Термообработка ткани происходит постепенно по мере ее прохождения через горизонтальную и вертикальную камеры. Скорость нагрева на первой стадии не более 4 °С/мин, которая затем повышается на второй до 30 °С/мин. В горизонтальной камере три зоны, температура в которых задается в 200; 250 и 300 °С. Готовую ткань вытягивают снизу через водяной затвор *9*, который обеспечивает герметичность реакционного пространства. Ткань сушат в воздушном калорифере при 80 °С.

Карбонизацию проводят в среде промышленного сетевого газа (основная составляющая – метан). Подача газа осуществляется с торца горизонтальной части установки и снизу в вертикальную часть. Расход газа в горизонтальную часть в 9 раз превышает поступление в вертикальную часть установки. Это соотношение пропорционально объему отводимых из каждой части летучих продуктов. При нагреве в интервале 450 – 800 °С сетевой газ выполняет защитную роль от оксидирования. При использовании в качестве рабочей среды сетевого газа на поверхности волокон в результате разложения метана образуется тонкая пленка пироуглерода. Пироуглеродное покрытие повышает прочность волокна, его плотность и огнестойкость.

В развитии технологии армирующих волокон для конструкционных КМ можно выделить несколько основных направлений: 1) низкомодульные углеродные волокна на основе вискозы; 2) высокопрочные углеродные волокна на основе полиакрилонитрила; 3) высокомодульные углеродные волокна на основе мезофазного пека; 4) высокопрочные стеклянные волокна; 5) керамические высокопрочные волокна; 6) высокомодульные органические волокна.

Основным технологическим приемом повышения прочности углеродного волокна является уменьшение его диаметра и дефектности поверхности и в объеме. Для повышения модуля упругости требуются более высокие температуры обработки, вплоть до температур,

близких к температуре сублимации углерода (3100 °С), и более совершенная ориентации кристаллитов графита вдоль оси волокна, достигаемая при его вытяжке на разных стадиях передела. Поэтому развитие углеродных волокон по качественным показателям разделилось на два разных направления: высокомодульные волокна, у которых модуль упругости возрастает не столь сильно, как прочность.

Практическое использование волокна в каждом конкретном случае определяется как техническими, так и экономическими требованиями к материалу.

1.8.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (КМ)

Формирование заготовки из углеродной волокнистой арматуры в объеме будущей детали, пропитка армирующего каркаса полимерным связующим и, наконец, формирование и уплотнение углеродной матрицы в объеме детали отличаются операциями, набором оборудования и физико-химическими процессами, протекающими в материалах (рис. 1.8.4). Целью уплотнения углеродной матрицы является максимальное приближение кажущейся плотности к истинной (пикнометрической) плотности.

Кроме одномерных и двухмерных схем армирования существуют семь хорошо сбалансированных структур укладки волокон (схем армирования): 3D, 4D, 7D, 9D, 10D и 13D. Модификации основного ортогонального 3D-плетения – это структуры 4D-L, 5D-L, а для плетения 4D – это структура 5D.

Углерод-углеродные материалы определенных схем армирования применяются, как правило, в строго определенных областях (рис. 1.8.5). Это обусловлено особенностями условий эксплуатации и требований, предъявляемых к материалу деталей определенного назначения. Кроме того, стоимость изготовления многомерно армированных материалов существенно более высокая, и поэтому их применение обосновано только в специальных отраслях техники и не является универсальным.

Сопоставить свойства углерод-углеродных КМ со свойствами конструкционного графита на основе порошкообразных углеродных наполнителей можно с помощью данных рис. 1.8.6.

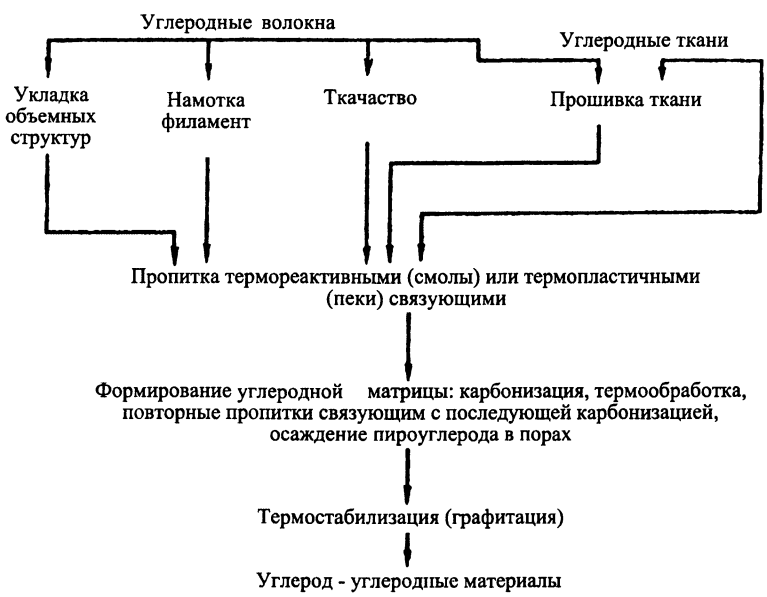


Рис. 1.8.4. Общая технологическая схема производства углерод-углеродных КМ

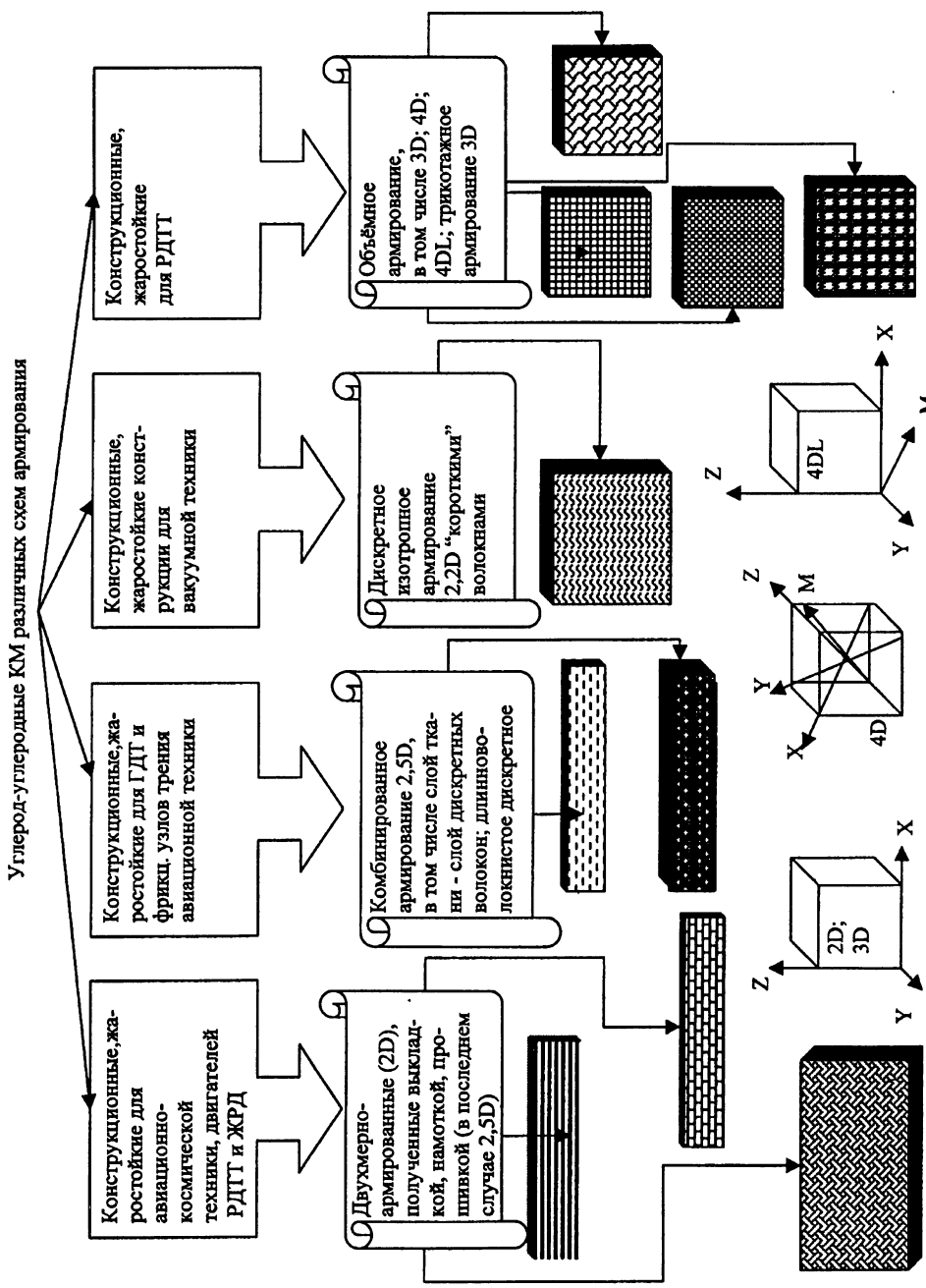


Рис. 1.8.5. Области применения углерод-углеродных КМ различных схем армирования

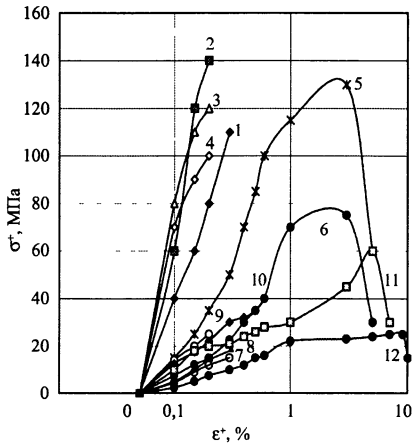


Рис. 1.8.6. Диаграмма "напряжение σ^+ – относительная деформация ε^+" для углерод-углеродного КМ трехмерной схемы армирования марки Десна Т-1 (кривые *1 – 6*) и стандартного углеграфитового материала марки ВПП-1 (кривые *7 – 12*) на основе порошкообразного наполнителя (кажущаяся плотность обоих материалов 1,93 ± 0,01 г/см^3). Температура испытания, °С:
1 и *7* – 20, *2* и *8* – 1000; *3* и *9* – 1500, *4* и *10* – 2000; *5* – 2500, *6* и *11* – 2800; *12* – 3000

Из этого рисунка следует, что армированный высокопрочным высокомодульным волокном углерод-углеродный КМ структуры 3D на порядок превышает прочность конструкционного графита. Это объясняет причину разработки таких материалов. Только при температуре 2800 °С свойства материалов сравниваются. Видимо, при этой температуре углеродная матрица стала столь пластичной, что углеродные волокна в ней проскальзывают под внешней нагрузкой и таким образом сопротивление внешней нагрузке определяется сдвиговой прочностью углеродной матрицы.

Углерод-углеродные КМ с объемной структурой армирования получают двумя основными способами. В обоих случаях первоначально из углеродных жгутов или микропластика (жгуты, пропитанные полимерным связующим) изготовляют объемный каркас (рис. 1.8.7).

Углеродные жгуты содержат в своем составе более мелкие текстильные образования – нити, отличающиеся круткой. Минимальным структурным элементом углерод-углеродного КМ являются углеродные филаменты.

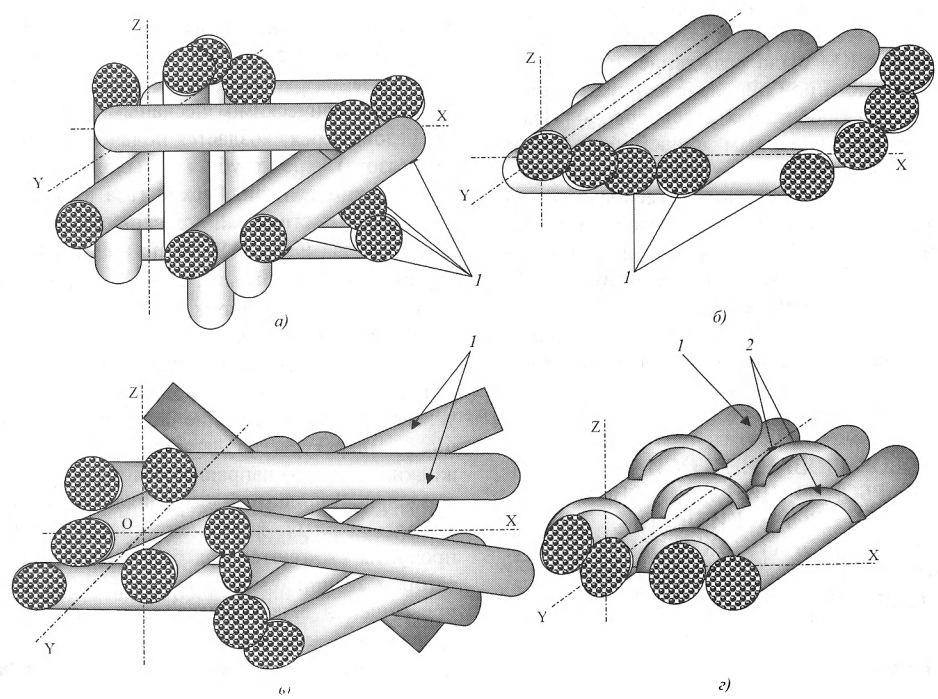


Рис. 1.8.7. Общий вид углеродных волокнистых каркасов из жгута *1* марки ВМН-4, состоящего из 24 нитей, со структурой:
3D (*а*), 2D (*б*), изотропной 2,2D (*в*) и с прошивкой 2,5D (*г*) нитью *2*, состоящей из 900 филаментов

Пространственно-армированные структуры получают плетением жгутов или сборкой каркасов из жестких стержней. Жесткие стержни предпочтительнее, когда армирующие элементы располагаются вдоль ребер или диагоналей деталей типа параллелепипеда. Стержни получают осаждением на поверхность жгутов отложений пироуглерода или пултрузией жгутов, пропитанных термореактивными смолами или водным раствором поливинилового спирта.

Применение стержней снижает разрушение волокон в процессе изготовления волокнистых заготовок, способствует более ровному расположению жгутов в заданных направлениях, позволяет применять волокна более низкого качества в части их пригодности к текстильной переработке.

Пористое пространство в объемном каркасе заполняется углеродной матрицей. Углеродные отложения матрицы в объеме пор образуют пиролитической обработкой из жидких, твердых или газообразных органических углеводородных продуктов. Кристаллическую структуру углеродного осадка доводят до более высокого совершенства высокотемпературной обработкой.

Более ранним способом формирования углеродной матрицы объемных углерод-углеродных КМ было осаждение пироуглерода, образуемого при пиролизе метана, пропана или других газообразных углеводородов. Наиболее распространенным в настоящее время способом формирования углеродных матриц дня объемно-армированных углерод-углеродных КМ стало использование изостатической карбонизации пропитанных каменноугольным пеком исходных каркасов. По первому способу был получен и применен в реальном изделии первый отечественный материал такого класса – КИМФ. По второму способу в настоящее время выпускается ряд материалов: Десна Т-1; Десна – 4; 4КМС-Л и Эра.

1.8.3. ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА ДЛЯ КАРБОНИЗАЦИИ ЗАГОТОВОК, ИХ ПРОПИТКИ ПЕКОМ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ И ПИРОЛИТИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ретортная печь карбонизации периодического действия с электрическим нагревом (рис. 1.8.8) представляет собой шахтную установку с загрузкой деталей сверху на специальную такелажную подставку *7* в форме этажерки, изготовленной из жаростойкой стали или графита.

Температура в рабочей камере печи от 180 до 1000 °С. Теплоизоляция печи изготовлена из шамотного огнеупорного кирпича. Нихромовые нагреватели развешаны на внутренней стенке камеры и пода и отделены от рабочего пространства стенкой металлической реторты *12*. Корпус реторты и ее крышка из жаропрочной стали служат излучателями тепловой энергии в рабочий объем, что повышает равномерность его температурного поля. Снаружи печь также помещена в металлический корпус *2*, температура которого не поднимается выше 40 °С.

Абсолютное давление в печи на 660... 800 Па ниже атмосферного. Разрежение достаточно для отбора летучих продуктов карбонизации и для того, чтобы в печь устремлялся воздух снаружи и тем самым исключался выход оксида углерода в цех. В то же время такое разрежение недостаточно для оказания негативного влияния на равновесие химических процессов карбонизации, которое при более глубоком вакууме может быть сдвинуто в направлении уменьшения коксового числа связующего углепластиковых заготовок. Вакуум-отбор осуществляется через патрубок *10*. Герметизация съемных крышек осуществляется концентрическими песчаными затворами *11*. Газовая среда создается подачей инертного газа (азота) через трубу *4* с выходным отверстием у днища печи. Расход газа в печь поддерживает постоянный уровень абсолютного давления. На начальном этапе нагрева камеру "промывают" инертным газом. Уровень расхода регулируют с учетом газовыделения продуктов карбонизации.

Газовые продукты карбонизации – оксид углерода, диоксид углерода, аммиак, пары углеводородов (последние могут при понижении температуры конденсироваться в форме жидких веществ) направляются первоначально в масляный фильтр *5* для конденсации высокомолекулярных компонент. Затем летучие продукты сжигаются над бокситовым катализатором *16* при температуре до 600 °С. После превращения оксида углерода в диоксид над ванадиевым катализатором простейшие продукты (диоксид углерода, пары воды) выбрасывают в боров *17*. Регулирование температурного режима выполняют исполнительные тиристорные механизмы, управляемые по про-

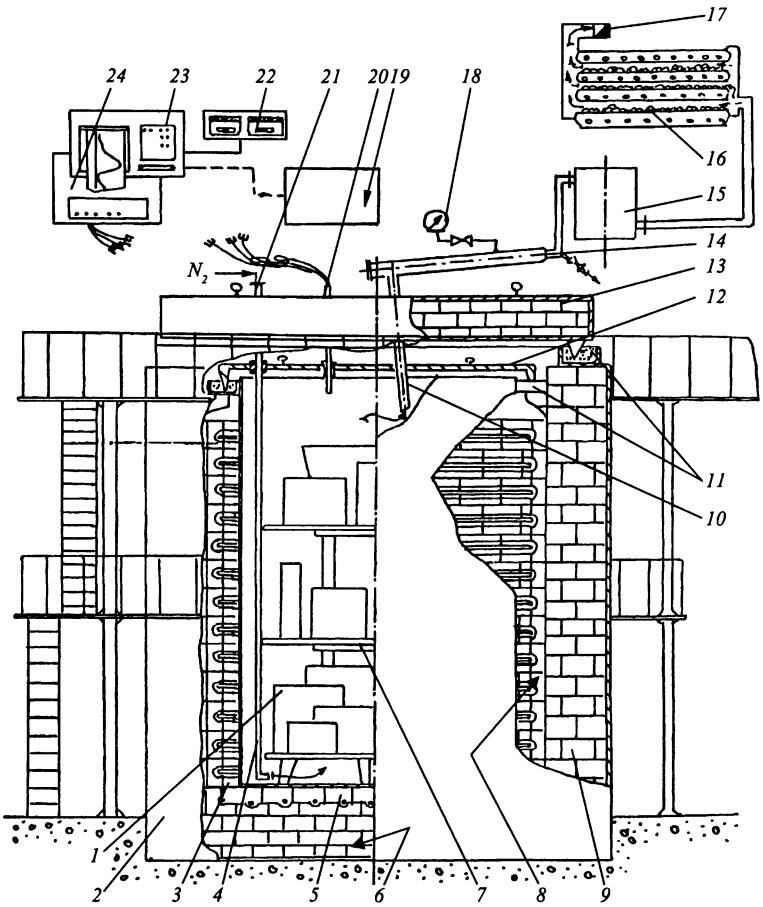


Рис. 1.8.8. Ретортная печь карбонизации:

1 – обрабатываемые заготовки; *2* – корпус печи, *3* – подвеска нагревателей боковых стенок; *4* – трубка подачи инертного газа; *5* – нагреватели днища; *6* – кладка днища из жаропрочного кирпича; *7* – такелажная подставка из жаропрочного материала (графит); *8* – кладка печи из особо жаростойкого силикатного кирпича; *9* – кладка боковых стенок из жаропрочного шамотного кирпича; *10* – патрубок вывода летучих продуктов карбонизации, *11* – песчаные затворы; *12* – металлическая крышка реторты; *13* – крышка печи из шамотного кирпича; *14* – коллектор отбора летучих продуктов; *15* – масляный фильтр; *16* – блок сжигания летучих продуктов над слоем катализаторов оксидирования органических веществ; *17* – выброс летучих продуктов в боров трубы; *18* – мановакуумметр, *19* – управление мощностью электронагревателей; *20* – вывод термопреобразователей; *21* – вход инертного газа, *22* – блок памяти систем регулирования; *23* – блок управления режимом карбонизации; *24* – компьютерный блок сбора и демонстрации телеметрической информации

грамме, включением и корректировкой мощности четырех зон нагрева. Одна из зон расположена у днища печи.

Продуктом карбонизации является углерод-углеродный КМ, отличающийся высокой пористостью (до 40 %), низкой плотностью (1,1 – 1,3 г/см^3)и минимальным уровнем прочности из числа всех продуктов высокотемпературных переделов. В период карбонизации самый низкий уровень прочности получаемый материал имеет в температурном интервале от 400 до 600 °С. На этот же интервал приходятся максимальные деформации углепластика. Для сохранения целостности заготовок в этот период высокотемпературной обработки применяют графитовые формообразующие оправки с уровнем жесткости существенно более высоким и с температурным коэффициентом линейного расширения существенно меньшим, чем у обрабатываемого углепластика.

Пропитку пеком углеродных заготовок осуществляют в автоклавах при температуре, когда вязкость пека минимальная, а процессы его пиролиза еще не начинаются. Для большинства применяемых в промышленности пеков эта температура составляет 220...380 °С. Заготовки загружают в автоклав в металлических корзинах. Перед подачей расплава пека в рабочий автоклав в нем производят разогрев заготовок до температуры, несколько большей, чем температура пека в камере его плавления. Разогрев стенки автоклава проводят паром или электронагревателями.

Продуктом операции является беспористый углепластик с термопластичным связующим, объемно пронизанный углерод-углеродным каркасом, сохраняющимся с момента предварительной карбнизации.

Пропитанный пеком КМ возвращается на повторную операцию карбонизации. При температуре каплепадения термопластичного пека возможно его вытекание из объема пористого каркаса. На практике вытекание пека наблюдается из пор диаметром, близким к 0,5... 1 мм и более. В порах меньшего размера расплав пека удерживается капиллярными силами по всей высоте заготовки, которая может достигать размеров в несколько сотен мм. Для предотвращения вытекания пека из объема пропитанного каркаса его карбонизацию проводят под внешним давлением, и эта операция подучила наименование изостатической карбонизации. При изостатической карбонизации давление в рабочей камере может достигать несколько десятков МПа. Такое давление повышает выход твердого углеродного остатка за счет смещения равновесия пиролитических процессов в направлении все более глубокой конденсации жидких и газообразных продуктов карбонизации.

Пиролитическое уплотнение углерод-углеродных КМ углеродными отложениями из газообразных углеводородов проводят в электровакуумных печах. Электровакуумная печь представляет собой проточный газовый реактор, предназначенный для высокотемпературных химических гетерогенных процессов при абсолютном давлении, значительно меньшем атмосферного.

Измерение температуры выполняют оптическими способами. При этом погрешность измерения определяется не только физической природой метода (измерение яркости или интенсивности света), но и такими факторами, как чистота остекления окон визуального контроля температуры поверхности, метрологическая погрешность приборного оснащения.

Режимы по абсолютному давлению и температуре в течение рабочего процесса направленно изменяют с целью получения необходимого увеличения массы в объеме пор. К моменту завершения процесса, как правило, более резко повышают температуру и уменьшают давление в печи. Пиролитическое уплотнение завершается, когда устья пор на внешней поверхности покрываются углеродными осадками. По толщине стенки детали распределение интенсивности отложений углеродных осадков соответствует экспоненциальному закону, которому соответствует изменение абсолютного давления рабочего газа в результате конкуренции процессов молекулярной диффузии газа в объем пор и его превращения с образованием углеродных твердых осадков. Темп снижения плотности по толщине стенки зависит и от соотношения объемов транспортных и тупиковых пор в объеме КМ. На практике при толщинах стенки более 20 мм сердцевина заготовки не уплотняется.

Объемное уплотнение толстостенных углеродных заготовок проводят методом термического градиента. Установка для выполнения этой операции представляет собой электровакуумную печь – проточный газовый реактор. По завершении процесса распределение плотности по толщине имеет слабую линейную зависимость с уменьшением к внешней поверхности заготовки. Метод термического градиента практически не реализуется при уровне теплопроводности исходного углерод-углеродного или волокнистого каркаса более 1 Вт/м·К, при относительно малых толщинах, когда температурный градиент "размывается", а также в случае обработки профилированных заготовок, имеющих сложную геометрическую форму.

Высокотемпературную обработку заготовок из углерод-углеродных КМ проводят либо в электровакуумных печах, либо в печах с индукционным нагревом обрабатываемых углеродных заготовок, либо в печах промышленной графитации стандартных углеграфитовых материалов.

Наиболее экономичными, наиболее поддающимися управлению как по уровню максимальных температур обработки, так и по минимальному разбросу температур в рабочей зоне, а также по уменьшению влияния "зате-

нений" при теплопередаче в рабочую зону являются печи индукционного нагрева.

Контроль температур проводится оптическими приборами. В индукционных печах тепловыделяющими элементами могут служить экраны, окружающие зону с заготовками, а также сами обрабатываемые заготовки, обладающие способностью индукционно нагреваться. Это повышает надежность воспроизведения качества продукции. Ограничения на применение индукционных печей возникают при обработке крупногабаритных заготовок из-за резкого возрастания в этом случае расхода электроэнергии.

1.8.4. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ОКСИДИРОВАНИЯ И ЭРОЗИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КМ

Защита от оксидирования и повышение эрозионной стойкости поверхностей деталей из углерод-углеродных КМ наиболее часто обеспечивается их объемным силицированием и созданием композиционных керамических покрытий. Основу материала в этом случае составляет каркас из углеродных тканей или нитей (арматура) и углеродной матрицы из кокса пека или смол, а также пироуглерода.

Существенная часть пироуглерода расходуется на образование карбидкремниевого каркаса сицилированного углерод-углеродного КМ. Кроме того, межфазный слой пироуглерода служит повышению механической прочности, выступая при механическом нагружении в качестве своеобразной "ловушки" растущих трещин из-за низкого уровня модуля упругости по сравнению с окружающими его волокнами и керамической матрицей, а также ввиду относительно низкой прочности при сдвиге.

Сквозной, пронизывающий весь объем КМ карбид-кремниевый каркас создает препятствия для внутрипористой диффузии кислорода и его соединений и, тем самым, выполняет функциональную роль первой линии защиты от оксидирования углерод-углеродного каркаса, который на воздухе начинает оксидироваться с 450 °С, а в парах воды – с 700 °С. Кроме того, карбид-кремниевый каркас, вплоть до температуры его разложения или начала его оксидирования, повышает модуль упругости композиции в целом, а также его прочность за счет общего уменьшения пористости и эффективной длины углеродного волокна в более жесткой, чем углеродная, карбид-кремниевой матрице.

Вторую линию защиты от оксидирования составляет слой карбида кремния, нанесенный на внешнюю поверхность детали (барьерный слой). Этот слой толщиной до 0,5 мм ограничивает диффузию кислорода в поры, а также служит эрозионно стойкой частью покрытия. Для особо теплонапряженных высокотемпературных узлов барьерный слой создают из более тугоплавких карбидов, например, гафния либо циркония.

Третью линию защиты от оксидирования создает композиционное покрытие из смеси пластичных при температуре эксплуатации силикатов и твердых при этих же температурах жаростойких карбидов тугоплавких металлов. Пластичная часть покрытия заполняет микротрещины, поры и предотвращает доступ окислителя в объем КМ и к его поверхности. Окислитель, все же продиффундировавший к карбидному барьерному слою, частично взаимодействует с ним, создавая соответствующий оксид, и тем самым "подпитывает", например, силикатами пластичный слой, становящийся практически газонепроницаемым поверхностным и стеклообразным. Твердые включения тугоплавких карбидов в объеме пластичного стеклообразного слоя служат упрочняющей для него компонентой и не дают возможности "стока" пластичного слоя с поверхности детали.

Как следуют из представленной физико-химической картины функционирования защищающего от оксидирования и эрозионно стойкого покрытия, для его создания необходима модификация состава и структуры углерод-углеродного КМ.

1.8.5. МЕТОДЫ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КМ

При создании жаростойких конструкций, эксплуатирующихся выше температур плавления металлов и конструкционных сплавов, из углерод-углеродных КМ необходимым элементом технологии является образование соединения углеродных, металлических, полимерных деталей, взаимное крепление их с целью передачи нагрузки, компенсации температурных перемещений и т.д.

Основными способами образования соединений углеродных деталей в конструкциях,

которые прошли положительную промышленную апробацию, стали пайка и сварка, склеивание и механическое крепление. Требования, предъявляемые к клеевым прослойкам, в основном аналогичны требованиям к выбору ингредиентов самих углерод-углеродных КМ. Важнейшим среди них является высокая жаростойкость. Вязкость и смачивающая способность клея должны быть достаточными для его проникновения в поры углеродного материала, заполнения поверхностных пустот, образования в объеме клеевой прослойки химических соединений, которые адгезионно и механически сцепляются с подножкой.

Пайку и сварку углерод-углеродных КМ между собой, с графитом или конструкционными металлами проводят при взаимодействии соединяемых материалов в твердом состоянии или при участии жидкой фазы.

Соединение разнородных твердых материалов при сварке осуществляется с приложением давления и нагревом и подразделяется на три основные стадии: развитие физического контакта в результате сближения соединяемых поверхностей; образование активных центров химического взаимодействия поверхностей; объемное развитие взаимодействия. Вакуумирование в этом процессе способствует очистке поверхностей от адсорбированных веществ и создает предпосылки более прочного взаимодействия металлов с углеродной поверхностью. Процесс соединения материалов в вакууме может иметь и некоторые отличительные особенности, связанные с возможной диссоциацией оксидных пленок или их растворением в металлах при высоких температурах, так как эти процессы сопровождаются разрывом связей и сами по себе могут дава́ть активные центры. Но поскольку сварка в вакууме осуществляется под давлением, то помимо диссоциации с растворением оксидных пленок в результате пластической деформации протекает процесс активации за счет выхода дислокаций на контактные поверхности.

Завершение этих диффузионных процессов требует бóльшей длительности процесса (200...1200 с) в зависимости от чистоты обработки поверхностей, температуры, при которой начинается вынужденно-пластический характер деформирования хотя бы одной сопрягаемой поверхности, и номинального давления. Обычно интервал рабочего давления 0,2...0,3 МПа. Для углеродных материалов температура вынужденно-пластической деформации превышает 2500 °С, а удаление кетонных групп, одних из наиболее прочных углерод-кислородных комплексов, в вакууме происходит при температуре выше 2100 °С.

Перечисленные условия реализуются в вакуумных камерах относительно небольших геометрических размеров. В таких камерах реализуется сборка элементов конструкций микродвигателей ЖРД для систем управления ориентацией в пространстве космических аппаратов.

Шире применяются приемы сборки с участием жидкой фазы на границе контакта. Образование жидкой фазы может происходить при плавлении готовых припоев, промежуточных металлических прослоек, при локальном или контактно-реактивном плавлении соединяемых металлов. Жидкая фаза играет большую роль в процессах как сварки, так и пайки.

При сварке плавлением в расплав переводятся как кромки свариваемого материала, так и присадочный материал. Это приводит к образованию жидкой среды, общей для свариваемых деталей. При охлаждении ванны центрами кристаллизации жидкости являются не полностью оплавленные зерна основного материала, расположенные на границе расплава. К решетке полуоплавленных зерен пристраиваются атомы кристаллизующейся графитовой зоны. В результате после завершения процесса кристаллизации на бывшей границе зоны расплава формируются общие зерна (кристаллиты), состоящие частично из углерода шва, а частично из углерода основных деталей и межфазного слоя. Это обеспечивает в сварном соединении непрерывную цепочку ковалентных связей между атомами углерода основных деталей и шва.

При пайке деталей из углерод-углеродных КМ необходимо, чтобы расплавленный металл смачивал углеродную поверхность, растекался в зазоре по поверхности, проникал в поры. В результате обеспечивается физический контакт между жидким металлом и углеродной деталью и создаются условия для их взаимодействия. В процессе взаимодействия жидких металлов с углеродной поверхностью протекает растворение и перекристаллизация углерода в жидком металле, сопровождающаяся диффузией углерода в расплав металла непосредственно или через образовавшийся карбидный слой. От степени развития этих процессов зависит прочность шва. Процесс контактного плавления протекает с большой ско-

ростью, и поэтому время, необходимое для образования шва с проникновением припоя на глубину углеродного материала, составляет 12...16 с.

В заключение процесса в паяном шве идет кристаллизация в условиях сжатия (внешнее давление при пайке до 10 МПа). При температуре пайки в шве образуется сплав типа коллоидного раствора углерода в жидком металле. Обычно он кристаллизуется в виде отдельных зон. Одновременно ближе к материалу детали образуются зоны, обогащенные углеродом, а к центру шва – металлом. Это связано с тем, что более тугоплавкая часть расплава кристаллизуется в первую очередь на поверхности основного материала, оттесняя легкоплавкую часть к центру шва. Такая структура шва оптимальна с точки зрения механики перераспределения нагрузки между деталями при получении конструкции и последующей ее эксплуатации при повышенных температурах.

Соединение углеродных деталей методами сварки и пайки не требует глубокого вакуума. Это позволяет использовать более дешевое оборудование с большими габаритными размерами рабочих камер, ускорить общий цикл процесса и устранить необходимость в предварительном удалении оксидной пленки с поверхности свариваемого металла.

Определяющими технологическими факторами процесса являются температура, давление прижима деталей, степень разрежения. Например, в случае соединения углеродных деталей со сталью наиболее высокий уровень прочности достигается в интервале температур 950...1000 °С. Оптимальное давление прижима 10...15 МПа, а абсолютное давление в рабочей камере 130...1300 Па. Предварительно соединяемые поверхности обрабатывают до 6...8 квалитета. Для повышения прочности соединений углеродных и металлических деталей больших размеров необходимо увеличивать толщину переходной зоны. Этого добиваются пропиткой расплавом припоя пор углеродного материала на большую глубину (до 10 мм и более).

В этих случаях часто вынуждены применять клеевые соединения или механическое крепление. Жаростойкие углеродные и углерод-керамические швы получают на основе полимерных клеевых слоев путем их высокотемпературной обработки. В результате в объеме клеевого слоя создается углеродный КМ, основная задача которого – передавать механические нагрузки от детали к детали при температурах эксплуатации конструкции, достигающих 1000...1500 °С. Предельное сопротивление отрыву клеевых соединений углеродных поверхностей весьма невелико по сравнению с прочностью самих материалов (3...4 МПа).

Для повышения прочности соединения клеевой слой армируют углеродными порошками, мелко диспергированными углеродными волокнами или порошками оксидов или карбидообразующих металлов. В последнем случае обычно применяют кремний, титан или цирконий. При высокотемпературной обработке, по сути своей представляющей карбонизацию полимерного связующего, сопрягаемые поверхности соединяет мост из углерод-углеродного КМ.

Дисперсные включения в структуру клеевого слоя углеродных волокон, карбидов указанных металлов, а в ряде случаев и карбидов гафния или бора повышают прочность соединения до 7...9 МПа. Главная функциональная роль таких ингредиентов заключается в резком уменьшении деформативности клеевого слоя при высокой температуре. Карбиды указанных металлов имеют модуль упругости в 10...15 раз более высокий, чем у склеиваемых углеродных деталей. В результате жесткость клеевого слоя в среднем тоже оказывается более высокой, чем у склеиваемых углеродных деталей. Это пропорционально уменьшает напряжение в нем и приводит к увеличению запаса прочности клеевого соединения. При оптимальном подборе состава клеевого слоя, выборе оптимального размера частиц карбидов, при достаточном уплотнении углеродом пористой структуры клеевого слоя в нем реализуются такие условия, при которых когезионная прочность склеиваемых углеродных деталей оказывается меньшей, чем прочность адгезионного соединения.

Добавки жаростойких и высокожестких карбидов не только меняют характер деформирования компонент в объеме композитного клеевого соединения, уменьшая до безопасного уровня сдвиговые деформации на границах раздела углеродных поверхностей, но и повышают термоокислительную стойкость клеевого соединения, как это имеет место в углеродкарбидных жаростойких композитах. Фактическая прочность клеевого соединения зависит и от уровня технологических остаточных напряжений, которые, в свою очередь, зависят от раз-

личия температурных коэффициентов линейного и объемного расширения склеиваемых деталей, углеродного связующего клеевого слоя и карбидных наполнителей.

Технология склеивания начинается с модифицирования исходных фенолоформальдегидных связующих кремнийорганическими смолами или низкомолекулярными кремнийорганическими продуктами, которые вводятся для повышения выхода твердого остатка после карбонизации. Смолу смешивают с порошками графита, аморфного бора, кремния или титана. Пасту наносят на склеиваемые поверхности соединяемых деталей, которые механически скрепляют друг с другом на период отверждения полимерного связующего. Отверждение производят в термошкафах по режимам отверждения фенолоформальдегидного связующего углепластика. Карбонизацию проводят в ретортных печах по режимам, ничем не отличающимся от режимов карбонизации углепластиков с фенолоформальдегидным связующим. Высокотемпературную обработку проводят в электровакуумных печах до момента завершения формирования химического состава углерод-карбидного шва.

Контроль степени завершенности фомирования химического состава и физической структуры клеевого слоя проводят рентгенфазовым и рентгеноструктурным анализами. Так, при повышении температуры обработки до 1000 °С интенсивность дифракционных линий металлического кремния и бора практически не уменьшается. При температуре выше 1100 °С начинают регистрироваться линии фаз карбидов бора и кремния, выше 1200 °С свободный кремний и бор уже не регистрируются. До температуры 1500 °С выраженность линий фаз карбидов все более нарастает. Обработка при температуре до 1500 °С является необходимой для завершения операции склеивания углеродных поверхностей в случае применения клеев с добавками кремния и бора.

Для повышения прочности соединения склеенные детали уже без соединяющей оснастки помещают в электровакуумную печь, где проводят процесс пироотложения углерода по стандартным для углерод-углеродных КМ режимам. Прочность клеевого соединения после такой технологии его получения сохраняется при повышенных температурах стабильной вплоть до температуры разложения соответствующего карбида.

Широко применяемым приемом создания конструкций из углерод-углеродных композитов, жаростойких металлов и конструкционных пластиков является применение механических соединений. Среди этих видов соединений обычно применяют заклепочные соединения. Заклепки могут получаться методом пайки, например, титаном, если в теле детали на всю их толщину предварительно просверлены сквозные отверстия, которые после заливки их припоем образуют единое целое с клеевым слоем, соединяющим торцы деталей. Такая технология требует помещения соединяемых деталей в камеру с контролируемой газовой средой. Для крупногабаритных деталей, достигающих размеров до 2000 мм, такие камеры сложны в создании и эксплуатации.

В таких случаях выполняют традиционные заклепочные соединения с помощью заклепок из молибденовых или циркониевых сплавов. На рис. 1.8.9 приведены схемы комбинированных соединений для передачи нагрузки от титанового сплава на углерод-углеродную деталь и с углерод-углеродной детали на конструкционный углепластик.

В первой зоне температура эксплуатации достигает 1300...1550 °С, а во второй 1100... 1200 °С. В первой зоне промежуточный слой асбопластика защищает силовую титановую деталь от перегрева со стороны углеродной горячей детали. Кромка углеродной детали вклеивается в паз клеем на основе фенолоформальдегидной смолы с наполнителем – металлическим кремнием. Во второй зоне применены винтовые соединения из жаростойкого цирконий-молибденового сплава. Титановое силовое кольцо отделено от горячей углеродной детали слоем углепластика.

Экспериментальные испытания показали, что чем меньше диаметр заклепки, тем выше разрушающая сила на одну заклепку. Схема размещения заклепок (прямоугольная схема, шахматный порядок, в линию) оказывает меньшее влияние на прочность соединения по сравнению с диаметрами заклепок. Разрушение заклепочного соединения происходит по механизму смятия и разрыва углеродного материала. Поэтому эффективная разрушающая нагрузка заклепочного соединения мало зависит от природы материала металлической заклепки и намного превышает прочность при сдвиге сварного соединения, имеющего одинаковую с ним номинальную поверхность.

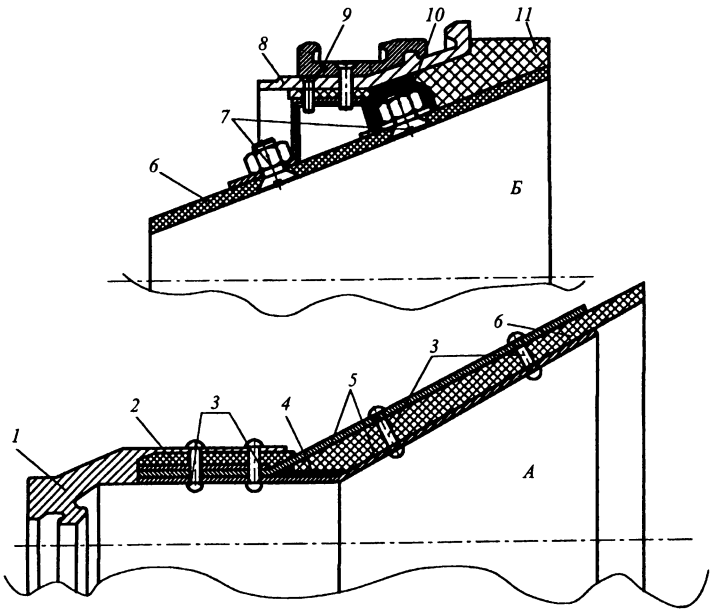


Рис. 1.8.9. Конструктивные схемы сборочных узлов из металлических и композиционных материалов:
1 – титановая силовая оболочка; *2* – асбопластиковое теплоизолирующее кольцо; *3* – заклепки из молибденового сплава; *4* и *10* – клеевой слой на основе фенолоформальдегидной смолы, наполненной порошком металлического кремния; *5* – силовая оболочка из жаростойкого сплава на основе молибдена; *6* – углерод-углеродная деталь; *7* – винт из молибденового сплава; *8* и *9* – силовые титановые оболочки, *11* – теплоизолирующее кольцо из углепластика на основе фенольной смолы

УУКМ внедрены и серийно эксплуатируются в ракетной, космической, авиационной технике. Перспективы их применения только расширяются в связи с созданием космических самолетов, сверхзвуковых крылатых ракет и других образцов военной техники. Технология и оборудование создания новейших образцов этих видов техники интенсивно развивается как в России, так и в США, Франции, Японии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Искусственный** графит // В.С. Островский и др. М.: Металлургия, 1986. 272 с.

2. **Колесников С.А.** Углеродные композиционные материалы для высокотемпературного металлургического оборудования // Металлургия. 1996, № 2. С. 18 – 22.

3. **Колесников С.А.. Кравецкий Г.А.** Пиролитическая технология сборки жаростойких конструкций из углерод-углеродных материалов // Металлургия. 1996. № 8. С. 31 – 35.

4. **Композиционные материалы:** Справочник / В.В. Васильев и др. М.: Машиностроение. 1990. 512 с.

5. **Костиков В.И.** Углерд-углеродные композиционные материалы // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1989. Т. XXXIV, № 5. С. 492 – 501.

6. **Костиков В.И., Демин А.В., Кулаков В.В** и др. Фрикционные углерод-углеродные материалы "ТЕРМАР" // Современные проблемы производства и эксплуатации углеродной продукции. Челябинск: Библиотека А. Миллера. 2000. С. 211 – 213.

7. **Костиков В.И., Демин А.В.** Разработка жаростойких материалов, технологических приемов и способов сборки интегральных конструкций для космической техники / Тр. Первой международной авиакосмической конференции "Человек – Земля – Космос". Т. 5. 1995. М.: Изд-во. Футарум. С. 284 – 286.

8. **Костиков В.И., Колесников С.А.** Качественные ступени развития физических свойств углерод-углеродных композитов при формировании углеродной матрицы в поровом объеме углеродной арматуры // Материаловедение. 1997. № 1. С 14 – 20.

9. **Соколовский М.И., Лукьянов В.В., Лузенин Ю.Г.** Углеродные материалы НИИ-Графита в разработках РДТТ ОАО НПО "Искра" // Современные проблемы производства и эксплуатации углеродной продукции. Челябинск: Библиотека А. Миллера. 2000. С. 220 – 222.

10. **Углерод-углеродные** композиционные материалы: Справочник / Ю.Г. Бушуев, М.И. Персин, В.А. Соколов. М.: Металлургия, 1994. 128 с.

Глава 1.9

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ КМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКОЙ

В последнее время наблюдается устойчивая тенденция роста применения конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Анализ классификации деталей (табл. 1.9.1) показывает, что часть деталей можно изготовлять с применением автоматизированной выкладки их заготовок. Из общей трудоемкости изготовления деталей из ПКМ с применением ручной выкладки заготовок непосредственно трудоемкость операций раскроя и выкладки составляет примерно 45 %. Доля операций раскроя и выкладки может быть и значительно большей, если осуществляется изготовление крупногабаритных толстостенных многослойных деталей. Из вышеуказанного следует, что вопросы снижения трудоемкости операций раскроя и выкладки являются весьма актуальными.

Специфические качества ленточных препрегов на основе углеродных волокон, высокие эксплуатационные требования к конструкциям из этих материалов обусловливают значительные трудности при механизации и автоматизации процесса выкладки.

1.9.1. Классификация деталей из полимерных композиционных материалов

Конфигурация детали	Габаритные размеры, мм		Метод изготовления заготовки детали	Метод формирования детали	Типовые представители
	длина	ширина			
Плоские и криволинейные детали с углом подъема до 5°	До 2500	До 1000	Ручная или автоматизированная выкладка	Прямое прессование или автоклавное формование	Усиливающие накладки для металлических конструкций
	От 2500 до 16 000	От 1000 до 4000	Автоматизированная выкладка	Автоклавное формование	Обшивки агрегатов типа: створка, панель воздухозаборника, руль направления, стабилизатор, закрылок, интерцептор. Панели пола, перегородки, приборные отсеки
Криволинейные детали с углом подъема от 5 до 25°	До 2500	До 1000	Ручная или автоматизированная выкладка	Прямое прессование или автоклавное формование	Обшивки агрегатов типа: обтекатель привода, стабилизатора, гаргрот, законцовка крыла, руль поворота, щиток шасси, стабилизатор, крыло
	От 2500 до 16 000	От 1000 до 4000	Автоматизированная выкладка	Автоклавное формование	

Существует два основных подхода к решению данной проблемы, основанных на различиях в технологии выкладки. Один предполагает послойную выкладку и пакетирование ленточных препрегов с различным направлением укладки до получения пакета-заготовки, готовой к автоклавному формованию или прессованию. Другой состоит в том, что на первом этапе проводится выкладка и раскрой монослоя, а на втором этапе осуществляется перенос его в сложную форму, где ему придается нужная конфигурация. После набора необходимого количества слоев проводится формование детали.

Несмотря на различия, в обоих случаях имеется выкладочная головка.

Два подхода обусловливают соответственно различные конструктивные решения установок для автоматизированной выкладки. Первая попытка механизировать процесс выкладки была осуществлена по так называемой "майларовой технологии", примененной в 1970 г. фирмой Грумман (США). На полупрозрачные шаблоны из полиэтилентерефталатной пленки были нанесены базовые оси, контур слоя, линии укладки с шагом, равным ширине препрега. Лента препрега укладывается на шаблоны с бобины, закрепленной на траверсе и перемещаемой вручную вдоль поверхности оснастки и на ширину ленты в поперечном направлении. Подсвечиваемый стол позволяет контролировать качество укладки. Затем выложенный слой с помощью реечного приспособления укладывается в пресс-форму. Ориентация слоя в пресс-форме осуществляется по базовым осям. Такая технология явилась первой попыткой механизации выкладки и создания специальных установок для выкладки. Недостатками данного способа являются возможная разориентация слоев во время выкладки на оснастку и резки, сложность получения местных усилений, большое количество отходов, высокая стоимость полиэтилентерефталатной пленки и др. Это обусловило поиск новых путей механизации выкладки.

Следующим шагом на пути автоматизации процесса раскроя и выкладки стало создание установок портального типа, на которых пакет изделия выкладывается отдельными полосами препрега послойно на форме для автоклавного формования или прессования, причем сразу нужной конфигурации. Выкладка и резка полос препрега проводится специальной выкладочной головкой. Выкладочная головка (рис. 1.9.1) содержит следующие основные узлы: катушку *1* с препрегом, устройство *3* транспортировки препрега, устройство *2* резки препрега, устройство *5* смотки транспортирующей подложки, устройство *4* прижима выложенного препрега, устройство контроля и автоматизации приводов.

Для данного решения характерны небольшие габаритные размеры, низкая стоимость и масса используемого оснащения, возможность использования стандартных промышленных роботов, большая универсальность, более высокая надежность. Однако увеличение габаритных размеров детали, усложнение ее конструкции (повышенная кривизна и др.) приводит к увеличению габаритных размеров, сложности и стоимости установок из-за сложного обеспечения жесткости конструкции приводных устройств.

Таким образом, совершенствование процесса изготовления деталей из ПКМ требует дальнейшего развития автоматизации и роботатизации всех стадий процесса выкладки. Желательно, чтобы автоматизированная линия могла комплексно выполнять следующие функции: раскладку монослоя широкого или узкого препрега, перенос монослоя и его обрезку по контуру, контроль удаления отходов и качества монослоя, перенос монослоя и укладку его в форму, прижим по контуру оснастки сложной формы, прижим элементов усиления, автоклавное формование, механическую обработку и контроль качества готовой детали.

Характеристики исходного препрега являются решающим фактором, обеспечивающим стабильный процесс автоматизированной выкладки заготовки и, в конечном итоге, высокое качество получаемой детали.

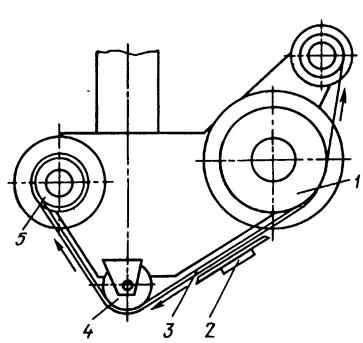


Рис. 1.9.1. Выкладочная головка

При этом под высоким качеством заготовки следует понимать: обеспечение заданных углов и прямолинейности выкладки препрега; обеспечение требуемых зазоров и нахлестов препрега; плотное прилегание каждого последующего слоя к предыдущему; отсутствие разориентации волокна препрега; отсутствие складок и разрывов препрега. При автоматизированной выкладке используется трехслойный пакет, состоящий из транспортирующей подложки (бумаги), собственно препрега и разделительной антиадгезионной прокладки, например, из полиэтилена. Конструкция выкладочной головки выполнена таким образом, что использование пакета с другой комбинацией слоев невозможно.

Исходя из этого к пакету предъявляются следующие требования: прочность сцепления препрега с транспортирующей подложкой должна быть ниже, чем прочность сцепления препрега с препрегом, а прочность сцепления с с транспортирующей подложкой должна быть выше, чем с разделительной прокладкой; прочность транспортирующей подложки должна быть больше силы, необходимой для отрыва укладываемого слоя препрега от уже уложенного.

Конструктивные особенности узла резки установки обусловливают использование транспортирующей подложки со стабильной толщиной с допуском ± 0,01 мм.

При автоматизированной выкладке заготовок деталей из ПКМ вопрос фиксации первого выкладываемого слоя является проблемным, поскольку рабочая поверхность оснастки покрывается антиадгезионными смазками. Фиксация первого слоя при ручной выкладке не представляет сложности, однако при использовании автоматизированной выкладки имеют место горизонтальные составляющие от силы прижима, передаваемой прикаточным роликом установки, что приводит к смещению первого слоя относительно заданного положения, реализуемого при выкладке последующих слоев.

При выкладке объемных заготовок фиксация первого слоя усложняется как при ручной выкладке, так и при автоматизированной. Известны различные способы фиксации первого слоя с использованием аэрозольных полимерных клеев; связующего, на основе которого изготовлен препрег; вакуумных столов, вакуумных присосок.

При автоматизированной выкладке пакетов-заготовок деталей предпочтительно выкладку проводить непосредственно на оснастке. Однако это не всегда возможно. Эти ограничения могут быть связаны как с возможностями установок, так и с габаритными размерами заготовок (малая ширина по сравнению с длиной). В подобных случаях выкладку пакета на несколько заготовок одновременно необходимо осуществлять непосредственно на столе установки с последующей резкой и переносом их на оснастку для формования. При выкладке пакета на рабочий стол возникает необходимость применения какой-либо подложки, назначение которой – служить разделительным слоем и транспортирующей подложкой.

При такой технологии выкладки необходима фиксация как самой подложки, так и первого слоя препрега на подложке. Различные способы фиксации подложки и первого слоя препрега выкладываемого пакета-заготовки имеют свои преимущества и недостатки. Фиксация при помощи аэрозольных клеев удобна и надежна. Однако при фиксации подложки возникают затруднения при отделении выложенного пакета от выкладочного стола. При фиксации первого выкладываемого слоя необходимо учитывать влияние клея на свойства формируемой детали, поскольку часть клея при формовании детали переносится на него.

Наиболее предпочтительным с точки зрения исключения возможности внесения посторонних включений в ПКМ является фиксация с помощью связующих. Однако затруднительным является нанесение связующего, так как кистью сложно обеспечить сравнительно равномерное нанесение его, а нанесение распылителями мало допустимо с точки зрения создания высокой концентрации компонентов связующего в рабочем помещении.

При использовании связующего в качестве фиксатора первого слоя препрега следует иметь в виду, что липкость его сохраняется сравнительно небольшое время, после чего требуется повторное нанесение. Для обеспечения выкладки связующее целесообразно наносить отдельными зонами по мере укладки полос препрега на оснастку.

При помощи вакуума удобно фиксировать как подложку, так и первый слой препрега. Однако на оснастке для формования детали подобный способ фиксации не применяется; он приемлем только при выкладке на рабочем столе с последующим переносом пакетов-заготовки на оснастку для формования.

Технологические приемы выкладки меняются в зависимости от липкости и толщины препрега, от содержания связующего в препре-

ге, схемы раскроя препрега, направления выкладки и некоторых других факторов.

Укладка вязкоупругой ленты препрега на подложку является типичным процессом, применяемым в производстве деталей из ПКМ.

Многие установки для автоматизированной выкладки созданы на базе металлорежущих станков, которые были переоборудованы. Вместе с тем требования, предъявляемые к выкладке и к процессу резания металла совершенно различны. При резании металлов применяются большие силы, допуски на перемещения находятся в узких пределах и конструкции станков характеризуются высокой жесткостью. При выкладке препрегов больших усилий не требуется. Кроме того, поскольку конструкция и материал детали формируются во время процесса формования, то требования к допускам при выкладке не такие жесткие, как при обработке металлов. Однако, правила для автоматизированной выкладки, которые определяют верхнюю границу скорости выкладки, основаны на вязкоупругой природе препрега.

Рассмотрим два случая автоматизированной выкладки: 1) прямые отрезки, т.е. линия обрезки препрега под прямым углом к продольной оси ленты; 2) отрезки под углом, т.е. линия обрезки под углом к оси ленты, отличным от 90°.

Прямые отрезки. Опускание прикаточного ролика наиболее целесообразно не точно на линии обрезки препрега, а позади нее со смещением на величину l (рис. 1.9.2). Величина l в зависимости от свойств препрега может изменяться. Аналогичная картина наблюдается при подъеме роликов.

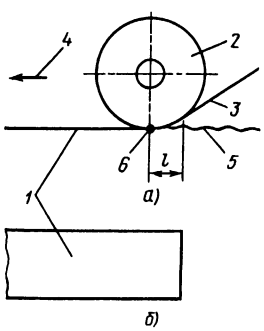


Рис. 1.9.2. Схема выкладки прямых отрезков:
а – вид сбоку; *б* – вид сверху на выложенный материал; *1* – выложенная лента; *2* – прижимной ролик; *3* – препрег; *4* – направление выкладки; *5* – выкладываемая поверхность; *6* – точка прижима

Отрезки под углом. В этом случае необходимы другие варианты начала и окончания выкладки препрега. Рассмотрим несколько вариантов:

одновременно осуществляется опускание всех сегментов ролика (рис. 1.9.3). Основная цель – избежать прилипания транспортирующей бумажной подложки к препрегу и предыдущего слоя к последующему. Недостатком данного варианта является присутствие большого незакрепленного фрагмента ленты, особенно при выкладке препрега большой ширины или при больших углах;

одновременно опускаются от 1/2 до 2/3 сегментов ролика. Остальные сегменты опускаются поочередно по мере продвижения выкладочной головки вперед;

поочередное опускание всех сегментов ролика. Из-за малой прижимной поверхности одного сегмента сила адгезии препрега не достаточна для фиксации ленты препрега;

одновременное опускание всех сегментов ролика по линии, где лента имеет полную ширину, на расстоянии l от границы обрезки препрега (см. рис. 1.9.3). Затем выкладочная головка при поочередном подъеме отдельных сегментов перемещается сначала назад, затем, при поочередном опускании отдельных сегментов, вперед.

Одним из важных вопросов автоматизированной выкладки является подвод выкладочной головки к точке начала выкладки и отвод от точки ее окончания. Лента препрега может прилипнуть к предыдущим слоям до

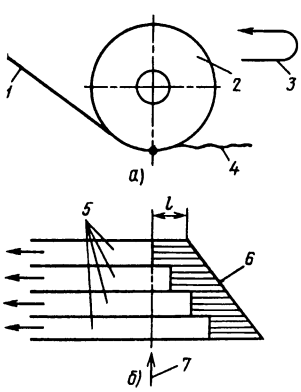


Рис. 1.9.3. Схема выкладки отрезков под углом:
а – вид сбоку; *б* – вид сверху на выложенный материал; *1* – препрег; *2* – прижимной ролик; *3* – направление движения головки; *4* – выкладываемая поверхность, *5* – следы роликов; *6* – линия обрезки; *7* – 1-я линия прижима

достижения первой точки или оторваться от транспортирующей подложки после подъема. Подобные отклонения приводят к прекращению работы установки автоматизированной выкладки и требуют устранения появившихся дефектов вручную.

Общий вид станка фирмы Waldrich Zeegen для послойной выкладки пакета-заготовок из препрега приведен на рис. 1.9.4.

Станок имеет габаритные размеры, мм:

общая длина	19 000
общая ширина	11 500
высота над уровнем пола	7000
ширина прохода между фундаментами	9000
максимальное расстояние от выкладочного стола до роликов	1200
длина укладочного стола	10 000
ширина укладочного стола	6000

Максимальные габаритные размеры выкладываемой заготовки 10 000 × 6000 × 1200 мм.

Станок имеет семь осей перемещения: *X* – перемещение портала вдоль направляющих станин; *Y* – перемещение вдоль портала; *Z* – подъем и опускание головок и ползунов; *A* – наклон головок; *B* – поворот ножа; *C* – поворот головок вокруг оси; *И* – подача ленты.

Выкладка может проводиться двумя головками: *A* – для препрегов шириной 150 мм и *B* – для препрега шириной 50 мм.

Лентоукладочный станок представляет собой установку портального типа с двумя головками для выкладки препрега с использованием транспортирующей подложки и состоит из следующих узлов: направляющих станин, портала, суппортов, ползунов, поворотных направляющих, выкладочного стола, системы ЧПУ.

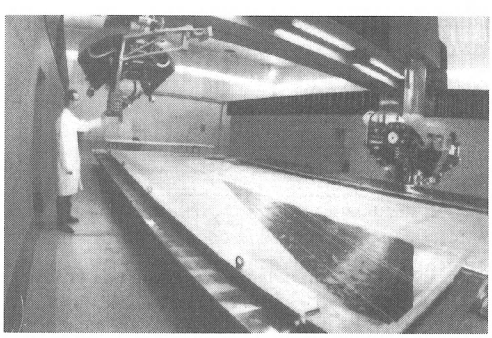


Рис. 1.9.4. Станок для выкладки ленточного препрега

Направляющие станины служат опорой для салазок и зубчатых реек портала. Направляющие защищены гармоникообразными чехлами. Портал состоит из двух направляющих салазок и балки. Направляющие салазки оснащены роликовыми башмаками с циркуляцией роликов, которые перемещаются по направляющим планкам. На передней и задней сторонах балки закреплены направляющие планки и зубчатые рейки для привода обоих суппортов.

Суппорты головок *A* и *B* перемещаются на плоских направляющих при помощи роликовых башмаков. На суппорте закреплена направляющая ползуна. Ползун состоит из *V*-образных направляющих для роликовых башмаков, самого ползуна и привода вокруг оси *C*. Подача ползуна осуществляется посредством шарикового ходового винта. Опорой привода служит пневматическое устройство компенсации массы. Внутри ползуна проходит вал привода вокруг оси *C*, соединяющий привод вокруг оси *C* с выкладочной головкой.

Привод по осям *X*, *Y*, *Z* и относительно *C* для устранения зазоров осуществляется при помощи двух противоположно направленных кинематических цепей.

Выкладочная головка закреплена на поворотной направляющей, позволяющей наклонять головку в пределах ± 20° вокруг оси *A*.

На выкладочной головке находятся три катушки: для многослойной ленты препрега, разделительной полиэтиленовой пленки и транспортирующей бумажной подложки.

С целью обеспечения постоянного натяжения подложки диаметр катушек с препрегом и транспортирующей подложкой контролируется следящими рычагами системы регулировки вращающего момента на катушках.

Подача ленты (ось *И*) осуществляется приводным и прижимным роликами. Прижим и отвод прижимного ролика осуществляется электромагнитной муфтой.

Сенсоры контроля положения ленты представляют собой две пары оптико-электронных датчиков, следящих за кромкой ленты. Смещение ленты в поперечном направлении фиксируется этими датчиками, и соответствующим смещением подающей и приемной катушек середина ленты возвращается на середину прикаточного ролика.

Сенсор "чужеродного типа" контролирует нижнюю сторону препрега. В случае загрязнения или дефектов препрега все движения прекращаются и выдается сигнал оповещения.

Резка препрега осуществляется поворотными ножами, работающими по принципу гильотины. Для осуществления резки под разными углами ножи поворачиваются на ± 60° (ось *B*).

Выкладочные ролики состоят из 12 (головка *A*) или 4 (головка *B*) отдельных роликов шириной 12,5 мм, покрытых эластомером, например, полиуретаном. Ролики установлены на общей оси с возможностью независимого радиального перемещения. Независимое радиальное перемещение и давление прикатки обеспечивается пружинами и пневмоцилиндрами через рычаги и контактные ролики.

Очистной скребок, состоящий из ножа, прижимаемого пружинами к прижимному ролику, и сборника отходов, предназначен для удаления с транспортирующей подложки обрезков препрега.

Телекамера расположена ниже емкости-сборника очистного скребка и предназначена для контроля процесса выкладки визуально.

Выкладочный стол состоит из четырех секций, установленных на фиксаторах и закрепленных при помощи залитых в фундамент фундаментных винтов. Благодаря этому выкладочный стол можно легко выверить и отрегулировать.

Все приводы станка выполнены на реверсируемых двигателях постоянного тока, которые определяют динамику станка (табл. 1.9.2).

Ускорение по осям *X*, *Y* и *Z* до 500 мм/с^2.

1.9.2. Технические характеристики установки по осям перемещений

Ось	Путь	Диапазон скоростей
X	10 000 мм	0...30 000 мм/мин
Y	6000 мм	0...30 000 мм/мин
Z	0...1200 мм	0...11 400 мм/мин
Z + *Y*	–	0...30 000 мм/мин
C	± 180°	60°
A	± 20°	20°
B	± 60°	60°
И	–	0...6300 мм/мин

Позиционирование для нового положения головки (без движения ленты) в течение не более 5 с. Ширина полуфабриката для головки *A* – 150 ± 1 мм, для головки *B* – 50 ± 1 мм. Толщина углеродной ленты – от 0,18 до 0,38 мм. Общая мощность установленных двигателей около 20 кВт.

Управляющие устройства двигателей расположены в распределительном шкафу.

Измерение перемещений по осям *X* и *Y* осуществляется системами для измерения длин по осям *Z*, *C*, *A*, *B* и *И* путевыми ротационными датчиками.

Конечные положения путей перемещения ограничены концевыми выключателями. Неисправности и эксплуатационные сообщения от контролируемых систем выводятся на экран открытым текстом.

Устранение неисправностей осуществляется с пульта управления, находящегося перед станком.

Глава 1.10

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

1.10.1. ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ТИПОРАЗМЕРЫ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

Сотовые конструкции представляют собой сочетание обшивок и деталей каркаса с сотовым заполнителем, расположенным между ними. Сотовый заполнитель воспринимает поперечное сжатие и поперечный сдвиг и предохраняет тонкие несущие слои от местной и общей потери устойчивости, обеспечивая в то же время их совместную работу и высокую жесткость. Несущие слои воспринимают продольное растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг в плоскости панели и предохраняют от внешнего воздействия относительно слабый заполнитель, очень чувствительный к сосредоточенным нагрузкам. Такое сочетание и взаимодействие составных элементов конструкции с заполнителем обеспечивает большую жесткость и высокую несущую способность при сравнительно малой массе этих конструкций.

Повышенная устойчивость сотовых конструкций при продольном и поперечном сжатии и изгибе позволяет конструировать их без подкрепляющего продольного набора стрингеров даже при увеличенном расстоянии между нервюрами или шпангоутами, а слоистые агрегаты типа рулей, закрылков и элеронов вообще не нуждаются в промежуточных нервюрах.

Сотовым конструкциям присущи преимущества по сравнению со стрингерными клепаными конструкциями – более гладкая аэродинамическая поверхность, меньшее количество деталей, составляющих узел или агрегат, повышенный ресурс благодаря равномерному подкреплению несущих слоев и отсутствию заклепок, приводящих к концентрации напряжений, улучшенные теплозвукоизоляционные свойства и др.

Указанные преимущества послужили основанием их широкого применения в изделиях авиационной техники отечественного и зарубежного производства. Последние годы характеризуются повышенным интересом промышленности к сотовым конструкциям из полимерных композиционных материалов: угле-, стекло-, органопластиков и др. Такие конструкции также обеспечивают по сравнению с агрегатами из алюминиевых сплавов снижение массы и числа деталей, повышение надежности и ресурса, снижение трудоемкости изготовления и стоимости.

В основу классификации сотовых конструкций положены следующие конструктивно-технологические признаки:

назначение (внутренний интерьер фюзеляжа, несущие конструкции планера, створки отсеков, тормозные щитки, агрегаты механизации крыла и оперения, воздуховоды, воздухозаборные каналы, отсеки фюзеляжа, узлы отъемные и открывающиеся, хвостовые отсеки лопастей, обтекатели, крышки люков и лючков и др.);

материалы (неметаллические в комбинации с алюминиевыми сплавами или без них);

вид соединения (клеевые, заклепочные по кромкам);

габаритные размеры (малогабаритные, среднегабаритные, крупногабаритные);

вид конструкции (панели плоские одинарной и двойной кривизны, агрегаты клиновидные, агрегаты замкнутые цилиндрические, эллиптические, конические);

форма конструкций в плане (квадратная, прямоугольная, трапециевидная и др.);

толщина конструкции (постоянная, переменная);

конструктивное выполнение (из двух обшивок, элементов каркаса и расположенного между ними сотового заполнителя; из двух или нескольких сотовых панелей, разнесенных друг от друга каркасом; многослойные: из набора сотовых заполнителей с промежуточными обшивками или без них; собранные из готовых элементов или собранные с одновременным формованием элементов конструкции);

технологические процессы (изготовление сотовых заполнителей из полимерных материалов методами профилирования, растяжения склееных пакетов, объемным ткачеством; пропиткой исходных материалов связующим или без нее, пропиткой сотовых заполнителей после их изготовления).

В конструкциях из полимерных композиционных материалов применяют преимущественно сотовые заполнители, изготовленные из органо- или стеклопластика и алюминиевой фольги. Основной формой ячеек в сотовых заполнителях принят правильный шестигранник.

Алюминиевые соты с шестигранной формой ячеек изготовляют в России по стандартизованной технологии, предусматривая меры по их противокоррозионной защите при контакте с углепластиком.

Применяют также сотовые заполнители с формой ячеек в виде: прямоугольника (перерастянутого шестигранника); ромба; флекскора (гибкая форма); шестигранника, усиленного гофрированными стенками либо фольгой, расположенной между склеиваемыми поверхностями (только из алюминиевых сплавов); недорастянутого шестигранника и др. (рис. 1.10.1).

Правильная шестигранная форма ячеек наиболее устойчива и целесообразна в конструкциях, в которых сотовые заполнители при укладке не деформируются или деформируются с образованием незначительной седловидности, величина которой не оказывает отрицательного влияния на качество сборки (панели плоские или малой одинарной кривизны). Сотовые заполнители из алюминиевых сплавов с ячейками шестигранной формы, усиленные гофрированными стенками или фольгой, расположенной между склеиваемыми поверхностями, имеют повышенную жесткость и поэтому применяются при изготовлении полов

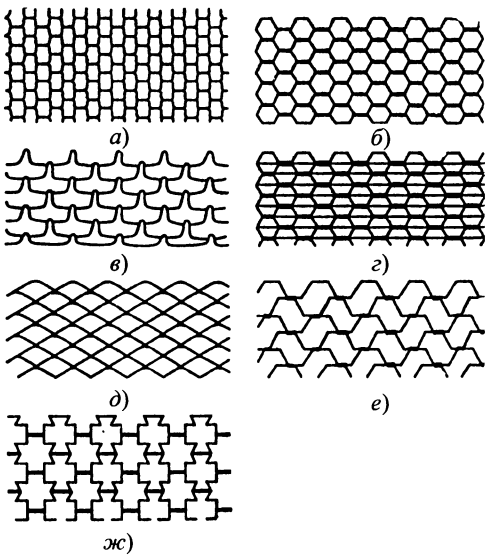


Рис. 1.10.1. Формы ячеек сотовых заполнителей:
а – прямоугольная, *б* – шестигранная, *в* – гибкая, *г* – шестигранная с усиливающими лентами; *д* – ромбическая, *е* – шестигранная смещенная, *ж* – мальтийский крест

фюзеляжа, силовых стенок, нервюр, шпангоутов и др. Форма ячеек в виде прямоугольника придает гибкость сотовым заполнителям, что позволяет выкладывать их по поверхностям большой одинарной кривизны. Заполнители с квадратной и ромбической формами ячеек могут применяться для выкладки на поверхностях незначительной кривизны. Заполнители с ячейками в виде флекскора или шестигранной смещенной формы хорошо выкладываются на поверхностях двойной кривизны.

Вне зависимости от формы ячейки и материала заполнителя увеличение толщины стенки и уменьшение размера стороны ячейки вызывают повышение плотности и, как следствие, рост прочности заполнителя при всех видах статического нагружения.

По своим конструктивным особенностям сотовые заполнители анизотропны, т.е. обладают разной жесткостью и прочностью при нагружении в различных направлениях.

Соты из алюминиевой фольги толщиной 0,03; 0,04; 0,05 мм изготовляют с размером стороны шестигранной ячейки 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 мм (рис. 1.10.2). Другие толщины фольги и размеры ячеек менее распространены.

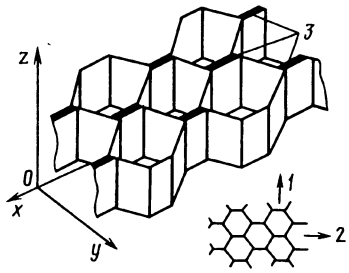


Рис. 1.10.2. Геометрические параметры сотовых заполнителей:
1 – поперечное направление сотового наполнителя; *2* – продольное направление, *3* – клеевая прослойка

Полимеросотопласты (ПСП) (ТУ 1-596-103–82, ТУ-596-200–84, ТУ-596-231–86) изготовляют из каландрованной, преимущественно, фенилоновой бумаги марки БФСК толщиной ≤ 0,1 мм с ячейками, имеющими форму правильного или неправильного шестигранника со стороной 2,5; 3,5 и 4,2 мм квадрата и ромба.

Фирма Дюпон (США) выпускает арамидные синтетические бумаги типа "Номекс", в Японии такие заполнители изготовляют из бумаги "RAJ-M" на основе волокна "Конекс".

Заполнители "Номекс" достаточно эластичны (что позволяет их формовать, когда это необходимо при сборке), допускают нагрев для снятия напряжений, возникающих при гибке. Сотовые заполнители из полимерной бумаги хорошо фрезеруются и разрезаются, хорошо совмещаются со связующими препрегов.

Для повышения модуля упругости сотового заполнителя при сдвиге, растяжении и сжатии бумагу фенилон, например, пропитывают связующим БФОС на основе фенолоформальдегидной смолы, фосполиола и этилового спирта.

Применяют также связующее на основе меламиноформальдегидной смолы, модифицированной эпоксидной смолой, и воды в качестве растворителя.

Стеклосотопласты обеспечивают более высокую механическую прочность по сравнению с заполнителями из полимерной бумаги. Однако такие заполнители имеют высокую плотность. Снижение массы при сохранении размеров ячейки в пределах 2,5…4,2 мм достигают применением стеклоткани полотняного плетения Т24П на основе полых капиллярных стеклянных волокон диаметром 8,13 мкм и толщиной 0,1 ±0,01 мм (табл. 1.10.1).

1.10.1. Физико-механические характеристики стеклосотопластов

Марка сотопласта	Фирма-изготовитель	Связующее	Размер ячейки, мм	Плотность, кг/м^3	Прочность при поперечном сжатии при $T = 20$ °С, МПа
Аэроуэб G1	Циба-Гейги (Швейцария)	Полиэфирная смола	3,48	84	3,8
			5,23	60	1,9
			7,0	45	1,1
			11,0	36	0,5
NP	Хексель (США)	Фенолополиамидная смола	2,75	72	2,5
			3,7	64	2,0
			5,5	40	1,0
HRP	Хексель (США)	Фенолоформальдегидная смола	2,75	64	2,4
			3,7	56	1,8
			5,5	35	0,7
HRH-327	Хексель (США)	Полиамидная смола	2,76	72	2,8
			5,5	64	2,3
ССП-1	Владимирский химический завод	Фенолоформальдегидная смола	2,5	100 ± 10	3,5
			3,5	80 ± 15	3,0
			4,2	65 ± 10	2,0

Стеклосотопласты весьма эффективны в конструкциях со значительной кривизной поверхности, которые трудно изготовить, применяя алюминиевые соты.

Сотовые заполнители могут быть также изготовлены из пропитанной связующим хлопчатобумажной ткани, крафт-бумаги, термопластов и других материалов.

1.10.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сотовые заполнители из указанных материалов изготовляют методами растяжения склеенных пакетов-заготовок и склеивания профилированных заготовок.

Метод растяжения склеенных пакетов-заготовок сотовых заполнителей является наиболее простым и экономически эффективным. Он поддается механизации и автоматизации, требуются ограниченные производственные площади. Применение метода упрощает механическую обработку сотовых заполнителей, особенно для трехслойных панелей постоянной толщины. Для хранения пакетов-заготовок сотовых заполнителей требуются меньшие площади, пакеты легко транспортируются и, как правило, не повреждаются в пути, если они уложены в тару.

Методом растяжения изготовляют сотовые заполнители с шестигранными, ромбическими и прямоугольными формами ячеек из нежесткой фольги (сплавы А5Т, АМг2-Н) толщиной до 0,05 мм. Применению метода благоприятствуют малая жесткость фольги, большие размеры ячеек, меньшая толщина фольги.

Метод склеивания профилированных заготовок при изготовлении сотовых заполнителей из алюминиевой фольги на основе сплавов, имеющих $\sigma_в \geq 450$ МПа и $\varepsilon = 3...5$ %, является единственно возможным. Высокая жесткость фольги и сопутствующее ей упругое последействие при изгибе, возникающее в процессе образования ячеек при растяжении плоского пакета-заготовки, исключает возможность применения метода растяжения.

Метод профилирования может оказаться также предпочтительным, когда для изготовления сотовых заполнителей применена высокопрочная фольга толщиной $\delta \geq 0{,}1$ мм.

В отечественной промышленности изготовление сотовых заполнителей из алюминиевой фольги методом профилирования с применением средств механизации и автоматизации пока не получило развития, хотя проведенные исследования свидетельствуют о перспективности этого направления. По информации фирмы Хексель (США) и Циба (Швейцария), сотовые заполнители из алюминиевых сплавов изготовляют методом профилирования с применением средств механизации.

Технологический процесс изготовления сотовых заполнителей из алюминиевой фольги методом растяжения включает операции или переходы обезжиривания фольги, нанесения на нее клеевых полос, сушку полос и сборку пакетов готовых заполнителей, склеивание пакетов-заготовок, резку пакетов-заготовок на полосы, фрезерование полос, растяжение полос, фрезерование растянутых сотовых заполнителей.

Первой операцией процесса является обезжиривание фольги, которое целесообразно осуществлять на установке, снабженной УЗ-излучателями. В качестве рабочей среды можно использовать водный раствор неонола марки АФ-9-10, подогретого до температуры 75 ±5 °С. Концентрация раствора 2 ±0,2 г/л.

Обезжиривание сопровождается очисткой перемещающейся со скоростью 1,8 ±0,2 м/мин фольги поролоновыми щетками в обезжиривающем растворе и обработкой ее ультразвуком при частоте колебаний 16 кГц. Обезжиренная фольга промывается, проходя ванну с деминерализованной водой при температуре 50 ±5 °С, а затем подвергается воздействию струй деминирализованной воды при той же температуре. Сушится фольга при прохождении через термошкаф (T = 130 ±10 °С). Качество обезжиривания контролируется в цеховых условиях люминесцентным методом при прохождении фольги через агрегат УЛКО-3, который не требует специального затемнения.

Для регистрации люминесцентным излучением остатков масла применен фотоэлектрический блок, светочувствительным элементом которого является фотоэлектронный умножитель ФЭУ. Электрический сигнал ФЭУ прямо пропорционален степени загрязнения фольги.

Нанесение на фольгу клеевых полос, их сушку и сборку пакетов сотовых заполнителей осуществляют на автоматах марок АСП-250М, АСП-450, АСП-1200 или АСП-1000.

Автомат АСП-1000 конструкции В.Е. Шамарова, предназначенный для сборки пакетов сотовых заполнителей из фольги шириной 1000 мм, состоит из механизма сматывания рулонной фольги, устройства для нанесения клеевых полос, сушильного шкафа, выравнивающего устройства, механизма образования дренажных отверстий и пакетоукладчика. Автомат позволяет изготовлять пакеты-заготовки сотовых заполнителей с дренажными отверстиями и без них. Автомат имеет ступенчатую регулировку скорости перемещения фольги.

На клеенаносящем устройстве фенолокаучуковый клей марки ВК-25 наносится полосами с двух сторон фольги методом вытекания из щелей. Затем перемещающаяся со скоростью до 3 м/мин фольга поступает в сушильный шкаф, где осуществляется удаление растворителя из клеевых полос.

Пакетоукладчик складывает пакеты в виде гармошки. Собранные в автомате АСП-1000 пакеты-заготовки (один или несколько) подают на пресс УСП-70, создающий максимальное усилие 1000 кН, для отверждения клеевых полос.

В комплект пресса обычно входит устройство для загрузки между рабочими плитами приспособлений с собранными в них пакетами-заготовками и их выгрузки.

На ленточной пиле, например, марки ЛС80-3, пакеты-заготовки разрезают на полосы, ширина которых равна высоте будущей сотовой панели. Резание осуществляют поперек клеевых полос. Форма и размеры полос устанавливаются картой раскроя. Шаблоны для раскроя пакетов-заготовок на полосы выполняют с учетом коэффициента K сужения сечения при растяжении (K = 1,33). Полосы фрезеруют по требуемому контуру на отечественных радиально-фрезерных копировальных станках типа РФК-1, на универсальных вертикально-фрезерных станках типа 6Н13, на фрезерных станках с числовым программным управлением типа ФП-7М и др. Для обработки используют дисковые фрезы со вставными ножами и концевые фрезы (материал режущей части – Р18).

Полосы из пакетов-заготовок сотовых заполнителей растягивают на отечественных станках РСУ-2-4000, РСУ-3, УРВ-1, РС-3000 и

других до образования ячеек шестигранной формы, удовлетворяющих требованиям соответствующего стандарта. Модель станка для растяжения полос выбирают с учетом габаритных размеров заполнителей, способов крепления захватов и требуемых усилий растяжения. Усадку сотовых заполнителей после растяжения, зависящую от материала и толщины фольги, размера стороны шестигранника и габаритных размеров сотовой панели, устанавливают опытным путем. Растянутые сотовые панели фрезеруют для получения заданных геометрических параметров.

Сотовые панели, вклеенные и не вклеенные в каркас, перед механической обработкой крепят полиэтиленгликолем марки ПЭГ-115 (ТУ 6-14-826–78) путем заливки его в ячейки сот на глубину 2...5 мм в середине, 4...15 мм по краям панели.

Сложные поверхности сотовых заполнителей, вклеенных в каркас, фрезеруют на копировально-фрезерных станках СКФ-3, СКФ-4 с базовой поверхностью по полке нервюр. Фрезерование сотоблоков без каркаса осуществляют на станках мод. СКФ-3, СКФ-4 по жестким копирам или на станках с ЧПУ мод. РФП-4, РФП-6. Станок РФП-6 разработан на базе станка РФП-4. Указанные станки – пятикоординатные с числовым программным управлением и предназначены для фрезерования торцов сотовых заполнителей, чтобы обеспечить получение требуемой аэродинамической формы и гладкости поверхности будущей трехслойной сотовой конструкции.

Наибольшие габаритные размеры сотового заполнителя, получаемые на станке РФП-6, – 6300 × 1500 × 350 мм.

Обработка торцов сотовой панели осуществляется острозаточенными грибковыми фрезами, закрепленными в высокооборотном шпинделе (до 18 000 мин$^{-1}$). Фрезерование осуществляют дисковым ножом, когда припуск не превышает 10 мм, и сборным дисковым ножом с набором отрезных фрез для обработки припуска до 60 мм.

Полимеросотопласты и стеклосотопласты изготовляют как методом склеивания профилированных заготовок, так и методом растяжения склеенных пакетов-заготовок.

Процесс изготовления полимеросотопластов методом склеивания профилированных заготовок включает следующие операции:

1) пропитку бумаги при прохождении ее через ванну со связующим пропиточной машины;

2) сушку пропитанной бумаги по ступенчатому режиму при прохождении ее через термошкаф;

3) резку на заготовки смотанной в рулон бумаги;

4) установку заготовки в пресс-форму, где при заданных режимах (температура, давление, выдержка) ей придают гофрированную форму;

5) нанесение клея на выступы гофр с последующей сушкой;

6) монтаж в приспособлении гофрированных заготовок с установкой между ними стержней, имеющих соответствующий профиль, до образования сотового блока нужного размера;

7) монтаж на собранный блок плиты и загрузку блока для отверждения клеевых прослоек в термокамеру;

8) охлаждение блока и выгрузку из камеры;

9) резку блока на сотовые панели требуемого размера;

10) контроль качества сотовых панелей.

Подобный процесс изготовления сотовых заполнителей из профилированного препрега на основе термопластичной матрицы может быть осуществлен с применением сварки в расплаве.

Изготовление сотовых заполнителей из ПКМ на основе полимерной бумаги методом склеивания профилированных заготовок нашло ограниченное применение в промышленности. Основной причиной является большой объем ручного труда, отсутствие средств механизации и автоматизации, не всегда высокое качество изготовления и тяжелые санитарно-гигиенические условия работы.

Метод растяжения склеенных пакетов-заготовок существует в нескольких вариантах, и один из распространенных в России и за рубежом включает следующие операции: входной контроль материалов; аппретирование бумаги и сушку аппрета; пропитку аппретированной бумаги связующим и сушку; частичное отверждение нанесенного связующего, нанесение клеевых полос на рулонный препрег, сушку клеевых полос; разрезку рулона на заготовки; сборку пакетов-заготовок; склеивание пакетов-заготовок; разрезку пакетов на дольки (при необходимости); растяжение пакетов-заготовок или долек в блоки; термообработку блоков или долек, полученных растяжением, для фиксации формы ячеек; разрезку сотовых

блоков на плоские панели требуемых размеров; соединение плоских сотовых панелей между собой (при необходимости); механическую обработку по заданному контуру; контроль качества сотового заполнителя.

Полимерную бумагу БФСК пропитывают связующим БФОС вязкостью 15...20 с по ВЗ-1 в пропиточной машине при скорости перемещения бумаги 2 м/мин.

Перемещающаяся в сушильном шкафу бумага, пропитанная связующим, после предварительной сушки при температурах 40...70 °С термообрабатывается по зонам (T = 125...175 °С). Нанесение полос фенолокаучукового клея ВК-25 на бумагу, сушку клеевых полос и сборку пакетов сотовых заполнителей можно осуществлять на заводской установке мод. АТА-150 (рис. 1.10.3). Клеевые полосы наносятся вдоль рулона бумаги с одной стороны листа при прохождении ее мимо валика с выступами, вращающегося в ванне с клеем; расстояние между выступами соответствует шагу наносимых клеевых полос. Клеевые полосы сушатся при движении бумаги через сушильный шкаф по температурным зонам от 40 до 70 °С.

Бумага после сушки нанесенных на нее клеевых полос сматывается на вращающуюся рамку, имеющую четыре грани. После каждого оборота рамки клеевые полосы наносятся на бумагу со смещением на полшага.

Собранную на рамке слоистую четырехгранную обечайку разрезают на четыре пакета, которые склеивают на прессе УСП-70 или на установке с применением СВЧ-нагрева групповым методом (одновременно до шести пакетов) при T = 165 ±5 °С с выдержкой при достижении этой температуры 1 ч.

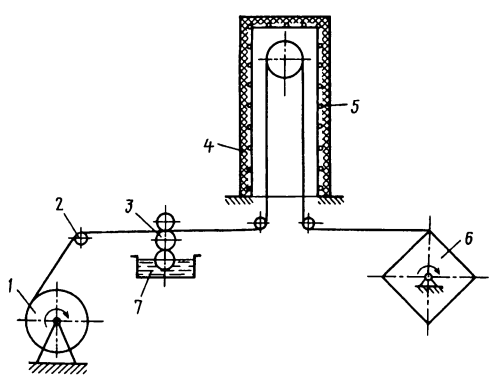


Рис. 1.10.3. Схема механизнрованной установки АТА-150:

1 – рулон бумаги, *2* – направляющий ролик; *3* – клеенаносящее устройство, *4* – сушильный шкаф; *5* – нагреватели, *6* – приемная рамка; *7* – ванна с клеем

Склеивание пакетов-заготовок сотовых заполнителей с применением токов СВЧ позволяет повысить производительность в 5 – 6 раз и в определенной мере благодаря равномерности нагрева по толщине пакетов улучшить качество соединения. Подложки под пакеты изготовляют из стеклопластиков на основе полиамидного связующего, а вакуумный чехол – из пленки Ричмонд.

Существенным преимуществом метода является отсутствие необходимости в создании высокого давления.

Склеенные пакеты-заготовки растягивают в блоки на приспособлении, которое затем загружают в термокамеру, чтобы зафиксировать форму ячеек.

Сотовые блоки после термообработки разрезают на сотопанели с точностью по толщине ±0,05 мм. Резку осуществляют на ленточно-пильных станках типа "Хексель". На этих станках разрезают сотоблоки размером до 2500 × 1200 × 700 мм. Сотоблоки крепят к столу при созданий перепада давления с помощью вакуумной системы.

Сотовые заполнители из стеклопластиков изготовляют методами профилирования, объемного ткачества и растяжения. Изготовление сотовых заполнителей *методом профилирования* из листов ткани, пропитанных связующим, с последующим склеиванием из них блоков не получило широкого распространение в промышленности, так как основано на ручном труде и, следовательно, характеризуется низкой производительностью и недостаточно высоким качеством соединения.

Объемным ткачеством изготовляют сотовые заполнители с любыми известными формами ячеек, причем отдельно или совместно с одной из обшивок. Метод позволяет ткать изделия в довольно широком диапазоне кривизны с постоянной или переменной толщиной без применения клея. При этом используют специальные ткацкие станки, которые могут работать по заданной программе. Такие станки способны ткать три или даже четыре отдельных слоя стеклянной ткани различных плетений. Метод обеспечивает более высокую прочность участков соединения сот, возможность введения в конструкцию нитей различных материалов, возможность изготовления сотового заполнителя переменной толщины за одно целое с одной из обшивок и др.

Метод характеризуется высокой степенью механизации всех операций процесса, при этом сокращается трудоемкость и улучшаются условия труда.

Снятые со станка объемные ткани при необходимости механически обрабатывают, а затем растягивают, пропитывают связующим и сушат после каждой пропитки.

Наибольшее развитие в промышленности получил *метод растяжения*. Этим методом изготовляют сотовые заполнители из сплошных стеклотканей марок Т-1, Э3-100 и других и полотняного плетения марки Т-24П на основе полых (капиллярных) стеклянных волокон диаметром 8...13 мкм.

На одну сторону стеклоткани вдоль основы наносится полосами клей, например, фенолоацетатный марки БФ-2 вязкостью 35...45 с по ВЗ-1. Для визуального контроля качества нанесения клей имеет красный цвет. Стеклоткань с нанесенными на нее клеевыми полосами, проходя через термошкаф, сушится при температуре 100...110 °С. Затем ткань поступает на вращающуюся рамку и наматывается на нее. Сматываемую с рамки стеклоткань разрезают на мерные длины. Пакеты, собранные вручную из 115 – 200 листов, склеивают групповым способом (по четыре пакета одновременно) на гидравлическом прессе. Предварительно пакеты выдерживают в прессе при сомкнутых плитах без давления в течение 90 ±10 мин при температуре 150 ±10 °С. Далее создают давление 0,45... 0,5 МПа и выдерживают при 150 ±10 °С в течение 50...70 с.

Пакеты растягивают в специальной кассете, а затем в течение 10 мин пропитывают бакелитовым лаком ЛБС-1, имеющим плотность по ареометру 1,015...1,035 (для двухкратной пропитки) и 0,95...0,99 (для трехкратной пропитки).

Пропитанные связующим сотоблоки сушат на воздухе при 18...20 °С в течение 1,5 ч, а затем отверждают в термокамере при 120...140 °С в течение 3...4 ч. При таких же режимах сушат последующие слои.

Блоки разрезают на ленточнопильных станках на сотопанели требуемого размера.

Для реализации метода можно использовать автоматизированную установку конструкции А.П. Сорочихина (рис. 1.10.4). На этом автомате сматываемая с катушки *9* стеклоткань *3* пропускается между валом *7* и клеенаносящем устройством, состоящим из ванны *5* и

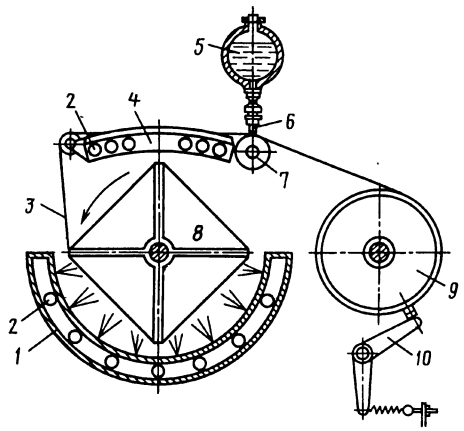


Рис. 1.10.4. Схема автомата конструкции А.П. Сорочихина:
1 – сушильное устройство; *2* – электронагреватели; *3* – стеклоткань; *4* – плита с обогревом; *5* – ванна; *6* – клеенаносящее устройство; *7* – ролик; *8* – рамка; *9* – катушка со стеклотканью; *10* – рычаги

шариковых карандашей *6*, которые закреплены на резьбе в днище ванны, через нагретую до заданной температуры плиту *4* и наматывается на рамку *8*, установленную внутри станины. Количество карандашей соответствует числу наносимых клеевых полос. В рабочей части карандашей заделаны шарики, выступающие из отверстий примерно на четверть сферы. Шарики поджимаются к седлам отверстий пружинами. Движущаяся относительно неподвижных карандашей ткань приводит во вращение шарики. При вращении и вдавливании шарики переносят клей из полостей внутри карандашей, сообщающихся с ванной, на стеклоткань. Разработан вариант клеенаносящего устройства, где клеевые полосы наносятся методом печати роликами.

Клеевые полосы, нанесенные на ткань, проходя над плитой *4* с электронагревателями *2*, предварительно подсушиваются. При применении клея БФ-2 плиту нагревают до 200°С. Окончательно клеевые полосы высушиваются горячим воздухом в устройстве *1* при намотке ткани на четырехгранную рамку *8*. После каждого полного оборота рамки клеенаносящее устройство смещается поперек ткани на полшага, чем достигается шахматное расположение клеевых полос в сечении пакета. Натяжение стеклоткани обеспечивается тормозным устройством *10*.

1.10.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СБОРКИ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ ИЗ ПКМ

Обшивки, нервюры, пакеты и другие детали из композиционных материалов для сотовых конструкций изготовляют из заготовок, полученных ручной или механизированной выкладкой препрегов или сухого армирующего материала на формы.

При этом препреги раскраивают на заготовки по шаблонам, а затем собирают их в плоские пакеты на столе или на форме, имеющей кривизну. Число слоев и направление укладки каждого слоя устанавливают согласно чертежу детали. Пакеты фиксируют в пресс-формах на гидравлических или пневматических прессах. Режимы прессования выбирают с учетом свойств применяемых материалов и заданных требований к качеству.

Пакет-заготовку переносят на форму. Формование деталей из такого материала проводят в автоклаве, термокамере или пресс-форме.

Узлы и агрегаты собирают из деталей, изготовленных на формообразующей оснастке (раздельная технология), из деталей, формуемых во время сборки на сборочно-склеечном приспособлении (совмещенная технология) или из формованных деталей и деталей, изготовляемых в сборочном приспособлении (комбинированная технология).

Необходимость предварительного формования деталей (обшивок, накладок, стенок и др.), входящих в панели, лонжероны, створки, обтекатели и другие узлы, вне сборочного приспособления устанавливают с учетом технологических свойств материалов (препрегов, клеевых композиций), требований к прочности этих деталей и конструкций на их основе, особенностей конструктивного выполнения узлов и агрегатов, возможности передачи на сотовый заполнитель высоких давлений формования, если его прочность недостаточна при поперечном сжатии и т.п.

Раздельное формование позволяет расширить фронт работ, однако вносит дополнительные трудности, связанные с обеспечением заданных зазоров между деталями при сборке. Существенным преимуществом такого метода является возможность изготовления более эффективных с точки зрения эксплуатационных характеристик изделий, в которые входят детали из разнородных материалов, режимы формования которых отличаются друг от друга.

В отличие от раздельного совмещенный метод формования применяют в основном для изготовления менее ответственных узлов. При этом методе формование обшивок, окантовок, усилений панелей выполняют одновременно с соединением их с сотовым заполнителем, полками лонжерона и другими деталями.

Совмещение операций формования и соединения допустимо только тогда, когда для отверждения связующих и клеевых композиций требуются одни и те же технологические режимы.

При сборке узлы базируют либо по внешней поверхности обшивки, либо по поверхности каркаса, в которую входят полки нервюр и лонжеронов, торцы сотового заполнителя, поверхность хвостового стрингера, вкладышей и других деталей. Выбор варианта базирования увязывают с требуемой точностью обтекаемого контура, жесткостью сотового заполнителя и элементов каркаса. При базировании по внешней поверхности обшивки обеспечивают полное прилегание к внутренней поверхности этой обшивки сотового заполнителя и деталей каркаса без приложения больших дополнительных усилий, чтобы исключить появление остаточных напряжений, которые уменьшают несущую способность конструкции.

Точное прилегание деталей обеспечивается ручным прижимом. Когда такой путь оказывается малоэффективным, применяют механическую обработку деталей. Это в первую очередь относится к сотовым заполнителям большой высоты с ячейками малых размеров и жесткими стенками, а также к трудно деформируемым без значительных упругих последействий деталям каркаса.

Базирование по поверхности каркаса осуществляют, когда возникающие на внешней поверхности обшивки отклонения не выходят за пределы допустимых техническими условиями или когда получаемые отклонения могут быть устранены последующей обработкой поверхности.

Для обеспечения взаимозаменяемости деталей в процессе сборки, снижения трудоемкости производства и повышения качества изделий проводят увязку заготовительной и сборочной оснасток.

Склеивание изделий в автоклавах осуществляют под давлением сжатого воздуха или

инертного газа. В электрических термокамерах давление создают с помощью вакуумных чехлов, механических прижимов или сжатого воздуха, на прессах – нагреваемыми плитами рабочего стола, в стапелях или сборочных приспособлениях – с помощью рычажных устройств и другими методами. Выбор способа нагрева и создания давления зависит от конструкции узла или агрегата, наличия оборудования и источников нагрева. На прессах склеивают плоские панели, имеющие небольшую высоту. При этом теплоты, поступающей с одной из плит, достаточно не только для приклеивания обшивок, но и для вспенивания клея, соединяющего стенки каркаса панели с сотовым заполнителем. Давление на собираемое изделие прикладывается только с одной стороны (сверху или снизу) в зависимости от расположения гидроцилиндра пресса.

Закрепление деталей в требуемом положении во время монтажа выполняют зажимами и фиксаторами, допускающими перемещение соединяемых деталей при нагреве, чтобы не вызвать их коробление. Смещение деталей при сборке и склеивании устраняют применением упоров и ограничителей. Деформацию профилей, обычно располагаемых по периметру панелей, исключают вкладышами, вставляемыми между полками этих профилей. Приспособления оснащают также устройствами, позволяющими фиксировать положение других деталей (окантовок, втулок и т.п.). При сотовых заполнителях не требуется применять в сборочных приспособлениях дополнительные ограничители, поскольку ими являются стенки профилей каркаса.

На прессе склеивают панели одиночным или групповым методом. При применении группового метода между приспособлениями устанавливают дополнительные нагревательные плиты.

Приспособления, предназначенные для склеивания сотовых конструкций в термокамере с применением вакуумирования, рассчитывают на давление не более 0,1 МПа или на более высокое давление, если в сочетании с вакуумированием выполняют механический прижим или осуществляют прижим только с помощью механического устройства.

В сборочных приспособлениях склеивают хвостовые отсеки несущих лопастей вертолетов, радиопрозрачные обтекатели самолетов, трехслойные панели различной кривизны и др. Для склеивания хвостовых отсеков лопастей разработано много приспособлений с различными конструктивными схемами. В одном из них давление на участке соединения обшивки с сотовым заполнителем передается посредством прижима через тарированные пружины, а на участке соединения обшивки с нервюрами и хвостовым стрингером-рамкой – также через тарированные пружины, но с большим усилием. Приспособление с собранным в нем хвостовым отсеком устанавливают на рабочий стол пневматического пресса для сжатия пружин до необходимой величины, после чего осуществляют фиксирование защелками (замком). Приспособление устанавливают на тележку, которую загружают в термокамеру для термостатирования клеевых прослоек при заданных режимах.

Приспособления для склеивания изделий из композиционных материалов в автоклаве воспринимают достаточно большие давления, и поэтому они должны быть прочными и жесткими. Такие приспособления изготовляют из стали, алюминиевых сплавов и композиционных материалов. Склеивают в них как крупногабаритные конструкции, так и малогабаритные. Каркас приспособления обычно представляет собой раму из профилей, в нижней части которой расположен ложемент по форме поверхности одной из обшивок склеиваемого узла. Ложементом может быть формованный лист, оправка, сотовая панель и т.п. Часто ложемент особенно крупных приспособлений опирают на обработанные по требуемому контуру лекала. Приспособление оснащают упорами, ограничителями, фиксаторами, зажимами для установки в требуемое положение деталей узла. Причем предусматривают также возможность взаимного перемещения деталей в результате их нагрева. В приспособлениях для склеивания изделий в автоклавах и термокамерах предусматривают возможность сборки конструкций с припуском, предназначенным для изготовления из него образцов-свидетелей.

Вне зависимости от конструктивного исполнения узлов и агрегатов из ПКМ технологический процесс их сборки с помощью склеивания из готовых деталей включает следующие операции и переходы: подготовку сборочного приспособления; предварительную сбор-

ку конструкции из деталей, изготовленных на заготовительной оснастке; подгонку для обеспечения взаимного прилегания деталей с требуемыми по техническим условиям зазорами; разборку соединений; подготовку склеиваемых поверхностей деталей, включая прикатку клеевых и вспенивающихся пленок или нанесение жидких клеев; сборку конструкций по тем же базам, которые были приняты в процессе предварительной сборки; установку приспособлений с собранными в них узлами или агрегатами на вакуумный стол и подготовку к термостатированию либо установку приспособлений на пресс; загрузку вакуумного стола в автоклав или в термокамеру; образование клеевого соединения; выгрузку вакуумного стола с изделием из автоклава (термокамеры), охлаждение, разборку приспособления и съем изделия.

Многие из этих операций и переходов имеют место и в совмещенной технологии. Отличие заключается в монтаже не готовых деталей, а в выкладке пакетов-заготовок элементов жесткости (поясов, лонжеронов, усилений и др.), наружной и внутренней обшивок.

Для обеспечения установленных требований к качеству изделий, собираемых по описанной технологии, обращают особое внимание на выполнение наиболее ответственных операций, к которым может быть отнесена подготовка оснастки к сборке, которая заключается в проведении профилактического осмотра, проверке обводов, контроле установки стыковых узлов, выявлении дефектов и в случае необходимости их устранении.

Поверхности оснастки перед выкладкой препрегов, цулаги, внутренние и наружные поверхности сборочных приспособлений очищают от пыли, грязи, подтеков клея и связующих, смазок с помощью тампонов, волосяных щеток, пылесосом и при необходимости абразивной шкуркой на тканевой основе. Царапины и другие дефекты на рабочих поверхностях зачищают шлифовальной шкуркой или даже абразивным кругом. При этом не допускается нарушение гладкости поверхности.

Обезжиривание очищенных поверхностей осуществляют тампонами, смоченными бензином "Нефрас" с антистатической присадкой "Сигбол", а затем ацетоном. Для обеспечения съема формованной детали с оснастки или склеенного изделия из приспособления обезжиренные поверхности покрывают смазкой К-21 или аэрозольной смазкой "Фторлон". 10%-ный раствор смазки К-21 в бензине наносят кистью двумя слоями в перпендикулярных друг к другу направлениях с открытой выдержкой каждого слоя 30...40 мин и последующей термообработкой оснастки при 210...220 °С в течение двух часов. Выгружают оснастку из термокамеры при достижении 40...50 °С. Смазку наносят через каждые три цикла формования или склеивания.

Смазку "Фторлон" напыляют с расстояния 25...40 см двумя слоями в перпендикулярных друг к другу направлениях с открытой выдержкой каждого слоя 20...25 мин. Смазку наносят перед каждым циклом формования или склеивания.

Предварительную сборку сотовых конструкций проводят для обеспечения необходимого согласования размеров деталей, качества их прилегания в соединениях и установления соответствия наружных обводов деталей форме ложементов приспособлений и контуру элементов форм.

Предварительную сборку называют сухой, поскольку ее ведут без применения клеев. В процессе предварительной сборки детали подгоняют друг к другу, чтобы получить требуемые по ТУ ступеньки между склеиваемыми поверхностями полок каркаса и обшивок, с одной стороны, а также между полками и сотовым заполнителем, – с другой. Ступеньки, как правило, не могут превышать 0,1 мм. Зазоры на участках стыка деталей каркаса между собой поддерживают в пределах 0,5...1,0 мм.

В процессе сборки по раздельной технологии, когда это допускает конструкция и применяемые материалы, прилегание обшивок к сотовому заполнителю контролируют по четкости отпечатка сот на полиэтиленовой пленке при опрессовке узла в вакуумном мешке. Опрессовку проводят в автоклаве или термокамере при температуре 70...80 °С, давлении 15 кПа в течение 20...25 мин. Зазор не должен быть более 0,1 мм. Зазоры на участках соединения обшивок с полками каркаса контролируют щупом, а неприлегание боковых поверхностей сотовых заполнителей к стенкам деталей каркаса – согласно ТУ.

Поверхности сотовых заполнителей на основе полимерной бумаги и стеклоткани доводят, при необходимости, для получения до-

пустимых ступенек шлифовальной шкуркой, а из алюминиевых сплавов – абразивными брусками и шкуркой. Обшивки из композиционных материалов правке не подлежат из-за опасности их разрушения. Вместо подгонки обшивок иногда практикуют селективную сборку из подходящих по качеству запасных деталей.

Предварительную сборку осуществляют в том же приспособлении, в котором окончательно собирают конструкцию. Такой подход позволяет установить единую технологическую базу для сборки и избежать несогласованности размеров изделия.

Материал ложементов приспособлений, степень подвижности ограничителей и фиксаторов, зазор между отверстиями и контрольными болтами, применяемыми для сборки обшивок с полками каркаса и деталей каркаса между собой, устанавливают с учетом величины температурного коэффициента линейного расширения элементов склеиваемой конструкции.

Обшивки фиксируют в приспособлениях таким образом, чтобы в процессе термического расширения обеспечить свободное их перемещение по поверхности сотового заполнителя и полкам каркаса, исключив деформацию. Сотовый заполнитель вставляют в каркас с натягом.

После завершения предварительной сборки соединения разбирают.

Подготовка склеиваемых поверхностей обшивок включает удаление так называемых жертвенных технологических слоев из тканей (например, лавсановой и др.) и обработку деталей каркаса шлифовальной шкуркой. При отсутствии технологических слоев обшивку обрабатывают шлифовальной шкуркой до получения равномерной шероховатости. Обезжиривание поверхностей деталей из полимерных композиционных материалов не допускается.

Торцы сот от продуктов зашкуривания очищают щеткой или сдувают эти продукты струей очищенного от масла сжатого воздуха. Заусенцы у сотовых заполнителей снимают шлифовальной шкуркой.

Сотовые заполнители из алюминиевых сплавов обезжиривают перхлорэтиленом или водными растворами моющих средств на специальных установках, а также бензином и ацетоном. Бензин применяют с антистатической присадкой "Сигбол" со строгим соблюдением правил техники безопасности. Конструкции, имеющие сочетание обшивок из углепластика с сотовым заполнителем из фольги на основе сплава АМг-2Н, обладают достаточно высокой несущей способностью. Вместе с тем контакт углепластика с алюминиевым сплавом является недопустимым из-за опасности гальванической коррозии последнего. Это учитывают при проектировании сотовых конструкций, применяя в качестве разделительного слоя между обшивкой из углепластика и сотовым заполнителем из АМг-2Н стеклопластик, припрессовываемый к внутренней стороне обшивки. Вторым барьером между углепластиком и алюминием служит клеевая прослойка, обеспечивающая неразъемное соединение обшивки с сотовым заполнителем. Тем не менее, в эксплуатации, хотя и редко, имеют место отдельные случаи коррозионного поражения стенок сотового заполнителя. Чтобы исключить коррозию, сотовые заполнители изготовляют из анодированной алюминиевой фольги. Фрезерованные торцевые поверхности сотовых заполнителей защищают адгезионным грунтом.

Клеевые пленки раскраивают на столе по шаблонам. Перед укладкой на обшивку клеевых пленок с одной их стороны снимают ламинированную бумагу. Той стороной, где снята защитная бумага, клеевые пленки прикатывают к обшивкам, совмещая их по контуру и не допуская образования складок, пузырей и неровностей, через защитный полиэтиленовый слой на механизированных установках или роликом. При появлении пузырей их удаляют иголкой без ее касания с поверхностью детали. Полиэтиленовый защитный слой удаляют с прикатанных клеевых пленок непосредственно перед окончательной сборкой.

Прокладку дополнительных клеевых пленок на участках с повышенными зазорами осуществляют только тогда, когда это допустимо техническими условиями на изделие.

В сотовый заполнитель согласно чертежу можно устанавливать прокладки, втулки, заливать бобышки и т.п.

При окончательной сборке должно быть соблюдено точно такое же, как при предварительной сборке, взаимное положение деталей, обеспечено надлежащее качество их сопряжения между полками и стенками стыкуемых деталей каркаса, между сотовым заполнителем и каркасом, проверена правильность установки

узлов навески, деталей передачи сосредоточенных нагрузок, замков и др.

Особое внимание должно быть уделено обеспечению возможности расширения деталей без заклинивания или коробления при нагреве.

Применение автоклавов позволяет склеивать конструкции различных размеров, вплоть до длины 24 м диаметром до 4 м, создавать температуру до 350 °С, использовать для получения требуемого давления сжатый воздух, инертный газ, автоматически поддерживать заданные режимы (p, t, T), механизировать загрузку и выгрузку приспособлений установленными на них изделиями, обеспечивать выполнение санитарно-гигиенических требований.

Автоклавное склеивание освоено большинством самолетостроительных фирм США, Великобритании, Франции, Нидерландов и других стран. Основным поставщиком автоклавов является фирма Шольц (Германия), хотя автоклавы изготовляют и другие зарубежные фирмы, в том числе самолетостроительные (например, Боинг). На самолетостроительных предприятиях СНГ применяют автоклавы собственного и зарубежного производства.

При склеивании в автоклаве или термокамере приспособления с собранными в них изделиями и образцы-свидетели (если в конструкции не предусмотрен припуск для изготовления из него образцов-свидетелей) устанавливают на вакуумный стол. Подготовка к термостатированию заключается в следующем: в непосредственной близости к клеевым слоям устанавливают контрольные термопары. Одну-две термопары закрепляют на деталях с наибольшей теплоемкостью и одну-две – на деталях с наименьшей теплоемкостью.

Острые углы и места резких переходов в конструкции прокладывают жгутами из стеклоткани. Для обеспечения равномерного отсоса воздуха и равенства давлений в любой точке под вакуумным чехлом укладывают дренажные слои из стеклоткани. Чехол тщательно герметизируют по контуру приспособления или стола, исключая возможность его разгерметизации в процессе склеивания. Для этого применяют жгут из герметика или вакуумный чехол закрепляют по контуру стола струбцинами через резиновые прокладки. Герметичность вакуумной системы и вакуумного чехла контролируют по величине падения вакуума во времени. Величину перепада давления и время падения вакуума устанавливают с учетом объема вакуумной системы и принятых режимов склеивания конструкций.

При получении положительных результатов контроля вакуумный стол загружают в автоклав или в термокамеру. Вакуумную систему стола подключают к соответствующим выводам автоклава (термокамеры) и подсоединяют термопары к штепсельным разъемам оборудования. Вакуумный чехол покрывают "одеялом" (стекло- или асбестовая ткань).

Подготовительные операции к склеиванию проводят согласно инструкции по эксплуатации автоклава (термокамеры). Склеивание в автоклаве, термокамере или на прессе осуществляют по режимам, выбранным с учетом марки клея и типоразмера сотового заполнителя.

Например, для эпоксидного клея ВК-41 в автоклаве поддерживают под чехлом остаточное давление в пределах 0,08...0,09 МПа и обеспечивают подъем температуры со скоростью –2 °С/мин. При достижении в автоклаве давления 0,09...0,1 МПа отключают вакуумную систему, а полость под мешком соединяют с атмосферой. Далее давление в автоклаве доводят до величины, удовлетворяющей выбранному типоразмеру сотового заполнителя, и температуру повышают до 120 °С. После соответствующей выдержки автоклав охлаждают, давление снимают и вакуумный стол выгружают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Берсудский В.Е., Крысин В.Н., Лесных С.И.** Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.

2. **Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М.** Сотовые конструкции. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.

3. **Крысин В.Н.** Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.

4. **Панин В.Ф., Гладков Ю.А.** Конструкции с заполнителем: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

5. **Bratukhin A.G. and Bogolyubov V.S.** Composite Manufacturing Technology. London: Chapman & Hall, 1997. 433 p.

Глава 1.11

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.11.1. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Понятие сварки изделий из полимерных материалов (ПМ) (см. гл. 2.3) может быть распространено и на случаи сварки деталей из ПКМ. Поскольку в процессе образования сварного соединения деталей из ПКМ участвует полимерная матрица, механизм сварки этих материалов ничем не отличается от сварки соответствующих ПМ.

На технологию сварки ПКМ влияет в первую очередь свариваемость основы этих материалов – полимеров, которая в свою очередь зависит от физической и химической структуры последних. Необходимыми технологическими свойствами в нужной мере обладает лишь один вид ПМК, а именно термопластичные КМ (ТКМ).

Если согласиться с понятием свариваемости как способностью реализовать свойства материала в сварном соединении, то основными вопросами в рассматриваемой проблеме становятся сохранение структуры материала в зоне шва и выяснение влияния структуры и типа наполнителя на процесс сварки полимерной матрицы.

Свариваемость ТКМ в значительной мере зависит от свариваемости термопласта, являющегося матрицей для данного материала. В большинстве работ, посвященных изучению свариваемости наполненных или армированных термопластов, мало данных о влиянии наполнителей на процесс сварки. Частично это можно объяснить тем, что в исследованиях часто фигурировали термопласты с относительно небольшой объемной долей (до 10 %) наполнителей, пленочные КМ или трубы, к прочности соединений которых не предъявлялись высокие требования.

При сварке КМ в расплаве, когда полимер в зоне контактирующих поверхностей доводится до вязкотекучего состояния, в первую очередь необходимо учитывать, что введение наполнителя в термопласт приводит к изменению теплофизических свойств и вязкости материала при температуре сварки. Поскольку наполнители типа технического углерода и стекла проводят теплоту лучше, чем термопласты, их удельная теплоемкость меньше, а плотность выше, введение неорганических наполнителей указанных видов увеличивает теплопроводность ТКМ. Благодаря этому прогрев происходит быстрее, однако ускоряется и отвод теплоты из зоны сварки. Наполнение термопластов наиболее благоприятно влияет на скорость нагрева свариваемых поверхностей при подводе теплоты к внешним поверхностям деталей (так называемом косвенном нагреве), причем в первую очередь в случае соединения толстостенных деталей. Если теплота генерируется в месте сварки, то повышенная теплопроводность ТКМ увеличивает тепловые потери в результате передачи теплоты в сварочные инструменты. При сварке с присадочным материалом из-за более быстрого охлаждения материала шва необходимо принимать в расчет более высокий уровень термических остаточных напряжений в зоне шва и связанное с этим более низкое качество соединения. При сварке нагретым инструментом прямым нагревом (подвод теплоты непосредственно к соединяемым поверхностям) более высокая теплопроводность ТКМ может привести к снижению температуры во время технологической паузы (с момента отвода деталей от инструмента до момента их контактирования) до уровня ниже температуры плавления $T_{пл}$, что исключит качественное протекание фазы образования соединения. Из-за высокой скорости отвода теплоты в зажимные приспособления при сварке рассматриваемым способом необходимо учитывать также меньшую глубину проплавления в зоне стыка.

При сварке тепловыми методами анизотропных ТКМ следует учитывать изменение скорости нагрева в зависимости от направления подачи теплоты.

Кажущаяся вязкость η ТКМ зависит не только от вида и количества наполнителя, но также от размера, формы и распределения его частиц. При одинаковых размерах, форме и распределении частиц вязкость монотонно возрастает с увеличением количества наполнителя. Частички наполнителя несимметричной формы ориентируются в направлении течения материала, поэтому их влияние на свойства как деталей, так и материала шва может быть различным. При агломерировании частиц наполнителя их воздействие на вязкость термопласта иное, чем самих неагломерированных частиц. Влияние на вязкость тем заметнее, чем

мельче частицы, поскольку удельная поверхность и связанная с этим способность к схватыванию с полимером при уменьшении размера частиц возрастают. При низких скоростях сдвига, которые имеют место в расплаве материала при сварке деталей, армирующий наполнитель так же, как и порошкообразный наполнитель, оказывает большее влияние на реологическое поведение ТКМ, чем при высоких скоростях сдвига. Из-за сложной взаимосвязи между вязкостью наполненного термопласта и характеристиками наполнителя расчет требуемого давления для различных ТКМ и способов сварки ограничен.

Влияние введения волокнистых наполнителей в термопласты на их свариваемость изучено на примере как традиционных термопластов: полипропилена (ПП), полиэтилена (ПЭ), полиамида (ПА), поливинилхлорида (ПВХ), поливинилиденфторида (ПВДФ), так и материалов нового поколения: полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), полисульфона (ПСН), полифениленсульфида (ПФС), полиэфиримида (ПЭИ). Минимальные значения η для ненаполненного ПП и армированного стекловолокном (рис. 1.11.1) практически не отличаются друг от друга вследствие малой объемной доли наполнителя. В то же время более высокая теплопроводность стеклонаполненного ПП приводит к более быстрому охлаждению свариваемых поверхностей во время технологической паузы и, как следствие, к более быстрому нарастанию η за пределом минимума и меньшему объему выдавленного расплава из зоны контакта. Процесс течения расплава наиболее затруднен там, где он должен быть максимальным. Этим объясняются невысокие значения относительной прочности сварных соединений стеклонаполненного ПП (около 0,4), что ниже, чем у ненаполненного. В качестве решения проблемы повышения прочности соединения предлагается проводить предварительный нагрев свариваемых деталей и/или зажимных приспособлений.

Относительная прочность стыкового соединения падает с увеличением содержания наполнителя в термопласте. Причем, как следует из рис. 1.11.2, введение армирующего наполнителя – стекловолокна в термопласт в меньшей степени ведет к снижению прочности сварного соединения, нежели введение порошкообразного наполнителя. Аналогичные результаты имеют место и при сварке наполненного ПВХ. Прочность при растяжении стыковых сварных соединений труб из ПВХ, наполненного древесными опилками или текстолитовой крошкой, составляет соответственно 70 и 90 % прочности несваренных труб. Ухудшение свариваемости в расплаве отмечают у ПВДФ при наполнении его углеродными волокнами. Лишь 75 % прочности материала при растяжении достигли при сварке наполненного стекловолокном ПА марки Miramid VE-30.

Поскольку при формовании деталей из наполненных термопластов на их поверхности образуется лишь тонкий полимерный слой, то уже априори свариваемость ТКМ должна отличаться от свариваемости ненаполненных термопластов. Эмпирически пришли к выводу, что менее дефектная граница контакта свариваемых поверхностей возникает при сварке ТКМ с ненаполненным термопластом. Эти данные и вывод о необходимости наличия

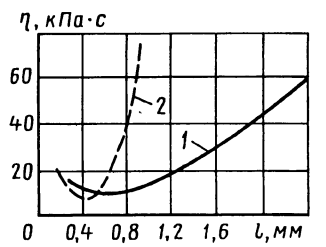


Рис. 1.11.1. Изменение вязкости η ненаполненного (*1*) и наполненного (*2*) (масс. доля 30 %) стекловолокном ПП на различном расстоянии *l* от середины стыкового шва, выполненного сваркой нагретым инструментом, после прямого нагрева (температура инструмента $T_{и.и} = 250$ °С, время нагрева $t_и = 240$ с и время технологической паузы $t_н = 5$ с)

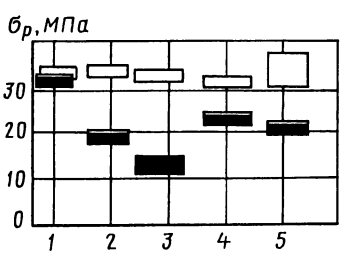


Рис. 1.11.2. Влияние наполнителей на разрушающее напряжение $\sigma_р$ при растяжении ПП и его сварных соединений:
1 – ненаполненный ПП; *2* – массовая доля талька 20 %, *3* – массовая доля талька 40 %; *4* – массовая доля стекловолокна 20 %, *5* – массовая доля стекловолокна 30 %; ▭ – исходный материал; ■ – сварное соединение

достаточного слоя термопласта на поверхности свариваемого материала для обеспечения высокой прочности соединения привели к заключению о целесообразности использования прокладок из ненаполненного полимера между соединяемыми поверхностями деталей из ТКМ. Такие прокладки оказались достаточно эффективными при сварке в расплаве новейших типов армированных волокнами термопластов. Подобно тому, как рост объемного содержания матрицы в ТКМ ведет к увеличению его межслоевой трещиностойкости, введение дополнительного количества термопласта в зону сварки способствует повышению трещиностойкости соединения.

При сварке углепластика на основе ПЭЭК введение дополнительной пленки из ПЭЭК в зону шва повышает прочность соединения при сдвиге в 2 раза, а энергия разрушения G_{Ic}, замеренная на образце – двойная консольная балка, составила 2,25 кДж/м^2. Проблемой при выполнении такого сварного соединения является обеспечение локального нагрева промежуточного слоя, имеющего такую же температуру текучести, как у матрицы соединяемого ТКМ, чтобы исключить изменения в схеме укладки армирующих волокон в зоне шва. Решением этой проблемы стало запатентованное фирмой ICI Composites Structures (Великобритания) предложение применять промежуточный слой, названный Thermabond и представляющий собой прослойку из армированного углеродными волокнами (объемная доля 61 %) ПЭЭК с нанесенным толщиной 75 мкм слоем аморфного ПЭИ. Хотя ПЭИ имеет более высокую температуру стеклования, он более легкоплавкий (у ПЭИ $T_{пл}$ = 216 °С, у ПЭЭК $T_{пл}$ = 334 °С). Методом термического анализа доказана совместимость ПЭИ с ПЭЭК. Соединение с помощью слоя Thermabond может выполняться при температурах от 230 до 300 °С при использовании различных способов нагрева: конвективного в автоклаве, контактного между плитами пресса, индукционного или резистивного. Соединение с помощью слоя ПЭИ марки Ultem проводят при температуре 316 °С в течение 5 мин. Вместе с тем необходимо учитывать, что значительное превышение температуры 300 °С вызывает искажение схемы укладки армирующих волокон в свариваемом материале. Оптимальная толщина слоя Thermabond 150...250 мкм.

Нахлесточные соединения (длина перекрытия 12,5 мм) 16-слойного квазиизотропного углепластика на основе ПЭЭК (прочность при сдвиге 35 МПа, межслоевая вязкость разрушения 1,8...2,8 кДж/м^2) с помощью промежуточного слоя Thermabond по прочности при сдвиге (τ = 30...40 МПа) превосходят клеевые соединения, выполненные эпоксидным клеем (τ = 16 МПа), и соединения с помощью промежуточного слоя из ненаполненного ПЭИ (τ = 5...10 МПа). Однако по вязкости G_{Ic} разрушения они в 1,5 раза уступают G_{Ic} соединяемого материала.

Прочность сохраняется после 24 ч выдержки в кипящей воде, но снижается от 35 до 19 МПа через 24 ч выдержки в метиленхлориде.

Изучение морфологии шва, изготовленного с помощью Thermabond, показало, что происходит миграция армирующих ПЭЭК волокон в аморфный слой из ПЭИ.

Применение в качестве присадочного материала прослойки из ПЭИ более эффективно, чем использование прослойки из ПЭЭК, как в отношении снижения температуры $T_{св}$ сварки, так и повышения показателей прочности соединения, в том числе при выполнении ремонтных работ с использованием различных методов сварки (рис. 1.11.3).

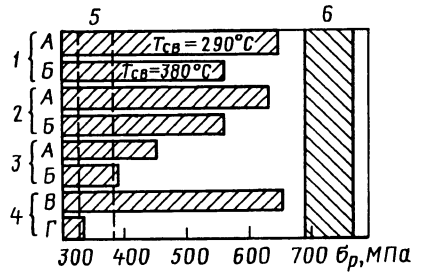


Рис. 1.11.3. Влияние метода соединения накладки с пластиной (размер 220 × 90 мм), имеющей отверстие, из 8-слойного (0°, 90°, +45°, –45°) углепластика на основе ПЭЭК марки АРС-2 и волокна марки IM6 на ее прочность $\sigma_р$ при растяжении:

1 – прессовая сварка нагретым инструментом; *2* – терморезисторная сварка закладным нагревательным элементом, *3* – ультразвуковая сварка; *4* – склеивание, *5* – прочность пластины с отверстием, *6* – прочность целой пластины; *А* – прослойка из ПЭИ, *Б* – прослойка из ПЭЭК; *В* – клей марки AV 118, поверхности перед склеиванием протравлены в кислоте, температура отверждения клея 180 °С; *Г* – клей марки AY 103, поверхности не подготавливали

При сравнении свариваемости ТКМ со свариваемостью ненаполненных термопластов ВЧ-методом необходимо учитывать влияние наполнителя на коэффициент диэлектрических потерь КМ, УЗ-методом – на упругие характеристики КМ, излучением – на способность материала поглощать ИК, световое или лазерное излучение. Введение электропроводящего наполнителя позволяет применять по отношению к ТКМ методы сварки, неизвестные в технологии сварки ненаполненных полимеров. Так, слоистые термопластичные графитопласты можно сварить методом, близким по своей сущности к методу контактной сварки металлов. Без промежуточных слоев или вкладышей, необходимых при сварке термопластов, ненаполненных или содержащих неэлектропроводящий наполнитель, можно сваривать графитопласты закладным элементом при индукционном нагреве.

Сопоставляя ТКМ на основе различных армирующих материалов (тканых, нетканых и нитепрошивных), установили, что армирующая основа, выполненная в виде сетки, с точки зрения свариваемости предпочтительнее других видов армировок, причем с увеличением вязкости расплава матрицы размеры ячеек армирующей ткани должны быть увеличены. Так, при вязкости расплава полимерной матрицы от 10^3 Па · с и выше размеры ячеек сетки должны быть не менее 3 мм. Соблюдая такие рекомендации, получают материал с достаточно высоким значением межслоевой прочности и, как следствие, с высокой прочностью сварного соединения. Более высокую прочность сварного соединения при расслаивании обеспечивает гибридизация наполнителя в армированных пленочных материалах на основе ПВХ, проведенная таким образом, чтобы наружный слой хлопковокапроновых нитей в армирующей ткани состоял из хлопкового волокна. Прочность сварного соединения рассматриваемого материала возрастает, как и следовало ожидать, после модифицирования ПВХ уретановым термоэластопластом, повышающим прочность сцепления покрытия с армирующей тканью. Влияние прочности сцепления матричного полимера с армирующей тканью на прочность сварного соединения обнаружили при изучении свариваемости ВЧ-методом материалов, предназначенных для автомобильных тентов. Прочность соединения при сварке пленочных фторопластов, например типа ФП-4НА, армированных тканями, повышается при использовании приемов и режимов, упрочняющих связь между слоями материала. Таким образом, общие закономерности свариваемости в расплаве различными методами характерны для широкого круга ТКМ.

Тепловая сварка по схеме "давление – температура" (см. гл. 2.3) применяется преимущественно для соединения тонкостенных деталей из ПКМ. С увеличением толщины деталей более 2 мм необходимо применять схему "температура – давление".

Для некоторых типов ТКМ эффективной может быть и химическая сварка (см. гл. 2.3). Если она осуществляется при температурах ниже температуры текучести, то можно исключить или свести к минимуму негативные изменения в матрице материала (рекристализация, деструкция и т.п.), наблюдаемые при высокотемпературном ее нагреве, и/или упрочнить связь между свариваемыми слоями.

На ТКМ могут быть распространены все виды сварки термопластов (см. гл. 2.3). Для сварки КМ на основе реактопластов эффективными оказались виды сварки, позволяющие локализовать максимальный нагрев на соединяемых поверхностях деталей.

1.11.2. СВАРКА НАГРЕТЫМ ГАЗОМ

Рассматривая возможность применения указанного вида сварки с присадочным материалом для соединения деталей из ТКМ, можно отметить как его преимущества: возможность сборки крупногабаритных конструкций сложной формы, освоенность метода и другие, так и недостатки: низкая производительность, зависимость качества соединения от квалификации сварщика. Ввиду сложности обеспечения регулярного распределения армирующих волокон в зоне шва метод мало приемлем для соединения ТКМ с короткими волокнами и не годится для ТКМ с непрерывными волокнами.

Сварку нагретым газом без присадочного материала и прямым нагревом используют в производстве слоистых конструкций из ленточного препрега на основе однонаправленного углеродного волокна и ПЭЭК. Пакет листовых образцов формируют методом выкладки (рис. 1.11.4). Локальный нагрев соединяемых слоев осуществляют с помощью промышленного сварочного аппарата, имеющего наконечник с щелевым соплом размером 50 × 1 мм. Регулируемыми параметрами процесса являются температура $T_{нв}$ нагретого воздуха, сила P прижима и скорость v_y укладки слоев препрега.

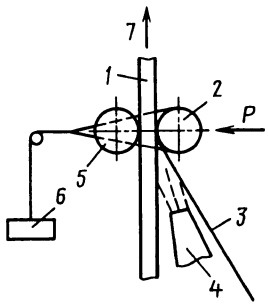


Рис. 1.11.4. Схема выкладки слоистого пластика из препрега на основе термопластичной матрицы при использовании сварки нагретым газом прямым нагревом:
1 – уложенный пакет; *2* – прижимной ролик; *3* – слой препрега, *4* – наконечник сварочного аппарата; *5* – неподвижный ролик; *6* – груз, создающий давление, *7* – направление перемещения пакета

Как следует из табл. 1.11.1, максимальная прочность ТКМ, достигнутая при сварке нагретым газом по режиму, соответствующему № 2, составляет 75 % прочности материала, сваренного между плитами пресса.

В углепластике, изготовленном по рассматриваемой схеме выкладки, образуются дефекты типа пор различной формы и скручивания углеродных волокон. Количество пор вблизи последнего уложенного слоя составляет 20 % (об. доля), в то время как в самом отдаленном от него слое поры занимают объем меньше 2 %. В пластиках, изготовленных при режимах, далеких от оптимальных, поры образуют линейные цепочки и являются следствием плохого сплавления слоев препрега. Повысить качество и увеличить толщину пластика удается путем использования аппаратуры, оснащенной средствами контроля температуры.

Сварка нагретым газом более пригодна для производства более дешевых, нежели углепластики, материалов, например на основе армированных стекловолокнами ПА. Сварку можно осуществлять как нагретым газом, так и пламенем. При использовании сварки нагретым газом намотку изделий можно осуществлять со скоростями от 0,3 м/мин (теплоноситель – нагретый воздух, углепластик на основе ПЭЭК) до 10 м/мин (теплоноситель – пламя, полиамидный стеклопластик). При предварительном подогреве укладываемого слоя и поверхности уже уложенного материала (как при сварке нагретым газом с присадочным материалом), скорость намотки может составлять 30 м/мин.

Сварка нагретым газом может применяться при сборке конструкций из ТКМ, в частности, оболочек неответственного назначения, а также при проведении ремонта машиностроительных изделий из этих материалов.

1.11.3. СВАРКА НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Для соединения ТКМ можно применять сварку нагретым инструментом как косвенным (сквозь стенку деталей), так и прямым (непосредственно соединяемых поверхностей) нагревом (см. гл. 2.3).

1.11.1. Влияние условий сварки слоев углеродного препрега с матрицей из ПЭЭК марки АРС-2 на прочность при трехточечном изгибе и характер разрушения 16-слойных образцов*

№ по пор.	$T_{нв}$, °С	P, Н	$V_у$, см/мин	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа**	Характер разрушения
1	495	100	50	24/(19...28)	Расслаивание
2	495	100	20	119 /(109...121)	Разрыв
3	495	40	20	65/(61...69)	Разрыв
4	480	40	20	47/(32...62)	Разрыв с расслаиванием
5	420	100	10	17/(16...18)	Расслаивание

*Толщина образцов 2,0. .2,5 мм, длина 50 мм, ширина 10 мм; прочность при изгибе сваренного между плитами пресса образца 164/(149...189) МПа.

**В числителе – средний, а в знаменателе – минимальный и максимальный результаты испытания четырех (№ 1, 2) и двух (№ 3 – 5) образцов

Поскольку сварка нагретым инструментом косвенным нагревом по сути своей близка к прессованию самих подвергаемых соединению ТКМ, то прочность сварного соединения во многом определяется качеством материала и, в частности, его пористостью в зоне шва. Так же, как и при прессовании хорошо пропитанных термопластами (с низкой пористостью) препрегов, можно использовать мягкие (и в части давления, и в части температуры) режимы формования. Выбор режимов сварки рассматриваемым методом зависит от степени подгонки соединяемых поверхностей.

Сварку нагретым инструментом косвенным нагревом, по данным лаборатории полимеров Лозаннской политехнической школы (Швейцария), можно применять для изготовления панелей из слоистого пластика. Однонаправленный 24-слойный углепластик на основе ПЭЭК соединяли внахлестку (длина перекрытия 30 мм), применяя прокладку из ПЭЭК толщиной 100 мкм, которая в процессе сварки утонялась до 75 мкм. На микрофотографиях зоны шва было обнаружено нарушение структуры материала (смещение волокон), наличие на границе контакта большого числа пор и дефектов. Изучив влияние продолжительности выдержки под давлением 1,4 МПа при температуре 380 °С на прочность соединения, в качестве оптимальной приняли продолжительность 5 мин. Эксперименты данной серии проводили таким образом: после фиксирования заданной выдержки (1 с, 5 и 90 мин) свариваемая панель передавалась на второй пресс, где плиты были нагреты до 200 °С, а затем охлаждалась со скоростью 50 °С/мин. Падение прочности соединения при выдержке в течение 90 мин объясняли разрушением материала. Увеличение толщины промежуточного слоя несущественно повышает прочность соединения. К тому же большой разброс показателей прочности при использовании в качестве прокладки трех слоев пленки из ПЭЭК не дает уверенности в том, что это увеличение приведет к упрочнению сварного соединения.

Как установлено, термообработка сварных соединений при температуре 250 °С в течение не более 26 ч сохраняет их прочность при сдвиге на уровне 50 МПа. Не только по прочности при 20 °С, но и по теплостойкости сварные соединения углепластика на основе ПЭЭК превосходят клеевые соединения, выполненные эпоксидным клеем (рис. 1.11.5). Сравнительные испытания на усталость при растяжении образцов нахлесточных соединений углепластика на основе ПЭЭК также показали преимущества сварных соединений перед клеевыми. Вместе с тем после 10^6 циклов испытания сварные соединения не намного превосходят по своей несущей способности клеевые соединения (рис. 1.11.6).

Опасность изменения структуры ТКМ или вообще деструкции полимера (матрицы) при использовании сварки нагретым инструментом косвенным нагревом ограничивает толщину соединяемых деталей. Так, эксперименты по сварке углепластика КТМ-У-1 на основе полисульфона и ленты ЭЛУР, проведенные в НИАТе, показали, что косвенным нагревом можно сварить материал толщиной до 2 мм. Температура сварки выше 320 °С с уменьшением толщины материала на каждые 0,5 мм снижается на 10...15 °С. Оптимальное

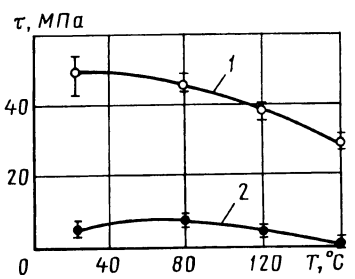


Рис. 1.11.5. Зависимость разрушающего напряжения τ при сдвиге сварного *1* и клеевого *2* соединений углепластика на основе ПЭЭК от температуры *T* испытания

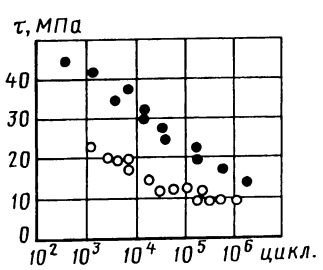


Рис. 1.11.6. Кривая "напряжение τ – число циклов *n* до разрушения" для образцов нахлесточных соединений углепластика на основе ПЭЭК марки APC2 и волокон марки IM 6, изготовленных сваркой нагретым инструментом (•) или склеиванием (о) (эпоксидный клей марки AV 118 фирмы Ciba Geigy. Образцы перед склеиванием обработаны в кислоте. Толщина образцов 2 мм, длина перекрытия 25 мм)

давление составляет 0,2...0,4 МПа. Изменение продолжительности выдержки от 60 до 90 с и более при температуре сварки не приводит к существенному росту прочности соединения. При длине перекрытия 45 мм прочность нахлесточного соединения при сдвиге близка к прочности материала при растяжении. При толщине материала 1 мм для получения равнопрочного материалу соединения внахлестку достаточно перекрытия длиной 15 мм. Как и в случае клеевых соединений, армирование свариваемых слоев под углом 0° к направлению нагружения способствует достижению максимальной прочности соединения при сдвиге. Однако имеющиеся в литературе данные о том, что наличие слоя наполнителя, ориентированного перпендикулярно к фронту роста трещины, приводит к увеличению энергии разрушения углепластика на основе ПЭЭК, указывают на необходимость оптимизации схемы армирования ТКМ в зоне шва с учетом характера нагружения соединения. Толщина слоя полисульфона на свариваемых поверхностях материала КМУ-У-1 при оптимизации по критерию "прочность соединения при сдвиге" должна составлять 30...40 мкм. При сварке соединения деталей со скошенными кромками ("на ус") между соединяемыми поверхностями прокладывают пленку из полисульфона толщиной 50 мкм. При угле скоса кромок 7° прочность при растяжении соединения материала КТМ-У-1 толщиной 2 мм равна прочности при растяжении нахлесточных соединений с длиной перекрытия 15 мм.

Прочность при сдвиге нахлесточных соединений материала КТМ-У-1 снижается с повышением температуры в интервале –50...+150 °С, если соединения подвергнуты термическому старению.

Оптимизация режимов сварки нагретым инструментом косвенным нагревом органопластика КТМ-1-1 на основе поликарбоната дала следующие результаты: температура сварки 280 °С, продолжительность выдержки при температувре сварки 30 с (подъем температуры в течение 30 с), давление 0,3 МПа. Толщина слоя термопласта на свариваемой поверхности должна составлять 20...30 мкм. При длине перекрытия 60 мм прочность при растяжении нахлесточного соединения материала КТМ-1-1 толщиной 1 мм не уступает прочности при растяжении основного материала. С увеличением толщины материала степень реализации прочности материала в соединении снижается и при толщине 2 мм и длине перекрытия 60 мм составляет 50...60 %, в то время как для материала толщиной 0,5 мм она равна 100 % при длине перекрытия уже 15 мм.

Повышение температуры испытания вызывает снижение относительной прочности ν соединения, причем, что интересно с точки зрения оценки напряженного состояния в зоне шва, в меньшей степени для соединений с большей длиной перекрытия. Так, при температуре 100 °С для сварного соединения с длиной перекрытия l = 7, 15 и 30 мм сохраняется соответственно 56, 67 и 75 % исходной ν.

При сварке нагретым инструментом косвенным нагревом полисульфонового стеклопластика была достигнута прочность при сдвиге 17...20 МПа. Но она может меняться в зависимости от структуры наполнителя, его содержания и других факторов.

Основным недостатком сварки рассматриваемым методом является перегрев внешних контактирующих с инструментом поверхностей свариваемых деталей. Для ТКМ толщиной 2 мм перепад температур между внешними и свариваемыми поверхностями составляет 30...40 °С и может еще на 10 °С возрасти с увеличением массы свариваемых деталей из теплопроводящего ТКМ, так как требуется компенсация значительного теплоотвода в околошовные зоны.

Снижению температуры сварки и, таким образом, расширению диапазона толщин свариваемых деталей способствует применение более легкоплавкого, чем основной, присадочного материала. Эффективность такого приема на примере сварки углепластика на основе ПЭЭК показана выше.

Трудности соединения больших поверхностей ТКМ при сварке косвенным нагревом, обусловленные необходимостью применения большого давления, решаются использованием более текучего, чем основной, присадочного материала, например ненаполненного (см. выше).

Так же, как по отношению ко всем термопластам, кроме тонких пленок, сварка нагретым инструментом прямым нагревом более эффективна и для образования соединения ТКМ, в том числе новых их типов.

Как следует из рис. 1.11.7, прочность соединения возрастает с увеличением продолжительности нагрева и достигает 38 МПа, что составляет 84 % прочности соединяемого ТКМ при сдвиге. Наблюдение формы образцов в

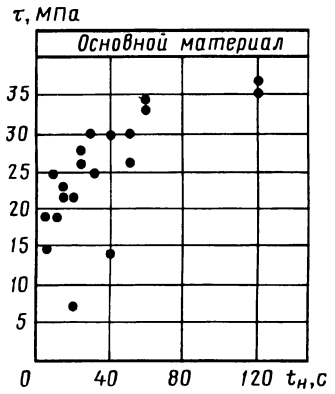


Рис. 1.11.7. Зависимость разрушающего напряжения τ при сдвиге сварного соединения 16-слойного квазиизотропного углепластика на основе ПЭЭК марки АРС-2 толщиной 2 мм от продолжительности $t_н$ нагрева при сварке нагретым инструментом прямым нагревом. Давление $p_н$ при нагреве 0,5 МПа. Давление $p_с$ при образовании соединения 1,75 МПа. Продолжительность $t_с$ выдержки соединения под давлением равна $t_н$

зоне перекрытия и поперечных срезов в зоне шва показывает, что, несмотря на небольшую толщину поверхностного слоя матрицы, даже при прямом нагреве (непосредственно соединяемых поверхностей) образуется грат, расплющивается ТКМ и изменяется ориентация армирующих волокон. Причем нарушение параллельности волокон не ограничивается только слоями, примыкающими к контактирующим поверхностям, но и захватывает объем шва в результате внедрения нагревательного элемента в ТКМ. Эти факторы и образование пустот являются причиной понижения прочности соединения по сравнению с прочностью свариваемого ТКМ. Из-за малого количества матрицы в поверхностных слоях глубина протекания процесса очистки (в результате вытеснения дефектных слоев) ограничена. Это налагает повышенные требования к сохранению их чистоты в условиях хранения перед сваркой.

При сварке новых видов ТКМ специфичен этап охлаждения. Высокая скорость охлаждения ПЭЭК приводит к резкому уменьшению размеров кристаллических образований и, как следствие, к снижению механических свойств и химической стойкости материала шва. Нежелательна и повышенная степень кристалличности. В любом случае на этом этапе сварки необходимо применять контролируемое охлаждение и последующую термообработку сварного изделия. Чтобы предотвратить коробление и расслоение материала в зоне шва, давление прижима свариваемых поверхностей должно сохраняться как можно дольше.

По данным специалистов из ИЭС им. Е.О. Патона (г. Киев), при сварке стеклонаполненного термопласта серьезную проблему может представлять налипание полимерной матрицы на нагревательный инструмент, что приводит к обогащению содержания волокон на соединяемых кромках и в результате этого к ухудшению условий для прочного взаимодействия поверхностей. Обнажившиеся стеклянные волокна могут в этом случае рассматриваться как своего рода дискретные загрязнения на свариваемых поверхностях. В связи с этим более предпочтительной, нежели сварка нагретым инструментом прямым нагревом, является сварка при бесконтактном методе нагрева, например ИК-излучателем.

Сварку нагретым инструментом прямым нагревом можно использовать, как и другие методы сварки, для получения многослойных ТКМ, добиваясь по возможности реализации свойств слоев. Так, режим сварки: температура нагретого инструмента 220 °С, продолжительность нагрева 2 с, давление при образовании соединения 3 МПа вызывает потерю лишь 10 % прочности слоев самоармированного ПП.

1.11.4. СВАРКА ЗАКЛАДНЫМ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Возможность ограничить зону нагрева соединяемыми участками и довести таким образом к минимуму изменения структуры материала в зоне шва обеспечивает рассматриваемый способ сварки (см. гл. 2.3) при образовании соединения ТКМ.

Исследователи опробовали и рекомендуют для образования соединения деталей из ТКМ обе разновидности метода: терморезисторную сварку и индукционную сварку.

При терморезисторной сварке ТКМ между соединяемыми поверхностями помещают в общем случае такие же резистивные элементы, что и при сварке пластмасс.

В целом процесс сварки закладным нагревательным элементом (ЗНЭ) ТКМ включает те же три основных этапа, что и при сварке вообще деталей из ПМ (см. гл. 2.3).

Зависимость безразмерных толщины расплавленного слоя и глубины проплавления от безразмерного времени (см. гл. 2.3) дают возможность находить параметры сварки, предотвращающие дезориентацию армирующих волокон, прилегающих к сварному шву.

Если на поверхности ТКМ полимерная матрица имеет небольшую толщину, дополнительно вводят пленку из матричного полимера толщиной около 0,20...0,25 мм. ЗНЭ не только способствует локализации нагрева, но и дополнительно армирует шов.

На выбор ЗНЭ влияют форма и размер свариваемых поверхностей, тип свариваемого материала и другие факторы. В НИАТе при сварке полисульфонового углепластика КТМ-У-1 толщиной 5 мм был применен набор ленточных нагревателей толщиной 0,1 мм и шириной 2 мм и получена прочность соединения при сдвиге 18...20 МПа. При использовании нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм плавление матрицы ТКМ в зоне сварного шва наблюдается на расстоянии лишь около 1 мм от проволоки. В связи с этим для получения нахлесточного сварного соединения с длиной перекрытия 5 мм при сборке элементов вентиляционных воздуховодов из поликапроамидного органопластика ПАП-Ф, изготовленных методом волоконной технологии ваккумным формованием, требовалось применение как минимум двух проволок. Укладка же последних на заданном расстоянии друг от друга на одной из свариваемых поверхностей, имеющих криволинейную форму, вызывает значительные трудности. Поэтому более эффективным ЗНЭ в данном случае является металлическая тканая сетка (ГОСТ 3826–82) из коррозионно-стойкой стали (диаметр проволоки 0,25 мм, размеры ячейки 0,63 × 0,63 мм) в виде полоски шириной 5 мм. При длине перекрытия 5 мм в нахлесточном соединении при нагружении последнего обеспечивается преимущественное разрушение сварного соединения по месту шва, а не по основному материалу, что позволяет оптимизировать параметры режима сварки. Давление прижима деталей можно создавать с помощью упругих элементов, полученных из разрезанных по образующей трубок. Температурой в зоне сварки можно управлять, не только регулируя силу тока в ЗНЭ, но и изменяя ширину сетки.

Введение в зону сварки дополнительных слоев из термопласта, аналогичного свариваемому, позволяет повысить прочность соединения и снизить давление при сварке.

Вместе с тем некоторые авторы считают, что металлические ЗНЭ, оставаясь в шве, играют роль чужеродных по отношению к углепластикам элементов и ведут к снижению прочности соединения. В связи с этим в большей степени пригодна для соединения углепластиков терморезисторная сварка (рис. 1.11.8), при которой в качестве резистивного элемента используют жгут или ленту из углеродных волокон (сопротивление которых 1 Ом · см) обычно вместе с тонким слоем из матрицы соединяемого ТКМ или из полимера, совместимого с матрицей (лента типа Thermabond, см. выше). Толщина δ слоев *1 – 4* на рис. 1.11.8 может составлять соответственно $\delta_1 = 0{,}125$, $\delta_2 = 0{,}2$, $\delta_3 = 2$ и $\delta_4 = 20$ мм. Именно сочетание углеродной ленты с полимерным слоем позволяет получить максимальную для данного способа сварки прочность соединения. Электропроводимость полимера на углеродном жгуте можно повысить, вводя в него технический углерод или частички металла.

На свариваемость ТКМ закладным нагревательным элементом, как и при других видах сварки, влияет состояние свариваемых поверхностей. Так, прочность при сдвиге соединения образцов, отформованных при контакте с оснасткой, обработанной кремнийорганической смазкой, на 5 МПа ниже прочности соединения образцов, отформованных при контакте с фторопластовой пленкой.

Математическую модель процесса терморезисторной сварки слоистых ТКМ с помощью ЗНЭ из углепластика предложили итальянские исследователи. Модель учитывает тепловыделение в прослойке ленты из углеродного препрега между листами углепластика на

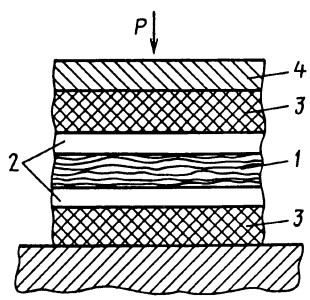


Рис. 1.11.8. Типовая схема размещения слоев материалов и оснастки при терморезисторной сварке ТКМ:
1 – однослойный нагреватель из углеродной ленты; *2* – слой полимера; *3* – свариваемый ТКМ; *4* – прижим

основе ПЭЭК в результате резистивного нагрева и фазовые превращения полимерной матрицы, а также позволяет прогнозировать изменение степени кристалличности матрицы ТКМ в зоне шва в зависимости от схемы соединения (применение прижимных металлических элементов или элементов из теплоизоляционных материалов (см. рис. 1.11.8)) и режимов сварки. При экспериментальной проверке модели силу тока регулировали от 6,5 до 15 А при напряжении 30 В. В случае прижима соединяемых участков металлическими элементами для достижения температуры, близкой к 400 °С, требуется увеличение силы тока и продолжительности нагрева (рис. 1.11.9 и рис. 1.11.10). Модель можно усовершенствовать, устанавливая зависимость между параметрами режима сварки и показателями механических свойств сварных соединений.

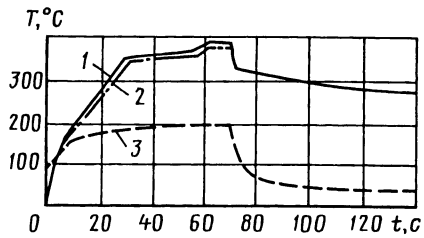


Рис. 1.11.9. Изменение температуры *T* в центре препрега (*1*, *3*) и в точке между препрегом и соединяемым образцом (*2*) в процессе резистивного нагрева при силе тока 6,5 А в течение 70 с и последующего охлаждения под давлением. Прижимной элемент из асбеста (*1*, *2*) и стали (*3*)

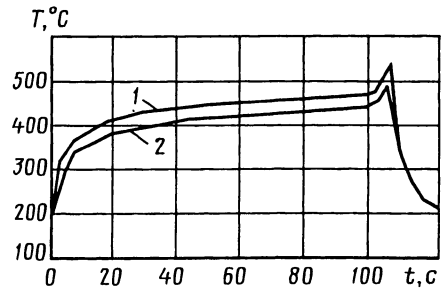


Рис. 1.11.10. Изменение температуры *T* в центре препрега (*1*) и в точке между препрегом и соединяемым образцом (*2*) в процессе резистивного нагрева при силе тока 9,5 А в течение 106 с и охлаждения под давлением. Прижимной элемент из стали

Терморезисторная сварка с использованием углеродного ЗНЭ в целом характеризуется как простой высокопроизводительный процесс (время сварки до 20 с, а вся продолжительность сборки – несколько минут), не требующий трудоемкой подготовки соединяемых поверхностей. Прочность при сдвиге соединения квазиизотропного 25-слойного графитопласта на основе ПЭЭК толщиной 3,18 мм равна 23,88 МПа (коэффициент вариации 44,7 %). Вместе с тем прочность соединения при сдвиге может достигать 39 МПа (70 % прочности материала). Метод может быть использован для сборки изделий из крупногабаритных деталей сложной формы, например бамперов автомобилей, средств транспорта с электроприводом и корпусов плавучих средств, кожухов приборов. Сварка с помощью промежуточного слоя из углепластика на основе ПЭЭК предложена для выполнения ремонта элементов самолетов.

Наибольшую проблему представляет воспроизводимость режимов нагрева, на которую влияет качество электрического контакта между углеродным жгутом и токоподводом. С присоединяемых к электродам концов ленты препрега матрица должна быть удалена. Концы препрега можно помещать в ванночки жидкого металла (сплава Вуда). Места токоподвода размещают также между медными пластинами. Нанесение покрытия, содержащего 45 % серебра, на оголенные от матрицы концы углеродной ленты препрега обеспечивает контактное сопротивление, равное 4 % общего сопротивления закладного нагревательного элемента. Но этот метод считают неэкономичным для промышленного применения.

Рассматриваемый метод не лишен недостатков. Так, резка полоски углеродного препрега закладного элемента необходимой ширины (соответствующей длине перекрытия) связана, как правило, с перерезанием части углеродных нитей, что приводит к изменению электрического сопротивления по длине закладного элемента и к неравномерному выделению теплоты по длине сварного шва. Из-за высокой жесткости углеродного препрега возникают трудности при его выкладке и фиксации по длине сварного шва.

Энергетические и тепловые характеристики процесса терморезисторной сварки детально исследованы в Институте композиционных материалов Университета Кайзерлаутерна (Германия). Объектами исследования

служили пластинки из полипропиленового углепластика длиной 128 мм и шириной 22 мм, полученные нарезкой из плиты, отпрессованной при температуре 180 ± 1 °С и давлении 5 МПа в течение 5 мин после 15 мин предварительного нагрева препрега марки PLYTRON фирмы ICI, Wilton (Великобритания) на основе однонаправленного углеродного волокна марки AS 4 с объемной долей последнего 20 %. Соединению подвергали 4-слоиный и 5-слойный образцы друг с другом, прокладывая между ними нагревательный элемент из однослойного препрега той же марки толщиной 0,3 мм, длиной 190 мм и шириной 22 мм с оголенными обоими концами на длине 25 мм. Таким образом после сварки получали 10-слойные образцы. В процессе экспериментов не потребовалась сложная сварочная установка. Для создания надежного контакта латунных токоподводов с углеродной лентой применили болтовое соединение. Длина зажимаемого участка ленты составляла 20 мм. Контактное сопротивление между зажимами и углеродными волокнами составляло 8 % общего сопротивления ЗНЭ. Поскольку объемная доля наполнителя в препреге была всего 20 %, то количество полимера в зоне сварки было достаточно и дополнительного введения пленки из полипропилена не требовалось. При постоянстве толщины препрега и объемной доле наполнителя в нем электросопротивление R линейно изменяется с увеличением длины L и величины, обратной ширине B ленты препрега. По наклону кривых $R = f(L)$ и $R = f(1/B)$ было определено удельное электросопротивление $\rho = 0{,}276$ Ω/мм^2 ленты на основе углеродного волокна марки AS 4 и ПП, которое связано с электросопротивлением ленты препрега соотношением

$$R = \rho L/B.$$

Электрическая мощность P и подводимая энергия E, отнесенные к единице площади сварного шва, являются важными параметрами процесса терморезисторной сварки:

$$P = I^2R/LB; \qquad E = Pt.$$

Здесь I – сила тока, проходящего по закладному нагревательному элементу, А; t – продолжительность сварки, с.

Теплота, генерируемая в ЗНЭ, не только полезно тратится на нагрев и плавление полимера в зоне шва, но и теряется в результате теплопроводности в массу детали, а также конвекции и радиации в окружающую среду. Чем продолжительнее сварка t, тем больше потери теплоты. При мощности ниже 100 кВт/м^2 время достижения температуры плавления становится таким долгим (рис. 1.11.11), что образец сам размягчается. При этом большая часть энергии теряется на нагрев массы образца и окружающей среды. При высокой мощности время нагрева может быть значительно сокращено. Однако при слишком высокой мощности (около 200 кВт/м^2) полимер может сгореть и образоваться оксидная пленка на поверхности волокна, которая снижает эффективность контактного соединения и увеличивает сопротивление ЗНЭ.

Подвод энергии в количестве, достаточном для плавления полимера (рис. 1.11.12), еще не обеспечивает сварки по всей поверхности контакта образцов. Чтобы сварка произошла,

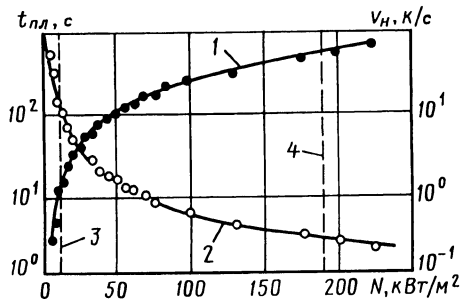


Рис. 1.11.11. Влияние электрической мощности N на скорость нагрева $v_н$ (*1*) и время $t_{пл}$ (*2*) достижения температуры плавления полимера в центральной точке образца:
3 – нижний предел мощности;
4 – верхний предел мощности

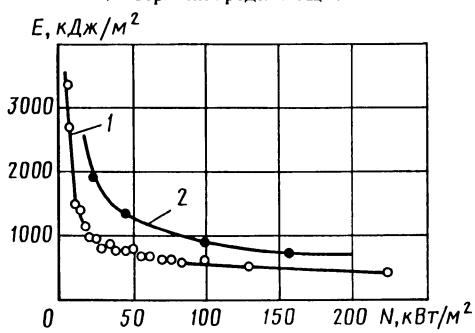


Рис. 1.11.12. Зависимость энергии E, необходимой для плавления полимера в центре образца (*1*), и энергии, необходимой для сварки (*2*), от мощности нагрева P

необходимо увеличить мощность или продолжительность нагрева. Кривая *2* на рис. 1.11.12 построена на основе экспериментов по изучению характера разрушения образцов при фиксировании момента, когда разрушение происходит по всей ожидаемой площади контакта образцов. Было выделено три уровня мощности: низкий (от 10 до 75 кВт/м^2), средний (от 75 до 130 кВт/м^2) и высокий (от 130 кВт/ м^2 и выше).

Так как наибольшая потеря мощности имеет место в зоне контакта зажимов с образцами, процесс плавления начинается в первую очередь на концах последних, а затем распространяется в середину по причине лучшей ее изоляции от окружающей среды.

Когда полимерная матрица плавится, запасенная в волокнах упругая энергия может привести к короблению и расслоению ТКМ. Поэтому к свариваемым деталям прикладывают давление, чтобы исключить во время сварки указанные явления. Эксперименты по изучению влияния давления на вязкость разрушения сварного соединения показали (рис. 1.11.13), что слабое соединение может образоваться как при низком, так и при высоком давлении. В первом случае усилия прижима недостаточно, чтобы подавлять упругие деформации волокон и удалять воздушные пузырьки из зоны контакта. При слишком высоком начальном давлении наблюдается значительное течение матрицы в поперечном направлении и смещение волокон в плоскости соединения, что и сказывается на качестве последнего. Оптимальное давление при сварке полипропиленового углепластика составляет 0,1...0,15 МПа.

С увеличением продолжительности сварки (или количества подводимой энергии) растет площадь, по которой происходит разрушение соединения. Достаточно прочное соединение образуется при уровне мощности выше 45 кВт/м^2. Однако максимум G_{Ic} (458 Дж/м^2) сварных образцов составляет 68 % G_{Ic} прессованных образцов.

Терморезисторная сварка успешно применяется для соединения металла, покрытого полимерным метериалом, с углепластиком. Специалисты из Института сварки (г. Кэмбридж, Англия) назвали метод имплантатной сваркой. В процессе сварки металла с углепластиком на основе ПЭЭК участвует несколько разнородных слоев полимеров: слой из полиэфиримида на поверхности углепластика, проводящий электрический ток, слой из препрега

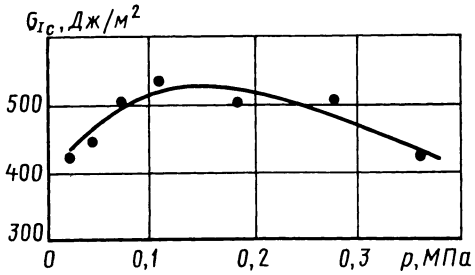


Рис. 1.11.13. Зависимость межслоевой вязкости G_{Ic} разрушения образцов сварного соединения полипропиленового углепластика в виде двойной консольной балки от начального давления *p* при терморезисторной сварке. Электрическая мощность 43 кВт/м^2, подводимая энергия 1350 кДж/м^2

на основе ПЭЭК и однонаправленных углеродных волокон, пленка из полиэфирсульфона, обращенная в сторону покрытия на алюминиевом сплаве.

При индукционной сварке ТКМ между соединяемыми поверхностями укладывают элемент, нагреваемый в электромагнитном поле, которое создается индукционной катушкой или магнитным тороидом. В экспериментах с углепластиком типа АРС-2 использовали источник энергии, работающий на частоте 2 МГц, и 11-витковую катушку индуктора с внутренним диаметром 50 мм и длиной 110 мм. В качестве закладного элемента была применена серебряная проволока толщиной 1 мкм, навиваемая на один из концов пластинчатых образцов. Первоначально навивка производилась на один из образцов. В этом случае образец с навитой проволокой излишне нагревался, в то время как второй, без проволоки, – недостаточно. Поэтому решено было навивать проволоку на оба образца, но прочность соединения при сдвиге составила 5 МПа (11 % прочности основного материала). Она возрастала с увеличением продолжительности нагрева. Однако полного сплавления поверхностей не достигли. Края образцов нагревались сильнее. Был сделан вывод о неоптимальной конструкции используемого индуктора. Применив при сварке графитопластов на основе ПЭЭК и ПЭИ тороидный магнит, получили прочность соединения при сдвиге, равную соответственно 38,0 и 35,2 МПа, в то время как прочность клеевых соединений этих материалов составляла 31,1 и 27,6 МПа. Предпринимались попытки провести индукционную сварку без

закладного элемента. При частоте колебаний 500 кГц нагреть углепластик не удалось. Введение в зону шва закладного элемента в виде углеродной ленты при сварке углепластика может быть оправдано лишь при обеспечении концентрации тепловыделения в этом элементе. Сваривая углепластик на основе ПЭЭК при использовании закладного элемента в виде препрега на основе углеродных волокон с никелевым покрытием, получили за 105 с при мощности, потребляемой индуктором, 2 кВт и давлении 0,7 МПа соединение, прочность которого при сдвиге равна приблизительно 50 % прочности ТКМ. Применив прокладку из препрега на основе ПА-12 и углеродного волокна при индукционной сварке стеклопластика на основе ПА-12, достигли прочности соединения при сдвиге 25 МПа (80 % прочности при сдвиге соединяемого материала), в то время как при использовании металлической ткани на основе хромоникелевой стали с матрицей из ПА-12 эта прочность составила 13,5 МПа.

Концентрировать тепловыделение в зоне шва можно, как вообще при сварке пластмасс или их склеивании, наполняя полимер промежуточного слоя ферромагнитными частицами. С помощью такого ЗНЭ осуществлена индукционная сварка ТКМ с матрицей из полифениленсульфида.

Хотя процесс индукционной сварки сложный, требует применения более дорогого, чем при терморезисторной сварке, оборудования, метод можно считать пригодным для серийного производства машиностроительных изделий из ТКМ, например, из тонких длинных профилей. В качестве преимуществ метода отмечают компактность оборудования и возможность образования соединений по большой поверхности. Однако последнее отвергают исследователи – представители фирмы ICI Composite Structures из-за сложности контроля за процессом нагрева большой поверхности.

1.11.5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвуковая (УЗ) сварка уже давно применяется при сборке различных изделий из наполненных термопластов, в частности полиамида и поликарбоната, наполненных стекловолокном (объемная доля до 30 %). Поэтому при решении проблем сборки изделий из ТКМ нового поколения исследователи свои надежды связывают и с УЗ-сваркой, к преимуществам которой можно отнести в первую очередь локальность нагрева, высокую скорость образования соединения и возможность автоматизации. Сравнивая терморезисторную, индукционную и УЗ-сварку, подчеркивают такие преимущества последней, как возможность получения более прочного соединения ТКМ и большую производственную гибкость.

В большинстве работ, где изучалась свариваемость ультразвуком, влияние на последнюю наполнения термопластов рассматривалось с позиций способности материала передавать механические колебания и течь в зоне контакта поверхностей.

Если наполнение ведет к повышению модуля упругости полимерного материала при сохранении способности поверхностного слоя хорошо размягчаться и течь, то свариваемость должна улучшаться, поскольку жесткие пластмассы лучше передают энергию механических колебаний к месту соединения. Показано, что введение в термопласт наполнителя типа стекловолокна в количестве, меньшем или равном 10 %, улучшает его свариваемость. Известно также, что наполнение ПА стекловолокном (массовая доля до 30 %) переводит его из группы условно сваривающихся УЗ в группу хорошо сваривающихся. Однако прочность соединения не достигает прочности материала. За счет увеличения жесткости термопласта при введении наполнителя зафиксировано улучшение свариваемости в дальнем поле (передаточная УЗ-сварка). При большом содержании наполнителя требуется изменение и усложнение конструкции УЗ-головки в связи с интенсивным износом инструмента в процессе сварки. Кроме того, констатировано, что при массовой доле стекловолокнистого наполнителя 35...40 % количество полимера может быть недостаточным для образования качественного шва. По данным фирмы Branson Sonic Power Co (США), возникают проблемы при попытке сварить ТКМ с массовой долей армирующих волокон более 40 %. Современные ТКМ содержат до 60 % волокнистого наполнителя. Первые опыты по их сварке не привели к получению прочного соединения.

Принимая во внимание положительные результаты УЗ-сварки наполненного полимерного материала с ненаполненным, улучшение свариваемости ТКМ следует ожидать при введении в зону контакта соединяемых поверхностей присадочного материала из ненаполненного термопласта. Эффективность такого решения показана на примере сварки углепла-

стика на основе ПЭЭК. Свариваемость последнего ультразвуком улучшается при использовании в качестве присадочного материала вместо ПЭЭК прокладок из ПЭИ.

Анализ литературных данных показывает, что по отношению к наполненным термопластам могут быть применены практически все разновидности УЗ-сварки.

В области УЗ-сварки термопластов в предыдущие годы проведен ряд фундаментальных исследований как в республиках, бывших в составе СССР, так и за их пределами. Между тем распространение ТКМ послужило толчком новой серии серьезных работ и обобщению накопленного опыта.

Специалисты из департамента Welding Engineering университета Ohio State Univ., Columbus и департамента Mechanical Engineering института Massachusets Inst. of Technology Cambridge (США), считая УЗ-сварку сложным процессом, выделяют в ней следующие субпроцессы: 1) механическое нагружение и колебания деталей; 2) нагрев термопласта в условиях вязкоупругости; 3) передачу теплоты; 4) течение и смачивание; 5) межмолекулярную диффузию. Механическое нагружение (статическим усилием) и колебания влияют на напряженное состояние в деталях, от которого, в свою очередь, зависит тепловыделение. Как и вообще при УЗ-сварке пластмасс, для получения качественного соединения ТКМ за короткое время необходимо создать условия для концентрации УЗ-энергии в зоне соединяемых поверхностей. Кроме того, необходимо обеспечить свободную посадку, не препятствующую перемещению соединяемых участков деталей относительно друг друга. При сварке жестких ТКМ на основе однонаправленных волокон без подготовки поверхностей есть опасность разрыва волокон под влиянием прикладываемого высокого давления. Видимо, и по этой причине сварка по плоским поверхностям листового квазиизотропного углепластика типа АРС-2 с помощью УЗ-инструмента с плоской рабочей поверхностью (амплитуда 40 мкм, продолжительность 1,0...2,5 с, давление 1...2 МПа) позволила достичь прочности при сдвиге не выше 5 МПа (11 % прочности основного материала). Кроме того, УЗ-сварка по плоским поверхностям, как и сварка ненаполненных термопластов, не обеспечивает воспроизводимости показателей качества швов.

При изучении свариваемости ультразвуком листовых ТКМ, полученных по методу волоконной технологии, без создания концентратора энергии потребовалось фиксировать осадку деталей в определенном интервале, оптимальные значения которого устанавливались экспериментальным путем. Исходя из особенностей такой сварки сделан вывод, что процесс предпочтительнее вести при меньшем давлении прижима и большей амплитуде колебаний.

Если свариваемые детали изготовляют литьем под давлением, то концентрированию тепловыделения на соединяемых участках способствует оформление треугольного или прямоугольного выступа, преимущественно по всей длине шва. Треугольный выступ при УЗ-сварке ТКМ с углеродными волокнами имеет высоту 0,4...0,8 мм и основание 1 мм. Теоретическое исследование процесса сварки углепластика на основе ПЭЭК при наличии на одной из деталей концентратора энергии провели указанные специалисты из США. Моделирование и расчеты с привлечением метода конечных элементов дали возможность объяснить процесс нагрева и плавления. Оказалось, что плавление, в отличие от ожидаемого, в первую очередь захватывает область концентратора энергии на расстоянии 1/4 от его вершины. Из-за анизотропии ТКМ теплота передается вдоль волокон быстрее, чем в глубь ТКМ. Применив метод скоростной съемки (1000 кадров в одну секунду), они подтвердили сделанный ранее вывод, что УЗ-сварка в большей степени представляет собой ступенчатый процесс, нежели непрерывный, о чем говорят данные по измерению зазора между соединяемыми поверхностями (рис. 1.11.14).

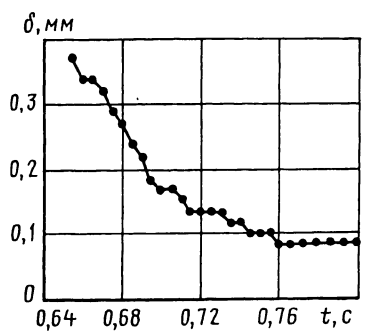


Рис. 1.11.14. Уменьшение зазора δ между соединяемыми поверхностями углепластика на основе ПЭЭК в процессе УЗ-сварки при наличии на верхнем образце концентратора энергии треугольного сечения высотой 0,5 мм и основанием 1 мм

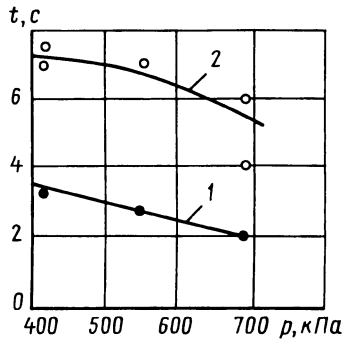


Рис. 1.11.15. Зависимость продолжительности *t* УЗ-сварки углепластика на основе ПЭЭК (размер образцов 2,3 × 2,3 × 0,13 см) от давления *p* сжатого воздуха в пневмоцилиндре установки. Концентратор энергии оформлен на верхнем образце:
1 – расчетная кривая; *2* – экспериментальная

Ход кривой на этом рисунке объясняют многократным повторением поочередно протекающих процессов: плавления, течения расплава, охлаждения материала, его затвердевания, плавления и т.д.

Для ТКМ на основе тугоплавких частично кристаллических полимеров типа ПЭЭК требуется большая мощность, чтобы перевести материал в вязкотекучее состояние, поэтому усилители (бустеры, трансформаторы упругих колебаний) с коэффициентами k_y усиления амплитуды 1:1, 1:1,5 и 1:2 не позволили получить на установке фирмы Branson (мод. 8800) качественных соединений. Используя бустер с k_y =1:2,5 (амплитуда колебаний рабочего конца инструмента 28 мкм) и прикладывая давление выше 414 кПа, удалось достичь качественной сварки.

Продолжительность сварки не является точной функцией параметров УЗ-установки, а зависит от толщины свариваемых деталей. Детали с большим разбросом толщины требуют длительной сварки, чтобы обеспечить течение расплава из зоны более толстого участка к более тонкому. Отличие расчетных данных от экспериментальных при определении зависимости продолжительности сварки от статического давления (рис. 1.11.15) указывает на несовершенство предлагаемых в теоретических исследованиях моделей и на неточность принимаемых допущений, хотя расчетная кривая имеет ту же тенденцию, что и экспериментальная.

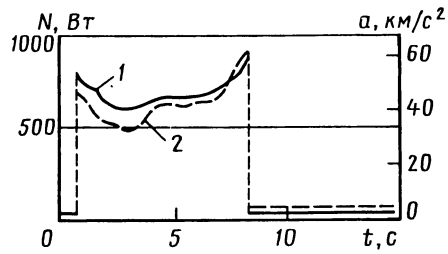


Рис. 1.11.16. Изменение рассеянной мощности *N* (*1*) и ускорения *a* (*2*) опоры в процессе УЗ-сварки углепластика на основе ПЭЭК. Установка фирмы Branson (мод. 8800). Давление сжатого воздуха в пневмоцилиндре 550 кПа, бустер с коэффициентом усиления 1:2,5

Как и при сварке ненаполненных термопластов, по изменению мощности, поглощенной материалом (рис. 1.11.16, кривая *1*), и ускорения опоры-фиксатора деталей (рис. 1.11.16, кривая *2*) можно судить об окончании процесса УЗ-сварки ТКМ.

В случае использования для конструкции, собираемой с помощью УЗ-сварки, листовых элементов из ТКМ (особенно на основе непрерывных волокон) оформить концентратор энергии очень трудно. Свариваемость указанных материалов пытались улучшить при введении между соединяемыми поверхностями в качестве концентратора энергии металлической проволоки или сетки.

Более или менее освоенной является технология, при которой для локализации тепловыделения и формирования бездефектного контакта поверхностей используют промежуточные фасонные полимерные вставки или слои. Промежуточные слои толщиной 0,6 мм, представляющие собой химически модифицированный ПП с различным индексом расплава или его смесь с ПП, к которому привит малеиновый ангидрид (масс. доля 5 %), и имеющие, очевидно, лучшую текучесть, чем основной материал, применили при УЗ-сварке самоармированного ПП. Для соединения его с листами алюминия на образцы из последнего, подвергнутые фосфорному анодированию, прессовым методом приформовывают слой ПП толщиной 0,3 мм.

К аналогичному решению проблемы получения качественного соединения с помощью промежуточных вставок прибегают и при УЗ-сварке новейших видов углепластиков с высоким содержанием наполнителя, например

на основе ПЭЭК. Так, образцы из квазиизотропного 6-слойного материала размером 15 × 40 мм сваривают внахлестку точечным швом на установке мощностью 400 Вт, размещая между соединяемыми поверхностями кубик из чистого ПЭЭК массой 0,02 г. Прижим образцов обеспечивает прочное удержание кубика. С использованием метода математического планирования эксперимента (метода стандартного трехвариационного куба Бокса-Бенкина) на основании 15 опытов с варьированием комбинаций трех важнейших параметров (давления p, продолжительности t выдержки под давлением и амплитуды A колебаний) установлено, что наиболее значимой является комбинация $p - A$, причем во всех случаях комбинация параметров влияет на прочность в большей мере, чем отдельный параметр. На основании экспериментов можно сделать вывод об области оптимальных режимов УЗ-сварки углепластика типа АРС-2: $A \geq 12$ мкм, $p = 0{,}7...1{,}5$ МПа, $t \geq 8$ с. Разрушение соединений по основному материалу затрудняет получение точных данных о максимально достижимой прочности. У наиболее прочных швов она составляет 35 МПа (80 % прочности материала при сдвиге), в то время как прочность при растяжении основного материала равна 4,2 ГПа. Наиболее слабыми участками, как можно судить по увеличенным снимкам разрушенных образцов, являются места дезориентации волокон.

Наряду с расплющиванием материала в области шва при УЗ-сварке слоистых ТКМ проблемой является межслоевое разрушение материала. Минимизировать расслоения при сварке графитопласта на основе полифенилсульфида можно применением дополнительного прижима ТКМ в околошовной зоне.

В исследованиях по оптимизации режимов УЗ-сварки преимущественно использовались образцы простой формы: пластины, стержни, реже трубки. Полученные на простых образцах зависимости затем трудно сразу перенести на случаи сварки фасонных деталей, имеющих сужения сечения, уступы, криволинейные поверхности. Для каждого такого случая параметры режима должны заново оптимизироваться. В связи с желанием ускорить поиск оптимальных режимов УЗ-сварки фасонных деталей, в том числе из армированных волокнами термопластов, стали применять образцы цилиндрической формы с внутренним диаметром 25 мм и высотой 30 мм. При этом решающим для получения качественного соединения также является выбор оптимальной комбинации параметров (A, P и t), которая обеспечивает передачу от волновода к соединяемым участкам необходимой для осуществления процесса сварки энергии в течение экономически оправданного времени.

Чтобы сделать выбор, пользовались так называемыми полями рабочих параметров. Рабочее поле всегда изображается с помощью двух диаграмм, на которых отражены зависимости t и P от A. Для нахождения полной комбинации параметров необходимы обе диаграммы, на которых указаны несколько диапазонов. Каждый диапазон обеспечивает различный уровень качества швов. Например, на рис. 1.11.17 сплошные линии очерчивают диапазон параметров, при которых могут быть получены удовлетворительные по качеству швы. Внутри этого поля находятся параметры, позволяющие изготовить швы с разрушающей нагрузкой более 60 % максимальной величины, а комбинация параметров, отмеченная кружком, обеспечивает шов с максимальной для данного материала и схемы соединения прочностью.

Параметры режимов УЗ-сварки цилиндрических образцов из наполненного стекловолокном (масс. доля 30 %) поликарбоната (ПК), обеспечивающие максимальную разрушающую силу $F_р$ соединения при растяжении, зависят от способа сварки и схемы соединения (табл. 1.11.2).

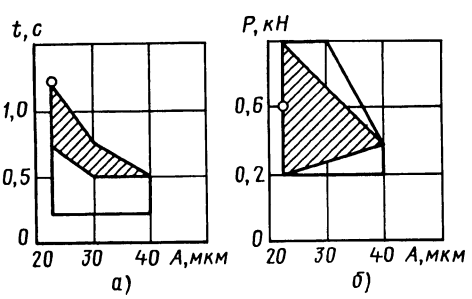


Рис. 1.11.17. Поля рабочих параметров (продолжительности t, амплитуды A и силы P) при УЗ-сварке в ближнем поле ПК, наполненного стекловолокном (массовая доля 30 %), при оформлении на верхнем образце концентратора энергии высотой 0,3 мм

1.11.2. Оптимальные режимы УЗ-сварки фасонных образцов по различным схемам

Способ сварки	Схема соединения	A, мкм	t, с	Усилие прижима, Н	F_p, Н
В ближнем поле	По плоскостям с концентратором энергии	23	1,2	600	3190
	Прессово-сварная	50	0,5	800	1900
В дальнем поле	По плоскостям с концентратором энергии	33	0,2	400	2430
	Прессово-сварная	45	0,2	400	3370

При сварке ТКМ на основе тугоплавких частично кристаллических полимеров типа ПЭЭК необходимы установки с повышенной мощностью. Коэффициент усиления амплитуды в таких установках доходит до 1:2,5.

По мнению специалистов из Института сварки Великобритании, возможности УЗ-сварки ТКМ ограничивают недостаточная мощность сварочных установок для сборки по большим поверхностям, а также сложность устройства и высокая стоимость сварочных установок с несколькими акустическими узлами, которые позволяют выполнять соединения крупногабаритных деталей.

Однако и технологи, и разработчики оборудования уделяют большое внимание УЗ-методу, применяя его, например, для присоединения точками или протяженными узкими швами ворсового нетканого декоративного покрытия из плавких волокон к обшивке из ТКМ, входящей в состав трехслойной панели, в родственной сварке технологии – технологии резки заготовок из ПКМ. Роботизированная технология позволяет добиться точности резания несколько десятых долей мм. УЗ-резка (частота колебаний 20...40 кГц) совершенно безопасна для роботов, так как частота собственных колебаний руки робота равна всего несколько Гц.

1.11.6. СВАРКА ТРЕНИЕМ

Общеизвестные преимущества сварки трением (см. гл. 2.4), естественно, должны были обратить на нее внимание специалистов, занятых производством изделий из ТКМ.

Одно из этих преимуществ – локализация нагрева в месте соединяемых поверхностей, которая способствует высокой производительности процесса образования соединения. Кроме этого, отмечают высокое качество получаемых соединений, простоту и воспроизводимость параметров процесса. Для многих случаев применения требуется незначительная подготовка к сварке.

По отношению к наполненным короткими волокнами термопластам могут быть использованы все известные разновидности сварки трением. Режимы ротационной сварки трением могут быть заимствованы из технологии сварки ненаполненных термопластов: линейная скорость вращения в пределах 1...20 м/с, давление прижима во время трения $(0{,}8...1{,}5) \cdot 10$ Па, давление во время формирования соединения $(1...3) \cdot 10^5$ Па, усредненная продолжительность сварки 2...10 с. Области применения ротационной сварки трением ограничены, так как, по крайней мере, одна из деталей должна быть круглой формы, а детали, оси которых расположены под углом, соединять невозможно.

По отношению к новым типам ТКМ в большей степени считается пригодной сварка вибротрением. Сваркой вибротрением хорошо соединяются термопласты с содержанием наполнителя до 45 %, а также ненаполненные термопласты с наполненными. В то время как при сборке изделий из ненаполненных термопластов она не вызывает особых проблем с управлением качеством соединения, со сложностями встречаются при сварке вибротрением ТКМ на основе непрерывных волокон. Вместе с тем, очевидно, справедливо считают, что сварка вибротрением ТКМ с перекрестной схемой армирования не обеспечивает высокого качества соединения из-за перерезания волокон, уложенных поперек направления колеба-

ний, и что она больше подходит для ТКМ с непрерывными армирующими волокнами, причем ориентация наполнителя должна совпадать с направлением вибрации. Как и при сварке другими методами, качество соединения улучшается при введении между соединяемыми поверхностями промежуточных слоев из чистого полимера. При сварке углепластика на основе ПЭЭК таким промежуточным слоем может быть пленка из ПЭЭК. Сваривая на установке мод. 2800 фирмы Branson при частоте колебаний 240 Гц, достигли прочности соединения при сдвиге 39,29 МПа (коэффициент вариации 7,7 %).

Прочность соединения квазиизотропного материала на основе ПЭЭК типа АРС-2 толщиной 2 мм, выполненного сваркой вибротрением, растет с увеличением продолжительности процесса в интервале 1...4 с и амплитуды колебаний. Если амплитуда колебаний менее 2...3 мм, а давление менее 1,25 МПа, то соединение отсутствует или прочность его очень низка. Работа на больших амплитудах требует точного поддержания продолжительности сварки из-за наличия некоторого разброса показателей прочности. Максимальное значение прочности при сдвиге составляет 35 % прочности основного материала. Более высокая прочность соединения достигнута с применением промежуточных слоев из ненаполненного полимера.

Проблемой и в области сварки вибротрением остается нарушение ориентации волокна, а также расслоение материала. Хорошо свариваются этим методом две малогабаритные детали или малогабаритная и крупногабаритная, причем колебаниям подвергается меньшая по массе и размерам деталь. Сварка крупногабаритных деталей с трудом автоматизируется, но затраты на оборудование не являются препятствием на пути ее распространения. Преимущества, предоставляемые данным видом сварки, способны окупить все необходимые затраты потребителя.

Для образования соединений деталей из ТКМ применяют и другие методы: сварку излучением, например, при производстве многослойных листов на основе ПЭЭК и ПЭИ, ВЧ-сварку материалов, изготовленных по волоконной технологии, комбинированную сварку излучением и нагретым газом при изготовлении

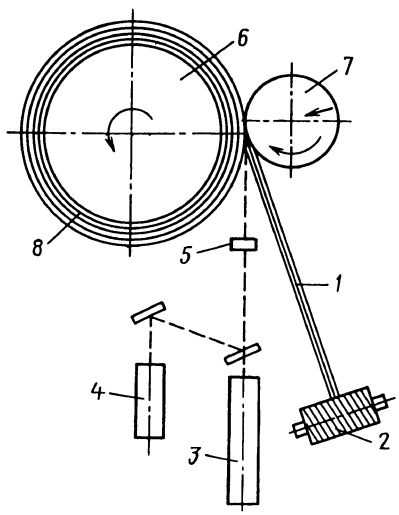


Рис. 1.11.18. Схема намотки кольцевых деталей с использованием лазерной сварки слоев препрега:
1 – лента препрега; *2* – бобина, *3* – CO_2-лазер; *4* – юстировочный лазер; *5* – фокусирующее устройство, *6* – намоточное устройство; *7* – прикаточный ролик, *8* – деталь

изделий намоткой термопластичного препрега, сварку излучением и нагретым инструментом при создании изделий из стекловолокнистых термопластичных матов. Лазерную сварку по схеме рис. 1.11.18 применили при намотке однонаправленных кольцевых деталей из полисульфонового препрега на основе углеродного жгута. Скорость намотки составляла 5...7 м/мин.

Альтернативной тепловым методом сварки может быть сварка растворителелем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров Г.В., Мацюк Л.Н., Шадрин А.А., Шестопал А.Н.** Сварка термопластичных композиционных материалов: Обзор. Киев: Изд-во ИЭС им. Е.О. Патона, 1992. 32 с.

2. **Комаров Г.В.** Способы соединения деталей из пластических масс. М.: Химия, 1979. С. 152 – 199.

3. **Словарь-справочник** по сварке и склеиванию пласмасс / Г.Н. Кораб, А.Н. Шестопал, Г.В. Комаров и др. Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1988. 160 с.

Глава 1.12

МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

В решении проблемы повышения качества выпускаемой продукции из ПКМ большая часть принадлежит методам, средствам и технологическим процессам неразрушающего контроля (НК) с использованием акустических, радиационных, тепловых, радиоволновых, оптических и других методов дефектоскопии.

Методы и средства НК предназначены для обнаружения опасных дефектов (неоднородностей) в ПКМ, деталях, узлах и изделиях из этих материалов, анализа причин их образования с целью повышения уровня технологических процессов и строгого соблюдения технологической дисциплины, а также для определения плотности и толщины стенок деталей из ПКМ.

Методы неразрушающего контроля, давно успешно применяемые при контроле металлов, часто неприменимы для ПКМ ввиду специфичности их свойств и различий во взаимодействиях с ними физических полей и излучений, применяемых в НК. ПКМ характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов структур (однонаправленная, продольно-поперечная, комбинированная и др.), специфическими физическими свойствами: тепло-, электро-, звукоизоляционными свойствами, малыми значениями плотности (0,02... 2,0 г/см^3), большим разбросом физико-механических характеристик и т.д. Практически все ПКМ являются немагнитными материалами; большинство видов ПКМ относится к диэлектрикам или плохим проводникам.

Специфичность дефектов в ПКМ также создает определенные трудности в выборе средств и разработке техпроцессов (методик) НК применительно к конкретным объектам, требованиям и условиям контроля. В ПКМ встречаются наружные и внутренние дефекты. К наружным дефектам относят: царапины и складки, липкость связующего, неровности декоративного слоя, оголение наполнителя, видимое нарушение ориентации волокна, разнотолщинность. К числу внутренних дефектов относят: расслоения и трещины, раковины, поры, инородные включения, неравномерное распределение связующего (участки с недостатком и избытком смолы), недоотвержденность, нарушение ориентации волокна и т.д.).

1.12.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НК ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Практика показывает, что для НК изделий из ПКМ наибольшее распространение получили следующие методы: акустические, радиационные, оптические, тепловые, радиоволновые, капиллярные, магнитные и другие, позволяющие контролировать практически все характеристики композиционных материалов (табл. 1.12.1).

1.12.1. Контролируемые параметры ПМК

Метод НК	Параметры контроля	Измеряемые параметры и дефекты ПКМ
Ультразвуковой	Скорость и коэффициент затухания колебаний различных типов, время прохождения	Модули упругости, геометрические размеры, степень отверждения, напряженное состояние, морозостойкость, размер зерна структуры, степень кристалличности, расслоение, коэффициент армирования, пористость, плотность
Вибрационный (резонансный)	Собственные частоты и степень затухания различных видов колебаний	
Импедансный	Механический импеданс	Плотность, модули упругости, геометрические размеры, расслоение, содержание наполнителя, пористость
Акустическая эмиссия	Число и интенсивность акустических импульсов, распределение их по амплитудам и энергиям, спектральный состав акустических колебаний	Накопление повреждений при пробном нагружении, микротрещины, разрушение структурных элементов и адгезионных связей материалов

Продолжение табл. 1.12.1

Метод НК	Параметры контроля	Измеряемые параметры и дефекты ПКМ
Тепловой	Температура, температуропроводность, теплоемкость, тепловая активность	Плотность, пористость, влажность, коэффициент армирования, расслоение
Электрический	Электропроводность, диэлектрическая проницаемость, коэффициент диэлектрических потерь	Состав и структура, коэффициент армирования, степень отверждения, степень кристалличности, содержание влаги, размеры, плотность, радиопрозрачность
Электромагнитный	Электропроводность, магнитная проницаемость	Плотность, коэффициент армирования, пористость, накопление повреждений
Радиоволновый	Коэффициенты отражения, прохождения, поглощения, преломления, поляризации, преобразования	Размеры, влажность, нарушения сплошности материалов
Радиационный (радиография, радиоскопия, радиометрия, рентгенотомография)	Радиографический снимок, электрический сигнал, световое или электронное изображение объекта, изображение сечения объекта	Параметры кристаллитов, степень кристалличности, степень ориетнации структуры, остаточные напряжения, несплошности, размеры, плотность
Оптический	Коэффициенты светового пропускания и отражения	Степень повреждения арматуры, коэффициент армирования, накопление усталостных трещин
Голографический	Линейные перемещения	Деформированное состояние

1.12.1.1. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ

Акустические методы – ультразвуковой, акустический импедансный, ударный (свободных колебаний), резонансный, велосимметрический, реверберационный, акустической эмиссии – наиболее широко применяют для контроля КМ.

В средствах акустического метода НК применяют упругие колебания с диапазоном частот от 50 Гц до 50 МГц. Интенсивность колебаний не превышает 1 кВт/см^2. Акустические методы делят на две группы: активные методы, использующие излучение и прием акустических волн, и пассивные методы, основанные только на приеме волн. В каждой из этих групп выделяют методы, основанные на возникновении в контролируемом объекте бегущих и стоячих волн (колебаний).

В табл. 1.12.2 приведены характеристики основных отечественных акустических дефектоскопов, применяемых для контроля композиционных материалов. Более подробные характеристики приведены в справочнике [6].

Методические материалы по акустическому неразрушающему контролю клееных сотовых конструкций и изделий из ПКМ в авиационной промышленности разработаны ВИАМ и НИАТ.

1.12.2. Основные отечественные акустические дефектоскопы, применяемые для контроля КМ

Тип прибора	Метод контроля	Диапазон частот, кГц	Контролируемые изделия
АД-40И	Импедансный	1,5...10	Клееные конструкции с металлическими обшивками и сотовым заполнителем, слоистые пластики толщиной до 2,5 мм
АД-42И		0,5...16	
АД-50У	Ударный (свободных колебаний)	1...20	Армированные и неармированные пластики, клееные узлы из металлических и неметаллических материалов
АД-20УП		0,4...12	
АД-64М	Импедансный	до 20	Все ПКМ
АД-60С	Ударный, импедансный		
Установка акустико-топографическая	Акустико-топографический (напыление порошка)	40...150	Паяные и клееные многослойные конструкции, биметаллы
УД-22УМ	Эхо-метод, теневой	200, 400, 600, 800	Изделия из ПМК толщиной до 200 мм
УД-23УМ			
АД-21Р	Резонансный	100...450	Клееные слоистые конструкции и сотовые панели
ИД-91М	Импедансный	До 100	Клееные металлические и неметаллические сотовые панели

Эти методы по своим физическим принципам существенно отличаются от ультразвуковых методов, применяемых за рубежом. Важнейшей особенностью является сухой акустический контакт, что позволяет контролировать изделия из гигроскопичных материалов.

В связи с большим затуханием УЗ-колебаний на структурных составляющих КМ при их контроле применяют УЗ-колебания частотой ниже 1 МГц. Это приводит к увеличению мертвой (неконтролируемой) зоны материала.

Импедансный метод (рис. 1.12.1, *г*) основан на возбуждении в контролируемом участке изделия упругих изгибных колебаний и анализе изменения механического импеданса на этом участке, с которым взаимодействует преобразователь. По характеристикам колебаний преобразователя (частоте, амплитуде, фазе) судят об изменении импеданса. Признаком дефекта является изменение акустического импеданса в зоне возбуждения колебаний.

В бездефектной зоне значение импеданса определяется всеми слоями изделия, колеблющегося как одно целое. В зоне дефекта верхний слой колеблется самостоятельно, и его импеданс существенно меняется. Изменение импеданса выявляется по амплитуде, фазе или изменению собственной частоты резонансной системы датчик–изделие.

Импедансный метод широко применяется для контроля клееных узлов, в том числе трехслойных с металлическими и неметаллическими обшивками и легкими (соты, пенопласт) заполнителями между ними, клеевых соединений обшивок с лонжеронами, нервюрами и т.п., а также для выявления расслоений в слоистых пластиках. Этим методом выявляются относительно неглубоко залегающие дефекты – под обшивками из алюминиевых сплавов толщиной до 2,5 мм и на глубине до 5...7 мм – в слоистых пластиках.

Импедансный метод имеет определенные ограничения. Непроклеи между обшивками и каркасом выявляются, если толщина каркаса в 2 раза больше, чем толщина обшивки. Чувствительность уменьшается с увеличением

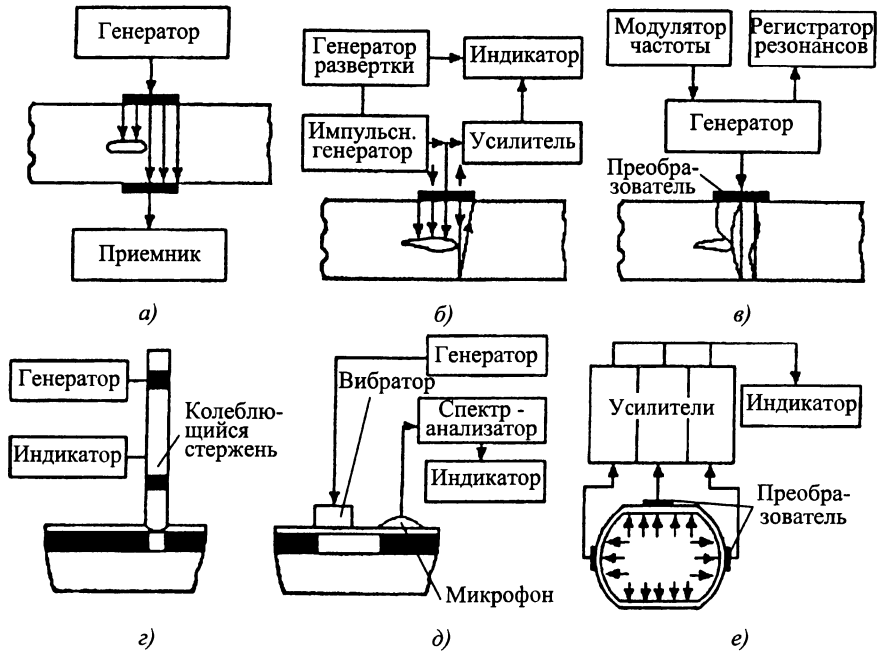


Рис. 1.12.1. Схемы основных акустических методов контроля:
а – теневой метод, *б* – эхо-метод; *в* – локально-резонансный метод, *г* – импедансный метод; *д* – локальный метод свободных колебаний; *е* – акустико-эмиссионный метод

размера сотовой ячейки. При ручном способе контроля диаметр выявляемого дефекта составляет 10...30 мм, а при автоматизированном – 5...20 мм.

При автоматизированном контроле применяют установки типа УКН-3М и УКН-4П. Импедансный дефектоскоп АД-40И комплектуется преобразователями ПАДИ-5,6,7 с износостойкими наконечниками.

Велосимметрический метод, использующий прохождение волн, основан на измерении изменения скорости распространения упругих волн в зоне расположения дефектов, а также изменении пути распространения волн от излучателя к приемнику при наличии дефекта. Для реализации данного метода разработаны специальные преобразователи с поперечным пьезоэффектом, используемые в дефектоскопах АД-20У и АД-60С.

Приборы, реализующие велосимметрический метод, работают на частотах 15...70 Гц и могут быть односторонними и двусторонними. Этим методом выявляются дефекты в слоистых пластиках на глубине до 25 мм. Минимальная площадь дефекта 2...15 см^2. Одностороннему варианту свойственна мертвая зона с противоположной поверхности изделия, составляющая 20...40 % толщины, и краевой эффект на расстояниях менее 50 мм от края изделия.

Для обеспечения сухого акустического контакта низкочастотные ультразвуковые преобразователи снабжены упругими полимерными накладками.

Прохождение волн также используется в методах, приведенных ниже.

Теневой метод (рис. 1.12.1, *а*) предусматривает ввод волн в контролируемое изделие с одной стороны, а прием, как правило, – с другой, и основан на измерении уменьшения амплитуды волны, прошедшей через контролируемый материал в зоне дефекта под влиянием неоднородности материала.

Временной теневой метод основан на определении запаздывания импульса в результате огибания дефекта в контролируемом объекте.

Зеркально-теневой метод основан на регистрации ослабления сигнала, отраженного от противоположной поверхности контролируемого объекта.

Эхо-метод (рис. 1.12.1, *б*) основан на регистрации интенсивности и времени прихода эхо-сигналов, отраженных от дефектов.

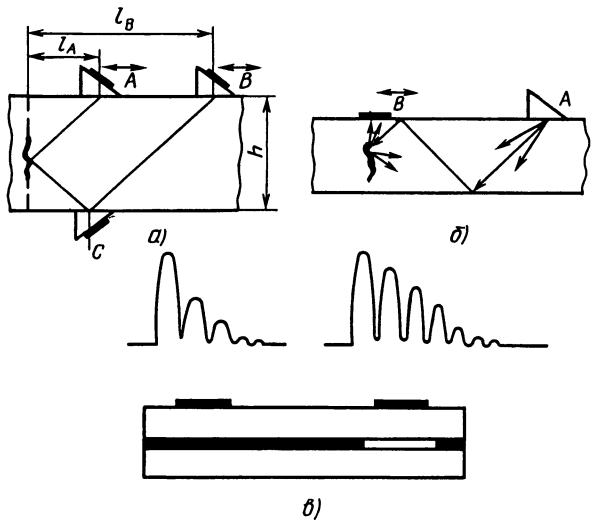


Рис. 1.12.2. Разновидности методов отражения:
а – зеркальный эхо-метод; *б* – дельта-метод; *в* – реверберационный метод

Зеркальный эхо-метод (рис. 1.12.2, *а*) основан на зеркальном отражении акустических импульсов от дефектов контролируемого изделия, ориентированных вертикально к поверхности, с которой ведется контроль, т.е. для обнаружения дефекта используют импульсы, отраженные от дна изделия или второго дополнительного отражателя. При этом наклонные преобразователи (*А* и *С*) располагают по разные стороны или по одну сторону контролируемого объекта (*А* и *В*), используя отражение от нижней поверхности. С использованием электрических или механических устройств должно выполняться условие $l_A + l_B = \text{const}$.

При использовании **дельта-метода** (рис. 1.12.2, *б*) рассеянные на дефекте волны от преобразователя *А* принимаются преобразователем *В* непосредственно над дефектом.

Реверберационный метод (рис. 1.12.2, *в*) основан на анализе длительности реверберации ультразвуковых импульсов в одном из слоев и предназначен для контроля слоистых конструкций типа металл-пластик. Когда преобразователь расположен на слое металла, ультразвуковые волны частично отражаются от границы его раздела с пластиком, а частично проходят в пластик, что вызывает гашение реверберации. При наличии дефекта в соединении материалов отражение от границы их раздела будет больше и длительность реверберации увеличится.

На использовании стоячих волн основаны следующие методы.

Локальный метод свободных колебаний (рис. 1.12.1, *д*) основан на ударном возбуждении свободно затухающих упругих колебаний широкого диапазона частот в контролируемой зоне изделия с последующей регистрацией спектра, принятых прибором (специальным приемником и спектроанализатором) сигналов.

Локально-резонансный метод (рис. 1.12.1, *в*) широко применяется в толщинометрии (см. п. 1.12.2.1). По резонансным частотам определяют толщину стенки. Дефекты определяют по резкому изменению толщины или пропаданию резонансов, например, в случае, если дефект наклонный.

К акустическим методам неразрушающего контроля относят и метод **акустической эмиссии** (рис. 1.12.1, *е*), при котором дефект – зарождающаяся трещина, фиксируется по акустическим шумам, возникающим при ее образовании.

Потере прочности материала под нагрузкой предшествует появление микроочагов разрушения – микротрещин. Процесс разрушения материала сопровождается выделением энергии в виде теплоты и упругих колебаний.

Сигналы акустической эмиссии могут быть как непрерывными, так и импульсными. В методе акустической эмиссии регистрируется акустическое излучение (эмиссия), вызванная микротрещинообразованием и структурными изменениями деформированного твердого тела. Метод эффективен на начальных стадиях разрушения, когда другие методы неразрушающего контроля неэффективны.

Установлено, что при контроле КМ процесс разрыва волокон сопровождается гораздо большим увеличением амплитуды сигналов акустической эмиссии, чем растрескивание матрицы. Информационными параметрами являются: амплитуда, длительность, энергия, крутизна переднего фронта и спектральные характеристики сигналов акустической эмиссии.

Для реализации метода акустической эмиссии определяющим фактором является чувствительность приемников акустических сигналов. В табл. 1.12.3 приведены сравнительные данные по чувствительности различных пьезоматериалов.

При использовании акустических средств НК применяют как сухие акустические контакты, так и жидкие: машинные масла МК-8, МК-20, МК-22, глицерин, вазелин и др. Если материал контролируемого изделия не позволяет применять контактные жидкости, то применяют сухой контакт через полиуретановую пленку СКУ-Б толщиной 0,5...1,0 мм. Эту пленку обычно накладывают на преобразователь дефектоскопа, однако чувствительность метода к дефектам снижается по сравнению с применением контактной жидкости.

В табл. 1.12.4 приведены области применения зарубежных акустических приборов для НК многослойных конструкций из ПКМ.

1.12.3. Сравнительные данные по чувствительности различных пьезоматериалов

Характеристика	Пьезоматериал					
	ЦТС-19	ТБ-1	ТБК-3	ТБКС	PZT-4	PZT-5A
Пьезоэлектрический модуль, $d \cdot 10^{12}$, м/В	100	45	43	20	123	171
Акустический импеданс Z, (МПа · с)/м	23,1	21,7...24,4	15,8...17,5	22,9...26	34,5	33,3

1.12.4. Область применения зарубежных приборов для неразрушающего контроля многослойных конструкций

Тип прибора	Фирма, страна	Диапазон частот, кГц	Область применения, выявляемые дефекты
АДФ-2	Inspection Instruments, Великобритания	1...8	Соединения между элементами многослойных конструкций, расслоения в слоистых пластиках
АДФ-3		0,3...1,8	Соединения между пенопластом и другими мягкими материалами и основами
"Гармоник Бондтестер"	Chartroniks, США	30	Соединения в многослойных конструкциях с металлическими и неметаллическими обшивками, расслоения в пластиках
"Сондикатор"	Automation Industries, США	25	Соединения в многослойных конструкциях, расслоения в неметаллических материалах

Продолжение табл. 1.12 4

Тип прибора	Фирма, страна	Диапазон частот, кГц	Область применения, выявляемые дефекты
"Бондтестер-70"	Fokker-B.V., Нидерланды	30...1000	Количественная оценка прочности соединения и выявление непроклеев в изделиях из металлов и неметаллов
УФД-С	Balto Sonatest, Великобритания	100...18 000	Контроль клееных соединений в многослойных конструкциях, обнаружение дефектов в пластиках, композиционных материалах и др.
"Bondmaster"	Stavelly Inc., США	0,5...1000	Универсальное применение

1.12.1.2. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НК

Радиационные методы НК основаны на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Результаты контроля определяются природой и свойствами применяемого излучения, физико-техническими характеристиками контролируемого материала изделия, типом и свойствами детектора (регистратора) излучения, технологией (методикой) контроля, квалификацией специалистов, проводящих контроль. В радиационной дефектоскопии в основном используют рентгеновское, гамма- и нейтронное излучение. Источниками рентгеновского излучения служат рентгеновские аппараты, ускорители электронов и радиоактивные источники бета-излучения. В качестве источников гамма-излучения в дефектоскопии применяют нуклиды: тулий-170, иридий-192, кобальт-60, цезий-137 и др. Источниками нейтронов являются ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц и радиоактивные источники.

В нашей стране и за рубежом широкое применение получили методы радиационной дефектоскопии – радиография, радиоскопия, радиометрия и рентгеновская вычислительная томография.

Метод радиографии основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок, представляющий собой распределение плотности почернения на рентгеновской пленке. Сущность этого метода состоит в просвечивании (рис. 1.12.3) материалов, деталей и готовых изделий проникающим ионизирующим излучением и последующим анализом формы, размеров и расположения внутренних дефектов (неоднородностей) по их теневому изображению, полученному в результате фотографического преобразования скрытого радиационного изображения в видимое.

Радиографический метод основан на свойстве рентгеновского и гамма-излучения вызывать почернение эмульсии пленки. Степень почернения различных участков рентгеновской пленки после ее соответствующей

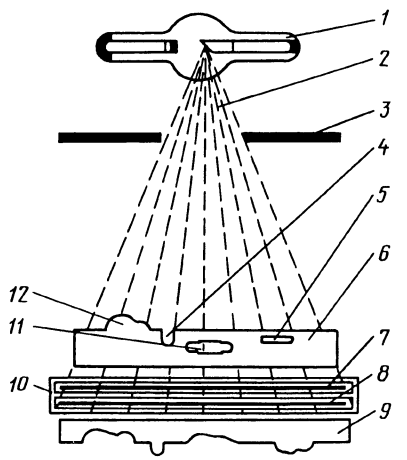


Рис. 1.12.3. Схема радиографирования детали: *1* – источник излучения, *2* – рентгеновское или гамма-излучение, *3* – диафрагма, ограничивающая конус излучения, *4* – впадина на поверхности детали, *5* – воздушная полость, *6* – деталь, *7* – усиливающие экраны, *8* – рентгеновская пленка, *9* – эпюра интенсивности излучения на выходе из просвечиваемой детали; *10* – кассета; *11* – включение более плотное, чем основной материал детали, *12* – утолщение

фотообработки определяется величиной поглощенной дозы излучения, которая зависит от плотности, толщины и однородности поглотителя излучения. В зависимости от вида применяемого излучения различают: рентгенографию (рентгеновский снимок) и гаммаграфию (гамма-снимок).

Для радиографического контроля изделий из ПКМ в цеховых (стапельных) условиях наиболее целесообразно применение передвижных и переносных рентгеновских аппаратов на максимальные напряжения 100...200 кВ. Основными поставщиками такой аппаратуры являются фирмы "Филипс" и "Зейферт" (Германия), а также ряд отечественных фирм. Технические характеристики некоторых рентгеновских аппаратов этих фирм приведены в табл. 1.12.5.

При радиографическом контроле изделий из ПКМ требуется выявление в последних протяженных по площади дефектов типа расслоений или непроклеев, или, вероятней всего,

1.12.5. Технические характеристики передвижных и переносных рентгеновских аппаратов для контроля ПКМ

Тип аппарата	Фирма, страна	Конструктивное исполнение	Анодное напряжение, кВ	Максимальный анодный ток, мА	Размер фокального пятна, мм	Масса излучателя, кг
I. Передвижные аппараты						
MG 103 m/2,25	Philips, Германия	Кабельный	5...100	6 и 15	0,4 и 1,5	3,5
MG 165 m/2,25			7,5...160	3	0,3	8
MG 225 L			10...225	3 и 10	0,6 и 2,0	15
Isovolt 160 TL	Seifert, Германия		10...160	10	0,4 и 1,5	8,5
РАП-100М-10	МНПК Хронос, Россия	Моноблок	10...100	10	1,4	12
РАП-160М-5			10...160	5	1,2	18
II. Переносные аппараты						
PS 220	Philips, Германия	Моноблок	60...220	5	2,0	23
РАПАН М 200/100	ВНИИ Автоматики, Россия		100...200	0,8 и 0,4	3,0	9
АРИНА-1	СП Спектрофлэш, Россия	Импульсный	160...170	–	2,5...3	4,5
АРИНА-0,5			170...180			3,5
СХТ-180	НПП Буревестник, Россия	Моноблок	180	4	5 × 0,6	10

1.12.6. Рентгеносенситометрические характеристики рентгеновских пленок для контроля ПКМ

Тип пленки	Фирма, страна	Характеристика сенсибилизации	Чувствительность, P^{-1}	Контрастность	Оптическая плотность вуали
РТ-К	Тасма, Россия	Экранная	6	4,0	0,08
РТ-1		Безэкранная	30	3,2	
Structurix D8	Agfa, Бельгия	Экранная	14	4,6	0,19
Structurix D3			2,5	6,4	0,18...0,2
Structurix D2			1,4	7,6	0,19
Kodak Industrex M, M100	Kodak Industrex, США	Экранная	2,5	6,4	0,18...0,2
Kodak Industrex DR			1,5	7,2	0,18...0,2

нарушений геометрии сборки, в том числе повреждений заполнителя сотовых конструкций из ПКМ. Для решения этих задач в условиях использования передвижной и переносной слаботочной рентгеновской аппаратуры (цеховые или стапельные условия) требуется применение высокочувствительной к рентгеновскому излучению, в том числе экранной рентгеновской пленки. Технические характеристики некоторых типов рентгеновской пленки для контроля ПКМ приведены в табл. 1.12.6.

Метод радиоскопии, сохраняя такие преимущества радиографии, как возможность определения характера и формы выявляемого дефекта, позволяет исследовать материал (изделие) непосредственно в момент его просвечивания. Этот метод основан на просвечивании контролируемого объекта излучением, преобразовании радиационного изображения объекта детали в световое или электронное и передаче этих изображений на расстояние с помощью оптики или телевизионной техники с последующим анализом изображений на экране оптического или телевизионного устройства (рис. 1.12.4).

Технические характеристики основных зарубежных радиоскопических систем приведены в табл. 1.12.7.

Практически все указанные радиоскопические системы имеют устройства для дополнительной обработки изображений с целью улучшения их восприятия и повышения чувствительности к выявлению дефектов. Эти устройства обеспечивают все или несколько операций из следующего полного комплекса возможных операций по обработке изображений:

суммирование (интегрирование) нескольких кадров с целью повышения отношения "сигнал/шум";

изменение масштаба изображения на экране телевизионного приемника;

функциональное преобразование яркости;

коррекция яркостных искажений (выравнивание среднего значения яркости, повышение контраста мелких деталей, подавление шумов);

оконтуривание деталей изображения;

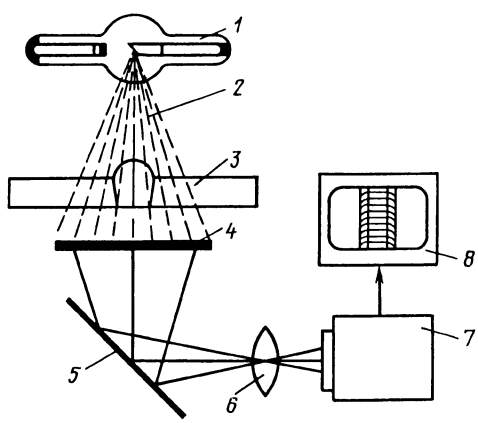


Рис. 1.12.4. Схема контроля радиоскопическим методом:
1 – источник излучения; *2* – рентгеновское излучение, *3* – контролируемая деталь, *4* – преобразователь излучения, *5* – зеркало, *6* – объектив; *7* – передающая телевизионная камера; *8* – видеоконтрольное устройство

1.12.7. Технические характеристики зарубежных радиоскопических систем

Тип установки	Фирма, страна	Преобразователь излучения, мм	Передающая телевизионная трубка	Радиационно-дефектоскопические характеристики			Область применения
				Чувствительность, %	Разрешающая способность, количество линий, В/мм	Скорость контроля, м/мин	
Установки с флуоресцирующим экраном							
РТУ с высокочувствительной камерой	Philips, Германия	Экран 240 × 320	Видикон и Si мишень + ЭОУ	3,0 по Al	6,25	1,0	Алюминиевые отливки и неметаллы
РТУ "Индекс"			Изокон	1,0…Al 3,0…Fe	7,50…10,00		Отливки и неметаллы
Установки с РЭОП							
РТУ MU15F MU17F MU20F	Philips, Германия	РЭОП ∅ 150, 230–170–130	Плюмбикон	1…2(Al) 16...160 мм; 2…3 (Fe) 7…32 мм	7,50	1,0	Отливки и неметаллы
РТУ DP-38 DP-119, DP-210, DP-235	Seifert, Германия	РЭОП ∅ 150…230		1…2(AL) 2…3(Fe)			
Установки с рентгеновидиконом							
РТУ "Searchray"	Philips, Германия	Рентгеновидикон ∅ 18	Рентгеновидикон ∅ 18 мм	1,8…2 (Al) 2…20 мм; 2…3(Fe) 1…10 мм	–	–	Радиоэлектронные компоненты

1.12.8. Технические характеристики отечественных рентгенотелевизионных систем

Тип установки	Фирма	Относительная чувствительность, %	Поле контроля, мм	Разрешение, пар линий/мм
I. Система с рентгеновским электронно-оптическим преобразователем				
Интроскоп РИ-61Т	МНКО "Спектр"	1,5...2	160...20	1,5
II. Системы с рентгеновидиконом				
Интроскоп РИ-82Т	МНКО "Спектр"	0,5...1,0	90	5
РТК-121	НИИ "Платан"	~0,5		6
РТК-121-1			30	16
РТК-121-2			150	3
ТУ-1Н	НП фирма "Рецептор"	0,2	90 и 150	~10

цветовое контрастирование (окраска дефектов в условные цвета);

анализ изображений для определения параметров исследуемых объектов.

Для повышения эксплуатационных возможностей указанные рентгенотелевизионные системы комплектуются следующей аппаратурой и дополнительными системами: рентгеновской аппаратурой напряжением 8...160 кВ; механическими манипуляторами с пятью степенями свободы (в ряде случаев – промышленными роботами с манипуляторами); микропроцессорами для управления рентгеновской аппаратурой и манипулятором; системами обработки изображений; системами автономной биологической защиты.

В табл. 1.12.8 приведены основные технические характеристики выпускаемых в настоящее время отечественных рентгенотелевизионных систем, применяемых для контроля легких металлов и неметаллических изделий, в том числе из ПКМ.

Метод радиометрии по существу заключается в просвечивании объекта путем его сканирования коллимированным пучком излучения и последующем преобразовании детектором прошедшего излучения в электрический сигнал (рис. 1.12.5, рис. 1.12.6). Детекторами излучения являются счетчики различного рода, ионизационные камеры, сцинтилляционные и полупроводниковые преобразователи. После обработки сигнала результаты контроля представляются регистрирующим устройством в виде записи на диаграммной ленте, цифрового кода, отклонения стрелки гальванометра и т.п. При наличии дефектов или других отклонений в изделии детектор и регистрирующее устройство отмечают изменение потоков излучения.

В радиометрических приборах применяются аналоговый или дискретный (счетный) метод представления информации. Дискретный метод измерения заключается в определении числа импульсов на выходе детектора. Аналоговый метод измерения позволяет определить суммарный заряд детектора, вызванный ионизацией регистрируемым излучением.

По характеру измеряемой величины различают радиометрическую дефектоскопию и толщинометрию. Отличия дефектоскопии от толщинометрии обусловлены различным характером решаемых ими задач.

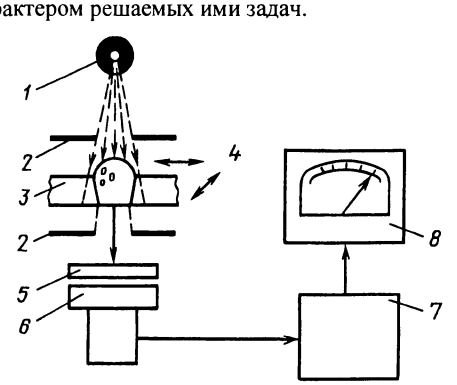


Рис. 1.12.5. Схема радиометрического контроля:
1 – источник излучения; *2* – коллиматоры; *3* – контролируемый объект, *4* – направление перемещения; *5* – сцинтилляционный кристалл; *6* – фотоэлектронный умножитель, *7* – усилитель, *8* – регистрирующий прибор

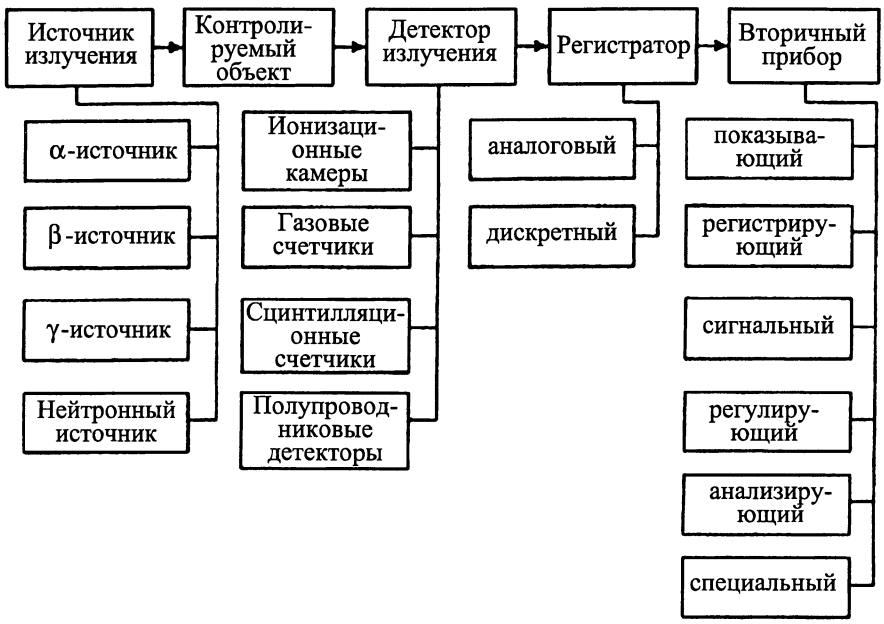


Рис. 1.12.6. Структурная схема построения радиометрических средств контроля

Во-первых, из-за локального расположения и малых размеров технологических дефектов требуется быстродействующая регистрирующая аппаратура, в то время как для плавных изменений толщины возможно усреднение сигналов. Кроме того, при сканировании объекта контроля дефект на мгновение перекрывает канал коллиматора, и сигнал от него на выходе детектора имеет пологие фронты, т.е. не является прямоугольным.

Во-вторых, в дефектоскопии размеры канала коллиматора определяются размером минимально выявляемых дефектов и поэтому всегда малы. В связи с этим при прочих равных условиях для обеспечения одинаковой чувствительности в дефектоскопии по сравнению с толщинометрией необходимо повышать интенсивность излучения.

В-третьих, радиометрический дефектоскоп работает на основе постоянного сравнения дефектной и соседней с ним зон объема изделия, сканируемых последовательно во времени, и поэтому требуются непрерывные измерения; в толщиномерах возможны дискретные измерения по сравнению с эталоном и получение результатов в абсолютных значениях. Эти различия приводят к тому, что чувствительность радиометрического метода в толщинометрии выше, чем в дефектоскопии.

Рентгеновская вычислительная томография. Сущность рентгеновской вычислительной томографии заключается в сканировании выделенного слоя контролируемого объекта узким (коллимированным) пучком рентгеновского излучения с измерением его интенсивности радиометрическими детекторами в достаточно большом числе точек и ракурсов (проекций), вычислении распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения (плотности объекта) в каждой точке исследуемого сечения и построение изображения сечения объекта на экране видеоконтрольного устройства (рис. 1.12.7).

С помощью источника *1* и коллиматоров *2* и 5 формируют веерообразный пучок рентгеновского излучения, просвечивающий слой *4* объекта *3*. Излучение, прошедшее через объект *3*, регистрируют линейкой детекторов (счетчиков) *6* в течение заданного времени, необходимого для накопления информации. По истечении этого времени объект *3* поворачивают вокруг вертикальной оси на некоторый малый угол и снова регистрируют излучение детекторами *6*. Для выполнения полного цикла контроля выделенного слоя *4* объект *3* дискретно поворачивают на угол 180°. Угол малого поворота объекта *3* и время отсчета определяются требуемой точностью измерении. Сигналы от

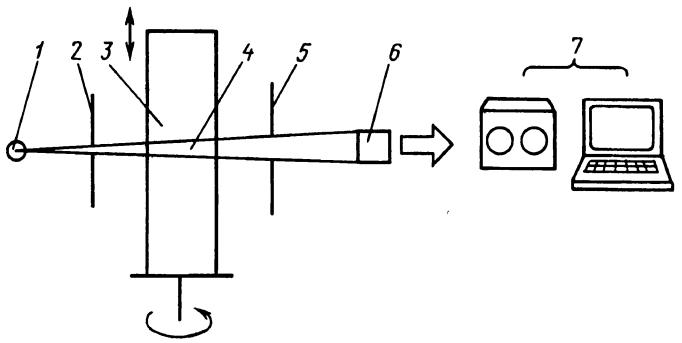


Рис. 1.12.7. Схема рентгеновской вычислительной томографии

1.12.9. Оптимальная энергия фотонов E_0, кэВ, при рентгеновской вычислительной томографии в зависимости от толщины неметаллических материалов

Материалы	Толщина изделий, мм			
	40	100	200	400
Графиты, углепластики, углеродные композиты	110	160	190	240
Пластмассы, древесина, резина	150	240	290	380
Стеклопластики, кремний, фарфор, алюминий и его сплавы	30	90	130	170
Теплоизоляционные и теплозащитные материалы низкой плотности	350	980	1300	1700

детекторов *6* поступают в ЭВМ *7*, осуществляющую математический синтез (реконструкцию из отчетов) изображения сечения контролируемого объекта и воспроизведение его на экране видеоконтрольного устройства (дисплея). Подъемом или опусканием объекта исследованию подвергают другие слои объекта.

Области применения рентгеновской вычислительной томографии приведены в табл. 1.12.9 и табл. 1.12.10.

Технические характеристики рентгеновских вычислительных томографов приведены в табл. 1.12.11. Запись и хранение программ в них осуществляется на магнитных дисках и лентах.

Рентгеновскую томографию использовали при контроле сотовых конструкций створок отсека полезного груза (ОПК) отечественного космического орбитального корабля "Буран".

В США рентгеновская вычислительная томография получила применение при контроле ракет, снарядов, самолетных двигателей и турбинных лопаток. С использованием линейных ускорителей на 15 МэВ самая большая система рентгеновской вычислительной томографии применяется для контроля твердотопливных двигателей межконтинентальных ракет "Minuteman" и "Peace keeper" диаметром до 2,4 м, высотой 6,6 м и массой 53 т. В качестве регистратора излучения используется люминесцентный матричный преобразователь из полупроводниковых детекторов. Отмечаются тенденции к упрощению и снижению стоимости систем рентгеновской вычислительной томографии, в том числе путем использования рентгенотелевизионных систем для преобразования двухмерного изображения – аналога томограмм. Это позволит шире применить томографы для контроля изделий из неметаллов, в том числе для контроля сотовых конструкций из ПКМ.

1.12.10. Области применения рентгеновской вычислительной томографии по видам контролируемых изделий из конструкционных пластиков, керамики, композиционных и теплозащитных материалов

Технологический процесс	Апробированная область применения		Возможная область применения	
	Контролируемые детали и соединения	Выявляемые дефекты и отклонения	Контролируемые детали и соединения	Выявляемые дефекты и отклонения
Производство деталей из конструктивных пластиков	Кольца, трубы и стержни из тефлона и поливинилхлорида	Отклонения по плотности и толщине материала	Детали в виде колец, труб, коробов, щитов из конструкционных пластиков	Распределение пор, раковин, инородных материалов по сечению. Отклонения по толщине
Производство деталей из керамики	Детали из керамики на основе нитрида и карбида кремния, оксида алюминия	Разная плотность с погрешностью измерений не более 1 %. Внутренние трещины с раскрытием более 0,05 мм, поры и пустоты объемом 0,3 мм^3	Керамические детали турбовентиляторных и турбовинтовых авиационных двигателей	Разная плотность, внутренние дефекты типа трещин, пор, пустот
Производство деталей из КМ	Детали из волокнистых КМ: а) на основе полимерной матрицы, (углепластики, стеклопластики и т.д.)	Пористость, расслоение размером 0,5 мм. Изменения плотности связующего по сечению	Интегральные конструкции, изготовляемые намоткой из волокнистых КМ	Поры расслоения, изменения плотности связующего по сечению
			Стеклопластиковые лопасти несущих винтов вертолетов	
	б) на основе металлической матрицы (графиталюминиевые и другие КМ)		Лопатки вентиляторов из КМ	
Производство деталей из КМ	Сопла и носовые части из углепластиков	Отклонения по плотности, поры, инородные включения, трещины, отклонения в графитизации по сечению, нарушение схемы армирования	Лопасти в виде колец, труб носков, коробов, щитов из слоистых пластиков	
			Детали в виде колец, труб, щитов, коробов из материала "углерод-углерод" (гравимол)	Нарушение структуры материала и его плотности по сечению

Продолжение табл. 1.12 10

Технологический процесс	Апробированная область применения		Возможная область применения	
	Контролируемые детали и соединения	Выявляемые дефекты и отклонения	Контролируемые детали и соединения	Выявляемые дефекты и отклонения
Производство теплозащитных материалов	Элементы теплозащитного покрытия (ТЗП) из кварцевого волокна	Распределение волокон по сечению и объему элемента ТЗП. Разная плотность материала по сечению и объему ТЗП	Детали из перспективных теплозащитных материалов	Нарушения схемы укладки волокон, распределения пор и дефектов микроструктуры, локальное изменение плотности с точностью до 0,1 %

1.12.11. Технические характеристики рентгеновских вычислительных томографов конструкции МНПО "Спектр"

Основные параметры	Вычислительный томограф			
	ВТ-50	ВТ-300	ВТ-300-1	ВТ-1000
Анодное напряжение трубки, кВ	150	300	420	420
Тип ЭВМ	PC/AT	СМ 1420	PC/AT	СМ 1420
Максимальный диаметр рабочего поля, мм	50	300	300	~1000
Средняя толщина контролируемого слоя, мм	0,02...0,1	0,5...3	0,5...4	0,5...8
Предел пространственного разрешения в плоскости контролируемого объекта, мм	0,025	0,5	0,25	0,5
Время сканирования контролируемого изделия, мин	5...20	3...20	3...20	3...20
Потребляемая мощность, кВ · А	0,45	20	20	20
Занимаемая площадь, м	5	40	30	60

Специальные радиационные методы контроля. Нейтронная радиография отмечена аэрокосмической фирмой Дорнье (Германия) как метод, позволяющий выявлять в слоистых пластиках ориентацию волокон, раковины, пористость, разнотолщинность, разрыв волокон, включения и трещины, а в клеевых соединениях – дефекты типа отсутствия или скопления клея, геометрии отдельных частей, скопления влаги, инородных включений в клеевом слое и пор. В сотовых конструкциях из ПКМ фирма выявляет отклонение геометрии и отсутствие повреждений сотоблока из алюминиевого сплава и полимерной бумаги.

Рентгеновская томоденситометрия заключается в анализе распределения плотности материала отдельных слоев контролируемого изделия с помощью многоканальных радиометрических систем. В частности, на фирме Интерконтроль (Intercontrole), Франция, создана рентгеновская система MAGIC, воспроизводящая черно-белое или цветное изображение объектов до двух метров в диаметре и до нескольких метров в высоту. Гибкая система

оснащается рентгеновскими излучателями на 160, 320 или 420 кВ; сигналы поступают от детекторов по 31 – 63 каналам. Изображение из 1024 × 1024 элементов анализируется в автоматическом/полуавтоматическом режиме: осуществляется анализ плотности, измерение геометрических параметров и т.д. Возможен контроль КМ, сплавов и керамики. Был проведен контроль двух образцов различной плотности: монолитного ротора из углепластика и арамидного органопластика диаметром 380 мм и толщиной 20 мм и цилиндрического титанового фланца диаметром 277 мм с обшивкой из тканого КМ плотностью 1,65 г/см^3 (толщина фланца 2 мм, толщина КМ 8,5 мм). Напряжение на трубке составляло 200 кВ, ток – 3,5 мА. В первом случае выявлено утончение внутренней обшивки, во втором – воспроизведено переплетение волокон и неравномерное распределение матрицы, при этом обеспечивалось разрешение по плотности 0,1 %.

Для радиографии в обратно-рассеянном рентгеновском излучении фирмой Philips (Германия) разработана система "Комскэн", в которой используется эффект Комптона. Он заключается в рассеянии рентгеновского излучения на свободных электронах, находящихся во внешних оболочках атомов рассеивателя. Угловое распределение рассеянного излучения зависит от энергии падающего (первичного) излучения; при энергии до 100 кэВ почти половина квантов испытывает обратное рассеяние. Особенно сильно этот эффект заметен на материалах с низким атомным номером, в том числе и на ПКМ. Установка "Комскэн" обеспечивает регистрацию и анализ обратно рассеянного рентгеновского излучения. Она позволяет при одностороннем подходе к контролируемым объектам получать радиоскопическое изображение объекта, причем не суммарное по всей глубине, а раздельное, с заданной глубины, т.е. проводить томографию – послойный контроль объекта. Это достигается применением в установке оригинальной системы коллимирования излучения в сочетании со сложной компьютеризованной обработкой изображений. Одной из основных областей применения радиографии в обратнорассеянном излучении является послойный контроль сотовых конструкций с односторонним подходом к контролируемому изделию.

Динамическая (щелевая) радиография в отличие от обычной радиографии использует просвечивание контролируемого объекта на укрепленную за ним рентгеновскую пленку (или электрорадиографическую пластину) коллимированным веерным пучком рентгеновского излучения во время перемещения объекта с пленкой относительно источника излучения или наоборот. По сравнению с обычной (статической) радиографией дополнительно необходимы щелевой коллиматор (свинцовая или другая пластина) с прямоугольной щелью, ширина которой меньше ее длины, и механическое устройство с дистанционным управлением для перемещения объекта с пленкой (или источника излучения). Чувствительность к дефектам радиографии в движении близка к чувствительности обычной радиографии моннонаправленным источником излучения с размерами фокуса, равными центральной проекции щели коллиматора на пленку. Скорость перемещения объекта с пленкой (или источника излучения) определяется отношением размера центральной проекции щели коллиматора на пленку к времени просвечивания объекта в обычной радиографии при том же фокусном расстоянии. При контроле сотовых конструкций, в том числе из ПКМ, радиография в движении, в отличие от обычной радиографии, исключает наложение изображений сот друг на друга на периферии снимка и позволяет при этом повысить производительность и снизить трудоемкость контроля.

1.12.1.3. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НК

Оптические методы, основанные на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля, применяют для обнаружения внутренних дефектов только в изделиях из материалов, прозрачных в оптической области спектра электромагнитных колебаний. К числу дефектов, выявляемых оптическими методами, относят расслоения, пустоты, поры, трещины, включения инородных тел и др. В химической промышленности с помощью оптических методов НК осуществляют спектральный анализ, контроль структуры ПМ и полимеров, колориметрический контроль растворов; в текстильной – контроль целостности материала, диаметров нитей, структуры ткани; в авиастроении – контроль геометрии, визуальная эндоскопия двигателей.

Когерентно-оптические методы основаны на использовании лазеров как источников когерентного излучения и принципов голографии для получения объемных изображений исследуемых объектов.

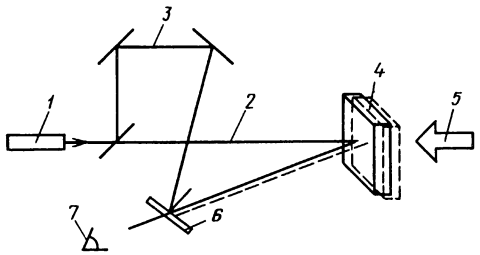


Рис. 1.12.8. Схема контроля изделий методами голографической интерферометрии

Рабочим пучком излучения *2* лазера *1* (рис. 1.12.8) освещают контролируемый объект *4*, фиксируя отраженное объектом изображение на фотопластинке *6* с высокой разрешающей способностью (100...1000 лин/мм). Одновременно на ту же фотопластинку системой зеркал направляют часть излучения лазера, называемую опорным пучком *3*. После проявления фотопластинки *6* на ней можно обнаружить систему интерференционных полос – результат взаимодействия рабочего (отраженного от объекта) и опорного пучков излучения. Поместив проявленную фотопластинку в положение *6* и осветив ее опорным пучком *3*, через фотопластинку вместо объекта *4* увидим его объемное (трехмерное) голографическое изображение; *7* – глаза оператора при контроле в реальном масштабе времени.

Совмещение и сопоставление этого голографического изображения с самим объектом после приложения к нему внешней нагрузки *5* или с топографическим изображением нагруженного объекта лежат в основе методов голографической интерферометрии (при деформациях объектов порядка длины волны излучения лазера – около 0,5 мкм) или спекл-интерферометрии (при деформации порядка 1000 длин волн – около 0,5 мм).

Метод голографической интерферометрии в реальном масштабе времени заключается в том, что контролируемый объект (см. рис. 1.12.8) совмещают с его голографическим изображением *4*, подвергают объект слабому внешнему воздействию *5* (механическое нагружение, нагрев, гидростатическое давление, вакуум, вибрации) и на поверхности объекта наблюдают сеть интерференционных полос, являющихся геометрическим местом равных перемещений объекта. При изменении силы или направления внешнего воздействия интерференционные полосы перемещаются по объекту.

Внутренние дефекты в объекте (пустоты, расслоения и др.) вызывают аномальные деформации поверхности объекта и интерференционные полосы над местом их расположения испытывают искривления или разрыв. По изменениям характера полос эти дефекты могут быть обнаружены и идентифицированы по виду.

Метод голографической интерферометрии с двойной экспозицией основан на последовательной записи на фотопластинке *6* (см. рис. 1.12.8) голограмм объекта в исходном и нагруженном (под действием нагрузки *5*) состояниях. После проявления фотопластинки полученная интерферограмма анализируется оператором или поступает в автоматизированную систему обработки и анализа изображений с использованием ЭВМ с целью выявления по интерферограмме дефектов объекта и определения их характера, размеров, глубины залегания и других параметров.

Методы спекл-интерферометрии (от англ. speckle – пятнать) используют свойство образовывать пятнышки когерентным излучением, отраженным от поверхности большинства природных объектов. Спекл-структура является результатом интерференции дифракционных картин, создаваемых каждой точкой поверхности этих объектов на регистраторе изображения.

В спекл-интерферометрии различают: метод спекл-фотографии с двойной экспозицией; метод электронной корреляционной спекл-интерферометрии.

Метод спекл-фотографии с двойной экспозицией, называемый еще "шеарографией", основан на записи на одной фотопластинке спекл-структур несмещенного и смещенного (под действием внешней нагрузки) контролируемого объекта.

Метод электронной корреляционной спекл-интерферометрии основан на преобразовании спекл-структур объекта непосредственно в видеосигнал телевизионной системы, поскольку размеры пятен (спеклов) и период корреляционных интерференционных полос (0,1 и 1,0 мм соответственно) находятся в пределах разрешения такой системы.

Обработка информации проводится способами вычитания или сложения видеосигналов. При использовании способа вычитания видеосигнал от спекл-структуры несмещенно-

го объекта поступает в запоминающее устройство. После внешнего воздействия на объект видеосигнал от его спекл-структуры вычитается из видеосигнала, имеющегося в памяти телесистемы. Разностный сигнал фильтруется широкополосным фильтром, выпрямляется и поступает на видеоконтрольное устройство (ВКУ). При использовании способа сложения на чувствительном элементе передающей телевизионной трубки складываются интенсивности двух световых полей, соответствующих несмещенному и смещенному объекту. Выходной сигнал фильтруется, выпрямляется и воспроизводится на ВКУ в виде корреляционных интерференционных полос, несущих информацию о дефектах объекта.

Результирующий видеосигнал может быть также непосредственно подан в автоматическую систему обработки изображений на базе ЭВМ. При этом исключается необходимость применения фотоматериала как промежуточного носителя информации.

Основная область применения когерентно-оптических методов контроля – выявление подповерхностных дефектов типа расслоений, непроклеев и других в слоистых пластиках, сотовых и других клееных конструкциях из ПКМ, а также контроль напряженно-деформированного состояния материалов конструкций, в том числе из композитов.

Преимуществами когерентно-оптических методов перед другими методами контроля, например, акустическими, являются: бесконтактность, независимость от формы поверхности и материала изделия, возможность одновременного контроля участков поверхности размером до 1 $м^2$.

К недостаткам этих методов следует отнести необходимость тщательной предварительной отработки технологии контроля изделия из ПКМ, трудности в расшифровке результатов контроля по интерферограммам, высокие требования к механической жесткости оборудования. Последние, правда, существенно снижаются при использовании методов спекл-интерферометрии.

В нашей стране оборудование для когерентно-оптических методов контроля создается, как правило, разработчиками изделий из ПКМ с привлечением специалистов в области физики, электроники, приборостроения. За рубежом известны фирмы – создатели такого оборудования, например, фирма "Ньюпорт" (США), выпускающая лазерные голографические интерферометры системы НС 4000 для контроля авиационных деталей из термопластов длиной до 9,7 м.

Специалисты отделения технологии машиностроения университета в Южной Каролине (США) для оценки деформации и степени повреждения эпоксидного стеклопластика использовали разновидность метода электронной корреляционной спекл-интерферометрии – корреляцию видеоизображений, получаемых не при лазерном, а при обычном освещении. Сначала на поверхность образцов из ПКМ с помощью пульверизатора наносили слой белой эмали, а затем благодаря мелким брызгам черной эмали формировали изображение со спекл-структурой. Образец освещали источником белого света, его изображение воспринималось твердотельной видеокамерой и закладывалось в память. После проведения ударных испытаний на растяжение деформированный образец вновь был заснят. Используя алгоритм идентификации, ЭВМ сравнивала два изображения со спекл-структурой и вычисляла, каковы сдвиги в изображении и какова деформация (а следовательно, и сопротивление деформации) образца. Изменения поля напряжений позволяли локализовать участки с подозреваемым дефектом, а применение критерия Тсая – Хилла – получить количественную информацию о степени повреждения образца. С помощью этого метода успешно анализировали поля напряжений качественных и дефектных образцов. Теория отказов, примененная для анализа с учетом деформации слоистых КМ, армированных волокном, позволила вывести функцию отказов. Данные опытов показывают, что максимальное значение функции обратно пропорционально остаточному сопротивлению образца растяжению.

1.12.1.4. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НК

Тепловые методы НК основаны на использовании тепловой энергии, распространяющейся в контролируемом изделии. Тепловое поле поверхности участка изделия является источником информации о прохождении теплопередачи, которое зависит от наличия наружных или внутренних дефектов. Средства теплового контроля основаны на взаимодействии теплового поля изделия с термометрическим чувствительным элементом, преобразованием параметров поля в параметры электрического или другого сигнала и передаче его на

регистрирующий прибор. Основной характеристикой температурного поля, являющейся индикатором дефектности, служит величина локального температурного перепада (чувствительность или температурное разрешение).

В качестве средств теплового НК используются в основном тепловизоры и системы "Термопрофиль". Кроме приборов, приведенных в табл. 1.12.12, в МНПО "Спектр" разработан также тепловизор ИФ-60ТВ.

Чувствительность теплового метода к дефектам зависит от большого количества факторов, которые можно разделить на внешние и внутренние. Внешние факторы обусловлены характеристиками применимых средств контроля, мощностью источника нагрева, скоростью его перемещения вдоль контролируемого изделия и др. Внутренние факторы определяются теплофизическими свойствами материала контролируемого изделия, а также видом, размером и местоположением дефектов.

Применяют два способа теплового контроля: активный и пассивный. При активном методе объект контроля подвергается воздействию внешнего источника тепловой энергии. При пассивном методе объект контроля не подвергается воздействию внешнего источника тепловой энергии.

Пассивному методу теплового НК посвящены работы, в которых описана инфракрасная (ИК) термография как новый метод НК для КМ, основанный на том факте, что все объекты излучают электромагнитную радиацию, соответствующую их температуре, воспринимаемую и преобразовываемую ИК-камерой в электрические сигналы, изображенные

1.12.2. Технические характеристики средств теплового неразрушающего контроля

Тип прибора	Фирма, страна	Регистрируемые длины волн, мкм	Диапазон температур, °С	Чувствительность (перепад температур, °С)	Масса передающей камеры, кг
I. Тепловизоры					
а) охлаждаемые жидким азотом одноэлементные приемники с оптико-механической растровой системой					
Thermovision THV-450/470 THV-487 THV-489 THV-510 THV-550 THV-900 THV-1000	Agema, Швеция	Коротковолновое 3...5, Длинноволновое 8...12	От –20 до +2000	0,07...0,1	1,6...2,0
Inteco	Фирма ИНТЕКО, Россия	–	От –20 до +200	0,05 при 30 °С	3,0
б) неохлаждаемые с пироэлектрическим видиконом					
ТН-2	МНПО "Спектр", Россия	8...14	–	0,15 для крупных деталей, 0,5 при 50 лин/кадр	–
II. Системы "Термопрофиль"					
Thermoprofile THP-3 THP-6	Agema, Швеция	Система с непрерывным сканированием узким лучом в плоскости, перпендикулярной направлению движению или вращения объекта			

на видеоэкране. В результате этого становится возможным изучение распределения температуры по поверхности обследуемого объекта, обусловленного в том числе попаданием воды в объект. В другой работе описана разработанная компьютеризированная система, которая может быть применена для обнаружения несплошностей в изделиях из ПКМ. Система содержит ИК-видеосистему, посредством которой измеряется температурное распределение на всей поверхности объекта. Модификация этой системы применена для обнаружения дефектов сотовых конструкций, в том числе дефектов, лежащих между обшивкой и сотоблоком. Изучается влияние толщины обшивки и комбинации материалов обшивки и сотоблока.

Активный тепловой контроль играет важную роль при оценке качества ПКМ. При исследовании этих материалов необходимо контролировать процесс нагрева в пространстве и времени, изменение излучательной способности. Поверхность нагревается источниками теплоты, обеспечивающими равномерное распределение температуры по исследуемой площади объекта контроля. Это, как правило, излучатели с галогенными и импульсными ксеноновыми лампами. Источники с импульсными лампами позволяют одновременно нагревать площадь более 0,3 $м^2$, источники с линейными галогенными лампами – до 300 × 300 $мм^2$. Длительность импульса ксеноновой импульсной лампы 20 мс, плотность энергии 1...2 $Дж/см^2$. Полезны лазерные и электромагнитные источники теплоты, целесообразно также применять горячие жидкости и струи горячего воздуха ("тепловые пушки"). В некоторых случаях (при исследовании микроизделий) для нагрева используют пучки электронов.

Когда нагрев малоэффективен, для перепада температур в области дефектов прибегают к охлаждению. Эффективно применение аэрозольных охладителей, создающих инверсный температурный перепад.

Экспериментально найдено, что дефекты, диаметр которых в 1,5 – 2 раза больше глубины залегания, могут быть выявлены при активном тепловом контроле. Следует учитывать диффузионный процесс распространения теплоты в материале. Имеются значительные различия между односторонним и двусторонним контролем. При двустороннем контроле обнаруживаются более глубокие дефекты, чем при одностороннем, но для подповерхностных дефектов разрешающая способность выше при одностороннем контроле.

Примером системы активного теплового контроля может служить система "Talytherm", разработанная британской фирмой Rank Taylor Hobson. Эта система оснащена прецизионной оптикой, модулем TICM для формирования теплового изображения, использовавшимся ранее в военных целях, и мощной ЭВМ, а также ксеноновой лампой-вспышкой и ИК-камерой. Рабочая частота излучения камеры составляет 50 Гц, выявляемый перепад температур 0,03 °С, число строк в разверт – 512. Матрица дисплея включает в себя 512 × 512 элементов. Матобеспечение TEMPS (система измерения и обработки данных о тепловом излучении) позволяет создавать температурные профили, гистограммы, изменять поле зрения, осуществлять статистическую обработку изображения. Система может использоваться для контроля панелей с сотовым заполнителем (с обшивками из углепластика толщиной до 5 мм), охлаждающих каналов лопаток турбины, проникновения влаги внутрь рулевых поверхностей, расслоений и повреждения ячеек, а также для контроля трубопроводов, клеевых соединений, участков с высокой концентрацией напряжений и участков, поврежденных ударом молнии. Возможно также проведение вибрационных испытаний критических узлов конструкций. Дальнейшим развитием вышеуказанной системы является система "Talytherm-90", работающая по принципу термографического метода НК. За последние годы этот метод получил широкое распространение в Великобритании. С его помощью можно обнаружить механические и коррозионные дефекты конструкции посредством оценки разности между тепловым изображением дефектных и нормальных участков. Суть метода состоит в быстром и равномерном нагреве исследуемой поверхности, площадь которой может достигать 1 $м^2$, хотя бы на 10 °С. После этого конструкция самопроизвольно остывает по мере диффузии теплового потока внутрь материала. Разрыв целостности конструкции, наличие трещин, очагов коррозии, изломы материала вызывают отклонения в процессе диффузии по сравнению с эталонным процессом, записанным в памяти ЭВМ. Эти отклонения улавливаются датчиком, обрабатываются на ЭВМ и передаются на экран монитора. Визуализация передачи теплового потока и анализ результатов контроля осуществляется системой "Talytherm-90". Чем больше очаг коррозии и чем

выше термоконтрастность работоспособных и поврежденных участков конструкции, тем точнее результаты. Последние исследования показали высокую эффективность метода для проверки алюминиевых узлов и панелей, а также конструкций из углепластиков. Обнаруживаются дефекты размером более 2 мм. Этим методом хорошо выявляются расслоения в слоистых КМ, а также непроклеи в сотовых многослойных конструкциях.

Одной из разновидностей теплового НК является метод вибротермографии. Сущность его заключается в изучении температурных полей на изделиях и материалах, возникающих при воздействии на них вибраций. Метод эффективен при контроле КМ путем селективного возбуждения вибраций различных частот и фиксации мест рассеяния механической энергии посредством термографов. Контролируемое изделие подвергается вибрационному нагружению с частотами до 100 Гц (гидравлические испытательные машины), до 18 кГц (электродинамические возбудители) и до 40 МГц (пьезоэлектрические возбудители). При низкочастотном нагружении в полимерных материалах преобладает фазовый сдвиг между напряжением и деформацией, тогда как при высокочастотном нагружении главную роль играет упругое последействие, обусловленное квазиадиабатической характеристикой материалов при быстродействующих нагрузках. Мощность регистрируемого при термографии локального теплового источника пропорциональна квадрату амплитуды локального напряжения, вследствие чего возможно создание высокочувствительных вибротермографических детекторов локальных пиковых напряжений. Вибротермографическая система содержит электромагнитные возбудители вибраций, пьезоэлектрические датчики сил и ускорений, замкнутый контур регулирования, необходимый при резонансных режимах нагружения, систему охлаждения нагружающего узла в зависимости от его мощности, совместимую с видеооборудованием, камеру термовидения, средства памяти и обработки данных.

Анализ возможностей тепловых методов показывает, что их применение для контроля изделий аэрокосмической техники наиболее целесообразно в комплексе с акустическими, радиационными, вихретоковыми и оптическими методами НК.

1.12.1.5. РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НК

Радиоволновые методы НК основаны на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с контролируемым изделием. В радиодефектоскопии могут также использоваться резонансные эффекты взаимодействия радиоволнового излучения (ядерный магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс и др.). На практике наибольшее распространение получили сверхвысокочастотные (СВЧ) методы НК, использующие диапазон длин волн от 1 до 100 мм.

Использование радиоволн в диапазоне СВЧ для контроля изделий из ПКМ перспективно по следующим причинам:

– имеется возможность получать большой интервал мощностей генерируемых волн, что обеспечивает контроль ПКМ различной прочности;

– волны диапазона СВЧ практически могут быть остро сфокусированы, что позволяет исключить влияние температуры контролируемого изделия на измерительные датчики и обеспечить локальность контроля и т.п.;

– СВЧ-методы позволяют осуществлять бесконтактный НК при одностороннем расположении средств контроля по отношению к изделию;

– в большом количестве параметров полезного СВЧ-сигнала (амплитуде, фазе, частоте, коэффициенте поляризации и т.д.) может содержаться информация о внутренней структуре ПКМ, дефектах и геометрии;

– применение СВЧ позволяет наблюдать и анализировать быстропротекающие процессы;

– резонансные радиоволновые СВЧ-методы позволяют осуществлять многопараметровый контроль дефектности, геометрии, состава и структуры ПКМ, в дефектной и бездефектной зонах.

Области применения СВЧ-методов радиоволнового вида НК, подготовка и проведение контроля даны в ГОСТ 23480–79. В условиях производства выбор методов, средств и режимов контроля (см. табл. 1.12.1) деталей, узлов и изделий из ПКМ в каждом конкретном случае проводится с учетом конструктивно-технологических особенностей изделий (применяемых материалов, их сочетания, доступа к контролируемому изделию, требуемой произ-

водительности и чувствительности к недопустимым дефектам, состояния поверхности и т.д.) и условий проведения НК.

1.12.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НК ПЛОТНОСТИ И ТОЛЩИНЫ СТЕНОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ И ПОКРЫТИЙ ИЗ НИХ

Особенностью применения методов НК плотности и толщины стенок деталей из ПКМ и покрытий на них является сильное влияние на точность замеров строгого соблюдения требований технологии их изготовления.

Основными факторами, вызывающими отклонения плотности и размеров деталей из ПКМ, являются:

- нарушения режимов изготовления армирующих волокон и образование дефектов при их ткацкой обработке;
- нарушения размеров форм и оснастки, ошибки в формировании пакетов-заготовок, усадочные явления;
- неравномерность прикладываемого усилия при прессовании, намотке и т.п.;
- нарушения режимов механической обработки;
- несоблюдение режимов эксплуатации изделия.

В практике плотнометрии и толщинометрии деталей из ПКМ получили наибольшее распространение акустические, электрические, радиационные, тепловые, микрорадиоволновые и другие методы. Каждый из методов может быть использован в нескольких вариантах или даже комплексно, например, только радиационный метод может быть рентгеновским, радиоизотопным, альбедным, обратного рассеяния, протонным, нейтронным, спектрометрическим и др. Применение указанных методов и их разновидностей для контроля плотности, толщины ПКМ и покрытий на них, а также покрытий из ПКМ зависит от типа материала, вида и конфигурации детали, наличия в ней дефектов и требуемых результатов. Ниже даны основные методы НК плотности и толщины ПКМ.

1.12.2.1. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Так же, как и для дефектоскопии (см. разд. 1.12.1.1), в акустических методах используются колебания в диапазоне от 50 Гц до 50 МГц. Методы основаны на регистрации упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте. Широкое применение этих методов обусловлено тем, что акустические колебания являются разновидностью механических колебаний, и параметры их распространения естественным образом связаны с принятыми для оценки жесткости материалов техническими и механическими константами. Используются следующие разновидности акустических методов.

Акустический низкочастотный метод основан на прохождении низкочастотных (до 20...600 кГц) ультразвуковых колебаний (УЗК) через объект контроля и эффективно используется для контроля физико-механических характеристик и толщинометрии деталей из ПКМ.

При этом могут применяться импедансный, велосимметрический, резонансный, теневой, реверберационный методы, а также методы свободных колебаний, акустико-тепловой.

Нестационарный частотно-фазовый метод (НЧФ) основан на эффекте нестационарного смещения частоты непрерывных УЗ волн, распространяющихся в среде с изменяющимися во времени свойствами от изменения соответствующего физического параметра, например, плотности и толщины слоев ПКМ. Метод обладает возможностью при опорной частоте 1 МГц и относительной стабильности частоты генератора $10^{-8}...10^{-9}$ выделения частотного сдвига на уровне 10^{-7} Гц и фазового сдвига на уровне $2 \cdot 10^{-6}$. Такая высокая разрешающая способность НЧФ-метода позволяет устанавливать информативные взаимосвязи и достигать точности измерения параметров ПКМ до 0,1 %. НЧФ-метод наиболее успешно применим при контроле плотности, пористости, толщины и других параметров однотипных деталей из ПКМ.

Вибрационный метод (ВНМ) основан на возбуждении в деталях и образцах низкочастотных колебаний с последующей их регистрацией.

В объектах контроля, в зависимости от их формы, размеров, способа крепления и схемы приложения динамической нагрузки, возбуждаются продольные, изгибные, крутильные и более сложные колебания. В качестве одноопорных объектов контроля можно назвать вентиляторные лопатки газотурбинного двигателя, выполненные из ПКМ, параметры колебательного процесса которых определяют плотность, толщину материала и всех его слоев (табл. 1.12.13).

1.12.13. Области применения акустических приборов для контроля плотности и толщины стенок деталей из ПКМ

Тип прибора	Диапазон рабочих частот, МГц	Область применения Диапазон измерения
УК-10ПМС	25...1000 кГц	Контроль физико-механических характеристик, в том числе и плотности ПКМ
УД-2	1,25...10	Физико-механические характеристики ПКМ
УТ-93П	2,5	Контроль толщины ПКМ. Диапазон 0,5...200 м
УТ-55БЭ		Контроль толщины ПКМ при одностороннем подходе. Диапазон 1,0...50 мм
УТ-31 МЦ		То же
MG-21 Изг. Labimex, Польша	1,0	Контроль толщины. Диапазон 2...100 мм
ДМ-2, ДМ-3 Изг. Krautkramer, Германия	2,0...10	Контроль толщины (портативные приборы). Диапазон 0,6...300 мм
CL-202P, CL-204 Изг. Krautkramer, Германия		Прецизионная толщинометрия. Диапазон 0...100 мм

1.12.2.2. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Так же, как и при радиационной дефектоскопии (см. п.1.12.1.2), радиационные методы толщинометрии и плотнометрии основаны на взаимодействии ионизирующего излучения с объектом контроля, а результаты контроля определяются природой и свойствами применяемого излучения, физическими характеристиками материала изделия и используемыми детекторами.

Области применения радиационных приборов для контроля плотности и толщины стенок деталей из ПКМ приведены в табл. 1.12.14.

Рентгеновский альбедный метод основан на облучении мягким рентгеновским (или гамма-) излучением объекта контроля с последующим анализом обратно-рассеянного излучения. При этом в качестве первичного излучения может использоваться рентгеновское излучение с энергией до 30 кэВ или гамма-излучение. Этот метод применяется для контроля материалов с низким средним атомным номером (каковыми являются ПКМ) до 2 г/см^3 и эффективным номером менее 15 ед. Так как основным химическим элементом ПКМ без наполнителя является углерод, то эффективный атомный номер близок к шести. Добавление различных наполнителей, например, стек-

1.12.14. Область применения радиационных приборов для контроля плотности и толщины стенок деталей из ПКМ

Тип прибора	Вид излучения и источника	Область применения Диапазон измерения
КТС РТВК	Сверхминиатюрные источники β-излучения: (Sr-90, Т1-204, Pm-147)	Измерение толщины любых покрытий на деталях из ПКМ. Измерение толщины тонких стенок. Диапазон массовых толщин 1...1500 г/м^2
РИТ	Источник ИГИА-3	Измерение толщины деталей из ПКМ. Диапазон 5...20 мм с плотностью 1,6...2,0 г/см^3

Продолжение табл. 1.12.14

Тип прибора	Вид излучения и источника	Область применения. Диапазон измерения
РЕИТ, РТ-1	Рентгеновская трубка БХ-9	Измерение толщины любых покрытий при разнице атомных номеров покрытия и подложки более трех единиц. Диапазон 1...100 мкм
НГ-10Т	Нейтронное излучение	Измерение толщины деталей из ПКМ за металлическими стенками, а также толщины металлических стенок при одностороннем подходе. Диапазон 0,1...60 мм
НИП-3		Измерение плотности ПКМ. Диапазон 0,1...3 г/см^3
Beta 2060 Фирма Fisher, Германия	Сменные источники β-излучения	Измерение толщины металлических покрытий на деталях из ПКМ. Диапазон 0,1...50 мкм
X-ray-1000 Фирма Fisher, Германия	Рентгеновская трубка	Измерение толщины тонких металлических покрытий на деталях из ПКМ. Диапазон 0,1...20 мкм
ВТ-300		Измерение толщины и плотности деталей из ПКМ. Диапазон 0,05...300 мм, 0,1...3 г/см^3
РТВК-5К	Миниатюрные источники β-излучения	Измерение толщины любых покрытий на плоских деталях из ПКМ. Диапазон 1...1100 г/м^2

ловолокна, в эпоксидную смолу приводит к изменению плотности и эффективного атомного номера ПКМ.

Измерение плотности по обратному рассеянию рентгеновского излучения выполняют по известной методике.

На рис. 1.12.9 приведена схема зонда, применяемого при измерении плотности материалов. В этом случае используется геометрия прямой видимости, при которой детектором охватывается весь объем среды, в котором возникает рассеянное излучение. Эта геометрия имеет максимум чувствительности к плотности при расположении детектора на поверхности контролируемого материала. С увеличением расстояния H детектор–поверхность материала, чувствительность к плотности уменьшается. Как следует из рис. 1.12.10, чувствительность к плотности зонда на рис. 1.12.9 возрастает с уменьшением напряжения на рентгеновской трубке.

При измерении толщины деталей из ПКМ может быть использовано как гамма-излучение, так и рентгеновское излучение. Для компенсации влияния вариации плотности атомного номера исследуемого ПКМ кроме измерительного канала следует использовать второй – корректирующий канал, выходной

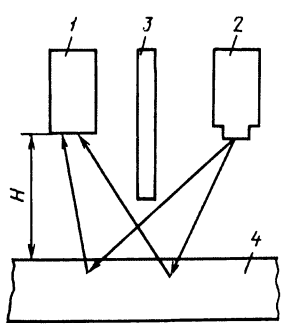


Рис. 1.12.9. Схема зонда для измерения плотности материала по обратному рассеянию излучения:
1 – детектор; *2* – рентгеновская трубка; *3* – защитный экран; *4* – контролируемый объект

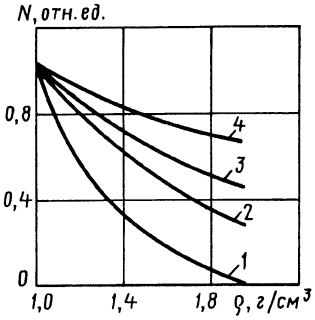


Рис. 1.12.10. Зависимость потока рассеянного излучения от плотности графита при измерении по схеме на рис. 1.12.9:
1, 2, 3 и *4* – напряжение на аноде рентгеновской трубки соответственно 10, 15, 18 и 24 кВ

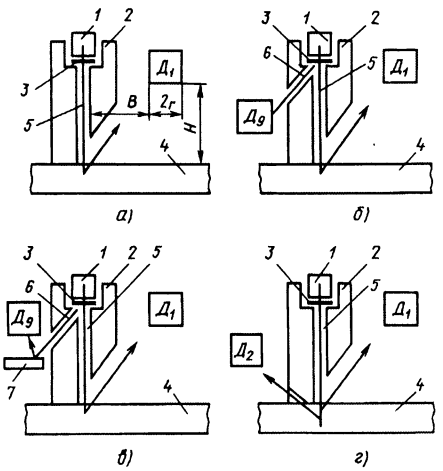


Рис. 1.12.11. Схемы измерения толщины:
а – в – одноканальный метод; *г* – двухканальный метод, *1* – рентгеновская трубка; *2* – коллиматор, *3* – фильтр излучения; *4* – контролируемый объект; *5, 6* – коллимационные отверстия; *7* – дополнительная мишень; $Д_1$, $Д_2$, $Д_9$ – детекторы

сигнал которого зависит от величины указанных мешающих факторов. Избирательная чувствительность к плотности материала достигается при использовании серийно выпускаемого гамма-источника ИГИА-3. Регистрация излучения проводится одним и тем же детектором попеременно по основному и дополнительному каналам. Разработанный алгоритм сглаживания экспериментальных данных позволяет в 2,5 раза уменьшить погрешность измерения основного параметра по сравнению с одноканальным прибором. Диапазон измерения 5... 20 мм с плотностью материала, изменяющейся в диапазоне 1,6...2,0 г/см^3. Прибор может быть использован для углепластиков, органопластиков, углерод-углеродных КМ при основной погрешности 2...3 %.

Для локальных измерений толщины ПКМ, особенно у деталей сложной конфигурации и малых размеров, целесообразно использование малогабаритных источников на основе рентгеновских трубок. Напряжение питания анода малогабаритных излучателей не превышает 40...50 кВ, и поэтому применение обратнорассеянного рентгеновского излучения для измерения толщины ограничено материалами с малым атомным номером.

Некоторые схемы измерения материала по обратному рассеянию рентгеновского излучения показаны на рис. 1.12.11. Схемы типа *а, б, в*, реализующие одноканальный метод измерения отраженного потока, применяют при измерении линейной толщины d, см, материала постоянной плотности, а также массой толщины поверхностной плотности $t = \rho d$ материала переменной плотности. Двухканальный метод измерения (схема типа *г*) используют при измерении линейной толщины d материала переменной плотности. Диапазон контролируемой толщины материала зависит от его состава, спектра излучения, величины анодного напряжения рентгеновской трубки. Влияние анодного напряжения и спектрального состава излучения показано на рис. 1.12.12, на котором приведены зависимости нормированных величин потоков обратнорассеянного излучения от поверхностной плотности графита при дополнительной фильтрации пучка первичного излучения алюминиевым фильтром с поверхностной плотностью $t_{Al} = 0{,}1$ г/см^2 и без него. Из рис. 1.12.12 следует, что использование фильтров вследствие уменьшения низкоэнергетического компонента в спектре первичного излучения приводит к расширению диапазона измерения толщины при сохранении точности измерения.

При напряжениях на аноде трубки 10... 30 кВ максимальная массовая толщина графита, которая может быть измерена по обратнорассеянному излучению, находится в пределах 0,4...2,0 г/см^2. Диапазон измерения массовой толщины другого полимерного материала может быть оценен по отношению потока обратнорассеянного излучения от насыщенного

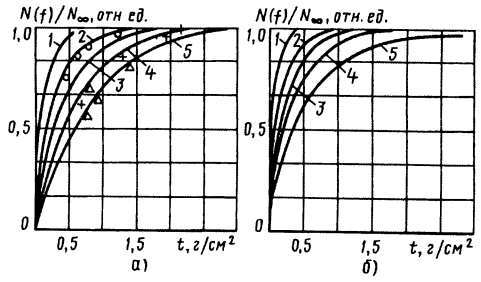


Рис. 1.12.12. Зависимость потока обратнорассеянного излучения от массовой толщины графита:
а – $t_{Al} = 0$, *б* – $t_{Al} = 0{,}1$ г/см², *1 – 5* соответственно при напряжении 10, 15, 18, 25 и 30 кВ; О, +, Δ – экспериментальные данные при напряжении соответственно 18, 25 и 30 кВ

слоя контролируемого материала к потоку обратнорассеянного излучения от насыщенного слоя графита. Для текстолита это отношение равно примерно 1,5, и соответственно диапазон измерения его толщины в 1,5 раза меньше, чем для графита при одинаковом напряжении на трубке.

Для ПКМ, состоящих из смеси химических элементов (ХЭ) с малым атомным номером, суммарное массовое сечение рассеяния излучения при больших углах рассеяния практически не зависит от состава материала. В этом случае зависимости обратнорассеянных потоков излучения от толщины материала, из которого изготовлены образцы, и для контролируемого материала практически одинаковы, если обеспечивается равенство потоков от насыщенных слоев этих материалов, что достигается установкой соответствующего напряжения на рентгеновском излучателе. Для текстолита, полиметилметакрилата, графита и других близких к ним материалов величина этого напряжения равна соответственно 30, 26,8 и 22,4 кВ при использовании рентгеновской трубки 0,001 БХЗ с молибденовым анодом. Это позволяет использовать в рентгеновских толщиномерах комплект стандартных образцов из одного материала, а напряжение на аноде устанавливать в соответствии с маркой контролируемого материала при малой дополнительной погрешности в 2 – 3 %.

Рентгеновское излучение можно использовать и при измерении толщины покрытий; характер зависимости $N(d)$ от толщины покрытия и чувствительность метода измерения толщины покрытия по обратнорассеянному излучению определяются соотношением интенсивностей обратнорассеянных излучений от образцов из материалов основания и покрытия с насыщением ($M_{\text{нас о}}$ и $N_{\text{нас п}}$).

Покрытие, атомный номер которого меньше атомного номера материала основы, обладает лучшими рассеивающими свойствами, чем основа. Поток рассеянного излучения в этом случае будет возрастающей функцией от толщины покрытия, а чувствительность рентгеновского толщиномера к изменению толщины покрытия тем выше, чем больше разность атомных номеров ХЭ покрытия $Z_{\text{п}}$ и основы $Z_{\text{о}}$ (рис. 1.12.13). При большой разнице атомных номеров ХЭ покрытия и основы, имеющей место при контроле толщины полимерных покрытий на металлической основе, чувствительность толщиномера покрытий к изменению толщины покрытия приближается к чувствительности рентгеновского толщиномера пленочных материалов из ХЭ покрытия. Диапазон контролируемой толщины и погрешность измерения толщины покрытия по величине потока обратнорассеянного излучения зависит от энергии излучения и соотношения атомных номеров ХЭ материалов покрытия и подложки. Максимальный диапазон и наименьшая погрешность достигается при контроле полимерных покрытий на металлической основе.

Если атомный номер ХЭ материала покрытия больше атомного номера ХЭ материала основы, то поток обратнорассеянного излучения уменьшается с ростом толщины покрытия. Максимальная чувствительность и максимальный диапазон измерения толщины покрытий с большим атомным номером ХЭ достигается на подложках из легких материалов. При этом на погрешность измерения оказывают влияние колебания толщины основы. На рис. 1.12.14 приведена экспериментальная зависимость чувствительности рентгеновского толщиномера от толщины текстолитовой основы и толщины медного покрытия:

$$S_{\text{о}} = \left[d_{\text{о}}\left(\delta N/\delta d_{\text{о}}\right)\right]/N$$
$$\text{и } S_{\text{п}} = \left[d_{\text{п}}\left(\delta N/\delta d_{\text{п}}\right)\right]/N .$$

При толщине медного покрытия более 20 мкм чувствительность толщиномера к изменению толщины покрытия выше, чем к изменению толщины основы, а относительная

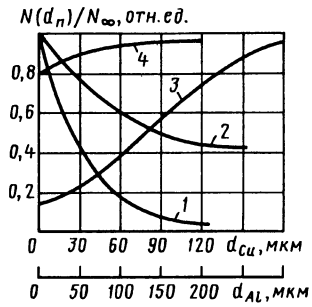


Рис. 1.12.13. Зависимость потока рассеянного излучения от толщины:
1, 2 – медного покрытия соответственно на текстолите и стали, ε = 15 кВ; *3, 4* – алюминиевого покрытия на стали и алюминиевом сплаве Д16, U = 28 кВ

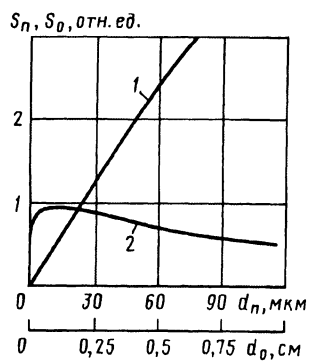


Рис. 1.12.14. Зависимость чувствительности толщиномера к относительному измерению толщины медного покрытия (*1*)и текстолитовой подложки (*2*)

погрешность измерения толщины покрытия меньше относительного изменения толщины основы.

Бета-альбедный метод основан на взаимодействии бета-частиц радиоактивного источника с материалом объекта контроля при последующей регистрации обратнорассеянных бета-частиц детектором. Этот метод находит применение при контроле толщины покрытий и материалов на деталях из ПКМ. Метод использует излучение микроисточника бета-излучения и измерительных преобразователей толщиномеров.

Создан комплекс технических средств (КТС РТВК), который является базой для решения конкретных задач толщинометрии самых разнообразных покрытий. Диапазон измерения комплекса от 1 до 1500 г/м^2 на деталях простой и сложной конфигурации (в случае контроля внутренних поверхностей радиус их кривизны не должен быть меньше 6 мм), а площадь измерения должна соответствовать ряду 0,2; 1,0; 10 мм^2.

Для более простых деталей может использоваться радиоизотопный толщиномер выборочного контроля РТВК-5К.

В качестве источников в указанных выше толщиномерах могут быть использованы сверхминиатюрные источники на основе прометия, таллия и стронция активностью до 3 МБК.

Нейтронный метод основан на взаимодействии нейтронного излучения с объектом контроля. Метод может быть использован для решения ряда специальных задач при измерении толщины и плотности ПКМ, например, толщины стенок из ПКМ, находящихся за металлическими стенками, при затрудненном доступе к объекту контроля (см. табл. 1.12.14). Для решения этой задачи может быть применен нейтронный измеритель плотности НИЛ-3, состоящий из радиоизотопного преобразователя РИП, блока сопряжения и мини-ЭВМ ДЗ-28. Погрешность измерения не ниже 1 % в автоматическом режиме.

Метод рентгеновской томографии основан на реконструкции пространственного распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения по объему контролируемого объекта в результате вычислительной обработки теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта в различных направлениях. Новизна метода обусловлена принципиально новыми возможностями: способностью воспроизводить внутреннюю структуру (толщину и покрытие отдельных элементов) толстых неоднородных промышленных изделий сложной формы без взаимного наложения теней различных элементов конструкции, в десятки раз большей, чем у традиционной радиографии, чувствительностью к локальным нарушениям сплошности, включениям и малым отклонениям геометрической структуры. Например, вычислительный томограф ВТ-300 позволяет контролировать внутреннюю структуру промышленных изделий из ПКМ с плотностью до 3 г/см^3. Особенностью этого томографа является специализированный алгоритм реконструкции томограмм, позволяющий осуществлять сканирование и реконструирование структуры локальных зон контролируемого

изделия с высоким пространственным разрешением, хорошей геометрической чувствительностью контроля.

1.12.2.3. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Тепловые методы толщинометрии и плотнометрии основаны на ослаблении теплового потока в ПКМ при его распространении от источника излучения в материале объекта контроля до детектора (см. п.1.12.14).

При изменении толщины и плотности ПКМ или покрытий на них происходит изменение таких теплофизических характеристик, как коэффициентов теплопроводности "т" и тепловой активности $A = \rho c$ (ρ, c – плотность и удельная теплоемкость материала). На практике целесообразнее определять тепловую активность, чем теплопроводность. В ПКМ изменение "A" в трансверсальном к плоскости армирования направлении зависит преимущественно от изменения плотности и толщины ПКМ и (в меньшей степени) от коэффициента армирования. При контактном тепловом методе для измерения тепловой активности применяют датчики теплового потока (ДТП). Величина относительного электрического сигнала, снимаемого с ДТП, зависит только от соотношения тепловых активностей контролируемого изделия и эталона. С уменьшением тепловой активности, обусловленным, например, наличием утончения материала, электрический сигнал по отношению к эталону будет падать. Этот метод и использован в теплометрическом дефектоскопе УТКД. Измерительная головка УТКД имеет следующие характеристики: рабочий перепад с термостабилизацией 30 °С; площадь рабочей поверхности тепловой головки – 1,2 см^2, время измерения – не менее 5 с.

При бесконтактном тепловом методе измеряется время, за которое происходит установление заданного перепада температур между двумя заданными точками. Эффективно использование этого метода для контроля толщины металлических покрытий на подложках из ПКМ. В качестве источника теплового излучения может использоваться и инфракрасный лазер, а в качестве приемников – точечные радиометры, например сегнетоэлектрические, обладающие чувствительностью к температуре 1...20 °С и быстродействием 0,1...0,2 мс.

Область применения тепловых приборов приведена в табл. 1.12.15.

1.12.15. Область применения тепловых и электроемкостных приборов

Тип прибора	Вид контрольного поля	Область применения. Диапазон измерения
УТКД	Тепловое (контактный метод)	Определение плотности и толщины детали из ПКМ. Определение адгезии и расслоения покрытия. Детали плоские. Диапазон 0,2...5 мм
ИТА		Определение поверхностной плотности и расслоений ПКМ. Диапазон 0,5...5 мм
ИТХ		Определение теплофизических характеристик ПКМ, по которым могут быть определены плотность, пористость, толщина и адгезия слоев многослойного материала
ИДП-7	Электрическое	Определение толщины ПКМ и диэлектрических покрытий на поверхности с неровностью до 0,3 мм и толщиной объекта до 10 мм
Диэлектрический спектрометр 7056		Измерение диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в широком диапазоне частот (10...10^5 Гц) для определения физических и геометрических параметров детали из ПКМ толщиной не более 20 мм
ИДХ-7004		Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц, контроль физико-химических параметров ПКМ и их размеров

1.12.2.4. ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Электроемкостные методы (ЭМ) основаны на регистрации и анализе электрического поля, деформированного воздействием объекта контроля. В качестве источника электрического поля применяют электроемкостный преобразователь, который одновременно осуществляет преобразование искомых характеристик объекта контроля в электрический параметр. Для неразрушающего контроля наиболее часто используют накладные электроемкостные преобразователи (НЭП), имеющие плоские, прямые или концентрические электроды, накладываемые на контролируемую поверхность.

ЭМ позволяют косвенно путем измерения диэлектрических характеристик ПКМ контролировать плотность, состав, содержание компонентов, влажность, а также толщину пластин и оболочек объекта контроля.

Информативность ЭМ показана на рис. 1.12.15.

Различают однопараметровые и многопараметровые ЭМ. При однопараметровом контроле входным сигналом НЭП является одномерная скалярная величина, например, емкость или тангенс угла потерь преобразователя. Для определения физических или геометрических характеристик объекта контроля необходима информация о составляющих емкости или потерь, обусловленных рабочим пространством НЭП, заполненным исследуемым материалом. Измерение с использованием НЭП толщины неметаллических пластин и оболочек с односторонним подходом возможно только при условии постоянства диэлектрической проницаемости материала объекта контроля, так как изменение полезного сигнала от толщины объекта контроля оказывает влияние на выходной сигнал, идентичное мешающему воздействию. Однако из-за неровности и шероховатости поверхности деталей точность измерения может снижаться до 30 % (при неровностях порядка 0,3 мм).

Наиболее радикальным средством уменьшения мешающих воздействий (неровностей поверхности, разнотолщинности и искажений геометрии) является многопараметровый метод, в основе которого лежит целенаправленная вариация топографии электрического поля НЭП (распределение напряженности и, следовательно, энергии электрического поля) в объекте контроля. В данном случае путем физического или математического последовательного наложения нескольких топографий электрического поля достигается селективность контроля по глубине объекта контроля.

Многопараметровый метод позволяет устранять влияние контактных условий, контролировать толщину объекта и осуществлять послойный контроль.

На практике наиболее часто используют два способа вариации топографии электрического поля. Первый – это вариация топографии электрического поля путем изменения конфигураций электродов, например, посредством их переключения. В данном случае НЭП содержит несколько электродов, подключенных к низко- и высокопотенциальному зажимам измерительного устройства (рис. 1.12.16).

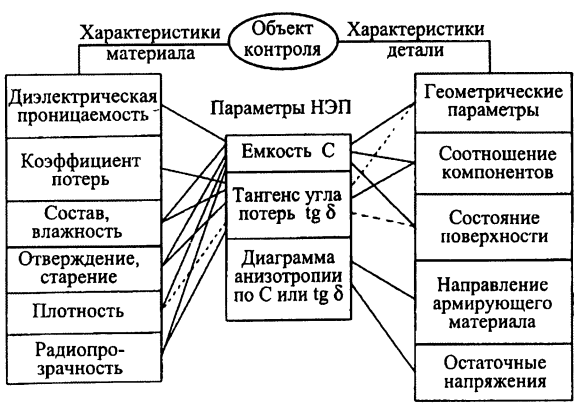


Рис. 1.12.15. Информативность ЭМ. Корреляционные зависимости между измеряемыми параметрами (сплошные линии – сильные, штриховые – слабые)

Результаты измерения, соответствующие обоим положениям переключателя, вычитают один из другого, осуществляя, таким образом, математическое вычитание топографии электрического поля.

НЭП с переключаемыми электродами позволяет также изменить направление напряженности поля (рис. 1.12.17). Приведенная конструкция НЭП предназначена для изменения направления вектора напряженности поля каждые 45°, что достигается коммутированием электродов. При этом строится диаграмма анизотропии материала без снятия НЭП.

Для физического наложения топографии электрического поля используется НЭП, который содержит специально управляемые электроды, изменением потенциалов на них осуществляется вариация топографий.

Мощным средством увеличения эффективности и информативности ЭМ является осуществление измерений в диапазоне частот, что представляет собой задачу неразрушающей диэлектрической спектроскопии (НДС). Диэлектрические характеристики ПКМ определяются по отклику идентифицированной системы на определенное воздействие (рис. 1.12.18). НДС делятся на методы временной и частотной спектрометрии. Временная спектрометрия использует импульсное воздействие (скачок постоянного напряжения) и частотные зависимости диэлектрических характеристик (диэлектрические спектры), что определяется путем спектрального анализа отклика. Частотная спектрометрия использует периодические воздействия, и диэлектрические спектры определяются посредством преобразования частотных функций.

На рис. 1.12.19 показана обобщенная структурная схема диэлектрического спектрометра, реализующего многопараметровый контроль и цифровую обработку с логарифмической дискретизацией.

Область применения электроемкостных приборов приведена в табл. 1.12.15.

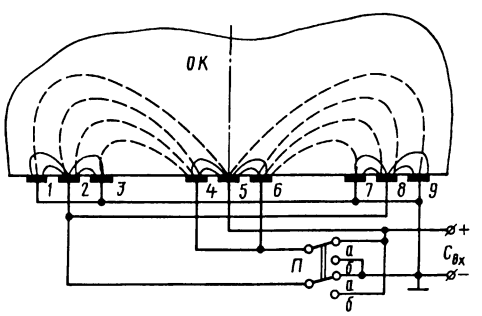


Рис. 1.12.16. Схема НЭП с переключаемыми электродами для вариации:
1 – 9 – электроды, ОК – объект контроля, П – переключатель, $C_{вх}$ – напряжение на входе

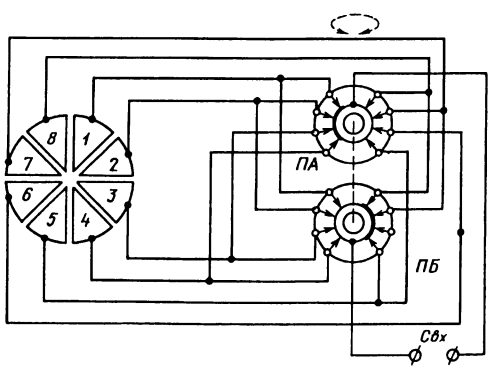


Рис. 1.12.17. Схема НЭП с переключаемыми электродами для вариации направления напряженности поля:
1 – 8 – электроды; ПА – переключатель А электродов, ПБ – переключатель Б электродов; $C_{вх}$ – напряжение на входе

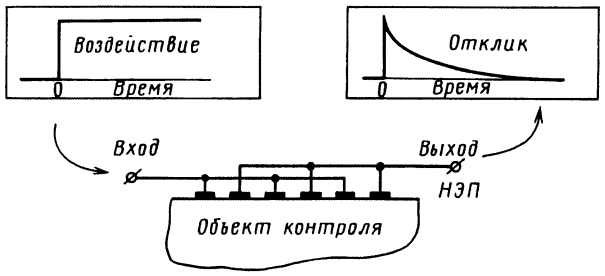


Рис. 1.12.18. Схема осуществления неразрушающей диэлектрической спектрометрии

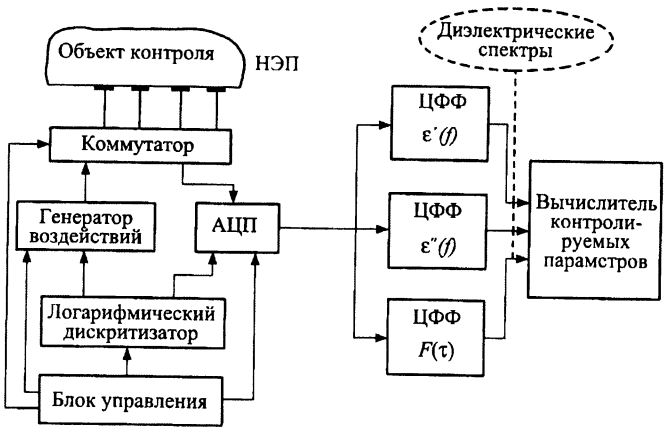


Рис. 1.12.19. Обобщенная структурная схема диэлектрического спектрометра

1.12.2.5. РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Радиоволновый метод основан на регистрации изменения параметров сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом. Метод получил распространение при дефектоскопии ПКМ, однако он может быть использован и при структуроскопии, толщинометрии и плотнометрии.

СВЧ-толщиномеры в основном работают, используя отраженное излучение при одностороннем подходе к контролируемому объекту.

Таков, например, толщиномер СТ-21И (табл. 1.12.16), измеряющий толщину ПКМ в

1.12.16. Область применения радиоволновых методов и средств

Тип прибора	Рабочая частота, ГГц	Область применения. Диапазон измерения
СТ-21И	9,3	Определение толщины ПКМ в пределах 1...20 мм
СВП-4	37,5	Определение толщины ПКМ в пределах 0,001...0,1 мм
СИТ-1	150,0	Определение толщины в пределах 0,001...0,1 мм покрытий из ПКМ на металле или в пределах 0,01...0,25 мкм металлических покрытий на ПКМ
РМИ-01	–	Определение плотности, диэлектрических параметров ПКМ
СТ-314	8,3	Измерение плотности ПМ в пределах 0,13...0,23 г/см^3

пределах 1...2 мм, и толщиномеры тонких слоев толщиной от 1 мкм до 100 мкм типа СБТ-4 и СИТ-1. При контроле деталей больших размеров успешно применяются интерференционные методы, когда набег фазы от изменения геометрического размера превышает 2π и толщина определяется обычно с помощью фазовых измерений. Такой принцип, в частности, реализуется на базе интерферометра РМИ-01, позволяющего контролировать слои ПКМ толщиной до 100 мм при вариации диэлектрической проницаемости 1...3 % и $tg0 = 10$ %.

Для контроля толщины покрытий из полимерных материалов на металлических основаниях используется амплитудно-фазовый способ, который реализован в толщиномере СТ-31И.

Для контроля толщины деталей из ПКМ, отличающихся малыми значениями относительной диэлектрической проницаемости (1,05...1,3) и тангенсов угла потерь (10^{-5}... 10^{-3}), используется метод интерференционной эллипсометрии, основанный на разделении линейно-поляризованной СВЧ-волны на две ортогонально-поляризованные составляющие, пропускании одной из них через контролируемый материал, смешивании обоих составляющих в одном канале и измерении эллиптичности суммарной СВЧ-волны. Погрешность измерений плотности в диапазоне 0,13... 0,23 г/см^3 не превышает 3 %, а площадь зоны контроля – 3 см^2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Джоунс Р., Уайкс К.** Голографическая и спекл-интерферометрия: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 328 с.

2. **Ермолов И.Н., Останин Б.Я.** Методы и средства неразрушающего контроля качества. М.: Высшая школа, 1988. 368 с.

3. **Забродский В.А.** Применение обратнорассеянного рентгеновского излучения в промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1989. 420 с.

4. **Матис И.Г.** Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. 2-е изд. Рига: Зинатне, 1982. 302 с.

5. **Неразрушающий** контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.

6. **Приборы** для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с. и кн. 2. 356 с.

7. **Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А.** Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля / Под ред. С.В. Румянцева. М.: Энергоатомиздат, 1982. 235 с.

8. **Румянцев С.В., Парнасов В.С.** Применение бета-толщиномеров покрытий в промышленности. М.: Атомиздат, 1980. 138 с.

Глава 1.13

ТЕХНОЛОГИЯ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под соединением в машиностроении понимают место сочленения двух и более деталей в узле или других элементах конструкции. Образование соединении является основной составной частью сборки изделий из любых материалов. Необходимость соединений возникает в производстве сложных по конструкции и крупных по размерам изделий и сооружений (транспортных средств, летательных аппаратов, трубопроводов, различных ферм и т.п.), при сочетании в одной конструкции деталей из разнородных по технологическим и эксплуатационным свойствам полимерных композиционных материалов (ПКМ) или деталей из ПКМ с деталями из металлов, керамики и других материалов. Используя соединения, можно изготовить изделия из трудно формуемых ПКМ, например, высоконаполненных и/или на основе тугоплавких связующих. Кроме того, изготовление изделий с использованием соединений позволяет сделать процесс мало- или вовсе безотходным, экономить энергию, ускорять и удешевлять производство. Членение конструкции на части (узлы, агрегаты, блоки и т.п.) может быть обусловлено также требованиями ремонтопригодности и простоты в обслуживании.

1.13.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ

Методы соединения деталей из ПКМ по конструктивно-технологическим признакам можно классифицировать на три класса: механические, адгезионные и комбинированные.

Механические соединения основаны на применении крепежных элементов, замков, на создании сил трения и т.п. К ним отнесены три основные группы соединений: прессовые, зам-

ковые и соединения крепежными элементами (механическое крепление). По сравнению с ними другие виды механических соединений не получили широкого применения при сборке изделий из ПКМ. В зависимости от типа крепежного элемента механические соединения разделяют на: заклепочные, резьбовые, игольчатые. К группе резьбовых соединений относят: болтовые соединения, винтовые соединения и соединения с помощью резьбы, оформленной на соединяемых поверхностях деталей. Высокая податливость полимерных материалов (ПМ) позволила по отношению к ним разработать различные виды винтовых соединений:

1. Соединение с помощью винтов и резьбы, оформленной в материале деталей;

1.1. Соединение с помощью предварительно оформленной резьбы;

1.2. Соединение создающими резьбу винтами;

1.2.1. Соединение самонарезающими винтами;

1.2.2. Соединение формующими винтами (винтами-шурупами);

2. Соединение с помощью винтов и промежуточного резьбового элемента;

2.1. Соединение с помощью полимерного резьбового элемента;

2.2. Соединение с помощью металлического резьбового элемента;

2.2.1. Соединение с помощью резьбового элемента, установленного во время формования детали;

2.2.2. Соединение с помощью резьбового элемента, установленного после формования детали;

2.2.2.1. Соединение с помощью деформирующегося резьбового элемента;

2.2.2.2. Соединение с помощью жесткого резьбового элемента;

2.2.2.2.1. Соединение с помощью запрессованного резьбового элемента;

2.2.2.2.2. Соединение с помощью приклеенного резьбового элемента;

2.2.2.2.3. Соединение с помощью оформляющего для себя резьбу элемента.

К адгезионным соединениям относят сварные, клеевые и формованные соединения. Все они основаны на техническом явлении слипания (адгезии). Комбинированные соединения представляют собой сочетания преимущественно сварных и клеевых соединений с механическими соединениями. К числу важнейших комбинированных соединений отнесены клеепрессовые, клееболтовые, клеезаклепочные, клеевинтовые и клеерезьбовые.

В зависимости от принципа создания (замыкания) связи между поверхностями деталей замковые, заклепочные и резьбовые соединения могут быть отнесены к группе соединений, основанных на особенностях формы соединяемых участков деталей (соединение замыканием формой), прессовое соединение и соединение зажимами – к группе соединений, основанных на возникновении механических сил (соединение силовым замыканием), а клеевые, сварные и формованные соединения – к группе соединений, основанных на введении и/или изменении состояния вещества в зоне соединяемых участков деталей (соединение замыканием веществом).

На выбор способа соединения влияют: тип соединяемого ПКМ; форма и размер деталей; серийность производства (большая серия продукции часто оправдывает применение дорогостоящих технологии и оборудования); оснащенность производства; требования к качеству соединения; вид соединительного шва; допустимый уровень затрат.

Технология соединений определяется в первую очередь выбранным методом. Технологии сварки деталей из ПКМ и пластмасс и технология склеивания деталей из пластмасс рассмотрены в главах соответственно 1.11, 2.3 и 2.4. В настоящей главе основное внимание уделено механическим и формованным соединениям.

1.13.2. ПРЕССОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Прессовые соединения основаны на упругом деформировании материала соединяемых участков деталей, в результате чего на сопрягаемых поверхностях возникают значительные постоянно действующие нормальные давления. При действии на такое соединение крутящего момента или осевого усилия в зоне контакта поверхностей возникают силы трения, препятствующие взаимному сдвигу деталей.

Если силы трения больше передаваемых нагрузок, то дополнительного крепления не требуется. Этот способ является наиболее простым из всех способов соединения деталей с цилиндрическими сопрягаемыми поверхностями из ПМ, в частности из КМ на основе термопластичной матрицы, если их характеризовать по механизму процесса и технологии.

Прессовые соединения применяют при сборке конструкций из однородных и разнородных ПМ, ПМ и металлов. Они получили широкое распространение при изготовлении узлов подшипников, посадке на вал зубчатых колес, кулачков, шатунов, маховиков и других деталей, при соединении емкостей с крышками, армировании полимерных деталей металлическими и т.д.

Преимуществом способа является возможность использования деталей из ПМ, изготовленных литьем под давлением или прессованием без дополнительной механической обработки, так как вследствие более низкой твердости, чем у металлов, и эластичности полимерного материала неровности, имеющиеся на его поверхности в зоне контакта, сглаживаются. Кроме того, металлические детали при разборке соединения не разрушаются, благодаря чему их можно использовать многократно. При правильном соблюдении конструктивных и технологических рекомендаций можно обеспечить высокопрочное и плотное соединение при минимальных затратах. Низкая прочность при межслоевом сдвиге ПКМ со слоистой структурой не позволяет эффективно применять прессовые соединения при сборке изделий из этих материалов.

При конструировании и выполнении прессовых соединений деталей из ПМ необходимо учитывать специфические физико-механические свойства материала (низкий модуль упругости, чувствительность к концентраторам напряжений, большие значения температурных коэффициентов линейного расширения, ползучесть полимерной фазы).

В наиболее ответственных изделиях, воспринимающих осевые силы или крутящий момент в течение длительного времени, дополнительно к прессовому соединению применяют шпонки, шлицы, а также клеевые прослойки.

Детали можно соединить продольно-прессовым или поперечно-прессовым методами. В первом случае охватываемая деталь механически запрессовывается в охватывающую в продольном направлении. Во втором случае сближение сопрягаемых поверхностей происходит в радиальном направлении. При этом предварительно нагревают охватывающие детали или охлаждают охватываемые или используют магнитно-импульсную обработку.

При механической запрессовке полимерная и металлическая детали должны иметь направляющую фаску, скошенную под углом 10°, высотой не менее трех максимальных значений натяга в соединении.

Основным технологическим параметром при продольно-прессовой посадке является усилие запрессовки $P_з$, необходимое для преодоления силы трения между соприкасающимися поверхностями. Его можно с достаточной точностью определить по формуле

$$P_з = p\pi dlf, \qquad (1.13.1)$$

где p – радиальное давление; d и l – соответственно диаметр и длина соединения; f – коэффициент трения.

Радиальное давление в свою очередь зависит от натяга H и модуля упругости E материала; его рассчитывают по формуле Ламе:

$$p = HE/(Cd). \qquad (1.13.2)$$

При этом константу C определяют по формулам:

для полимерных деталей в соединении с металлической охватываемой деталью

$$C_1 = \left[1+(r/R)^2\right]/\left[1-(r/R)^2\right]+\mu;$$

для полимерной детали в соединении с металлической охватывающей

$$C_2 = \left[1+(r/R)^2\right]/\left[1-(r/R)^2\right]-\mu,$$

здесь r, R – внутренний и наружный радиусы полимерного кольца; μ – коэффициент Пуассона.

Коэффициент трения зависит от многих факторов, в том числе от радиального давления. Для приближенных расчетов его принимают равным 0,15...0,25 при соединении полимерных деталей с полимерными, имеющими гладкие поверхностями; 0,05...0,15 при прессовом соединении полимерных деталей со стальными, имеющими гладкие поверхности; 0,2...0,5 при прессовом соединении полимерных деталей со стальными, грубообработанными или имеющими шероховатую поверхность. На усилие запрессовки при соединении полимерных деталей с металлическими оказывают влияние также размеры деталей. Усилие запрессовки линейно возрастает с увеличением длины контакта. При одной и той же толщине стенки полимерной детали с увеличением ее диаметра усилие запрессовки, приходящееся на единицу длины контакта, уменьшается нелинейно (рис. 1.13.1, *а*). Усилие запрессовки зависит также от толщины стенки (рис. 1.13.1, *б*).

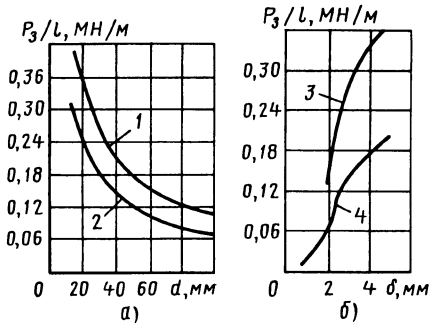


Рис. 1.13.1. Зависимость отношения P_3/l усилия запрессовки к длине соединения от диаметра d (*а*) и толщины δ (*б*) втулок, соединяемых с деталями из стали 45:
1 – капроновая втулка толщиной 5 мм,
2 – втулка из полиамида П-68 толщиной 4 мм,
3, 4 – втулки диаметром 24 мм соответственно из стеклопластика АГ-4 и полиамида П-68

Характер зависимости усилия запрессовки от натяга при разных диаметрах соединяемых поверхностей и толщинах стенок не зависит от типа ПМ. С увеличением натяга усилие запрессовки возрастает до определенного значения. При этом на поверхности эластичных термопластов (например, полиамидов) не наблюдается следов заметных разрушений, а на внутренней поверхности хрупких отвержденных реактопластов образуются трещины, и усилие запрессовки уменьшается.

На усилие запрессовки существенное влияние оказывает шероховатость поверхности металлической детали, поскольку с увеличением шероховатости возрастает коэффициент трения. При этом усилие запрессовки растет быстрее, чем коэффициент трения. Шероховатость же поверхности деталей из ПМ из-за их низкого модуля упругости и высокой эластичности не влияет на усилие запрессовки.

Для соединения деталей продольно-прессовым способом применяют универсальные или специальные прессы с ручным или механизированным приводом.

При соединении деталей поперечно-прессовым способом необходимо рассчитать температуру T нагрева охватывающей или охлаждения охватываемой детали соответственно:

$$\Delta d = \alpha(T - T_0)\, d_0, \qquad (1.13.3)$$

где Δd – задаваемое увеличение или уменьшение диаметра детали; α – температурный коэффициент линейного расширения; T_0 – начальная температура детали; d_0 – начальный диаметр детали.

При посадке крупногабаритных деталей, нагрев которых затруднен из-за опасности образования трещин и коробления, более эффективно охлаждение (например, жидким азотом).

При магнитно-импульсном методе выполнения прессового соединения размеры и форма деталей может претерпеть существенные изменения. Сущность метода заключается в сближении соединяемых деталей в результате отталкивания со скоростью 10...100 м/с металлической детали (в гибридной металло-полимерной конструкции) (рис. 1.13.2, *а*) или вспомогательного металлического элемента, например, из алюминиевой, латунной или медной фольги (в полимер-полимерной конструкции) (рис. 1.13.2, *б*), под влиянием импульсного магнитного поля, создаваемого индукционной катушкой, в сторону присоединяемой детали. При прохождении импульса тока большой силы от батареи конденсаторов C по индуктивности L (рис. 1.13.3) вокруг ее витков создается магнитное поле, которое в свою очередь наводит направленное против

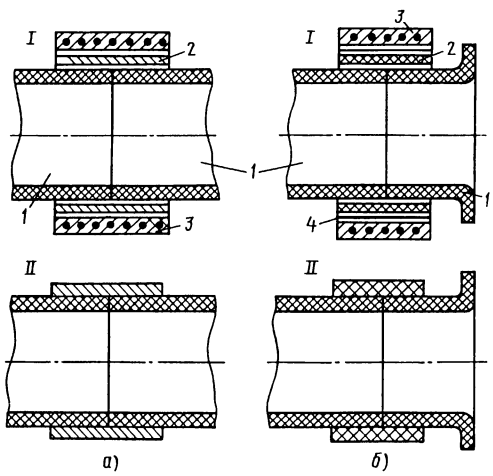


Рис. 1.13.2. Схема прессового телескопического соединения встык трубчатых деталей из ПКМ с помощью металлической (*а*) и из ПКМ (*б*) муфты магнитно- импульсным методом:
I – перед сборкой, II – после сборки;
1 – соединяемые детали, *2* – муфта, *3* – индуктор, *4* – деформирующийся металлический элемент

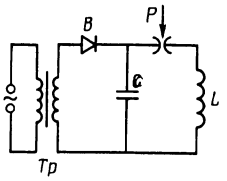


Рис. 1.13.3. Электрическая схема магнитно-импульсной установки:
Тр – трансформатор, *В* – выпрямитель; *Р* – разрядник, *С* – батарея конденсаторов, *L* – индуктивность

последнего магнитное поле в металлической детали или во вспомогательном элементе. Последний, являясь одноразовым технологическим средством, деформируется и создает давление на деталь из ПКМ. Поскольку во время высокоскоростного деформирования ПМ проявляет сверхпластичность, перед выполнением соединения магнитно-импульсным методом между сопрягаемыми участками может быть зазор, величина которого зависит от деформационных свойств ПКМ.

1.13.3. ЗАМКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Замковые соединения относят к одним из наиболее простых, экономичных и быстрых в выполнении способов соединения деталей из полимерных, особенно термопластичных, материалов друг с другом и с металлическими деталями.

Замковые соединения образуются в результате введения выступающей части (в виде буртика, утолщения, кулачка или шипа) одной из соединяемых деталей в полость (впадину, поднутрение, углубление, выточку) или за выступ другой детали. По принципу образования связи между деталями, а именно за счет особенностей формы их сопрягаемых участков, они близки к резьбовым соединениям, в которых витки резьбы (выступы) на одной из деталей или на винте входят в межвитковые полости на другой детали или гайке.

Замковые соединения деталей из ПМ постоянно развиваются и по своему конструктивному оформлению в настоящее время достаточно разнообразны. Конструкция соединения влияет на процесс сборки и на работоспособность собранного изделия. В зависимости от поведения материала деталей в процессе сборки могут быть выделены две группы:

соединения, выполняемые с деформированием сопрягаемых участков;

соединения, выполняемые без деформирования сопрягаемых участков.

К первой группе относят:

соединения с помощью кольцевых выступов и поднутрений на деталях цилиндрической формы (рис. 1.13.4);

соединения с помощью упругодеформирующихся (пружинящих) крючков (рис. 1.13.5), оформленных на одной из деталей, и полостей или выступов на другой детали;

соединение по сферическим поверхностям (рис. 1.13.6) и др.

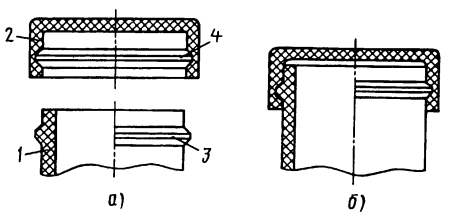


Рис. 1.13.4. Замковое соединение деталей цилиндрической формы:
а – перед сборкой; *б* – после сборки; *1* – деталь с кольцевым выступом, *2* – деталь с кольцевым поднутрением; *3* – кольцевой выступ, *4* – кольцевое поднутрение

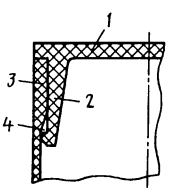


Рис. 1.13.5. Замковое соединение детали *1* типа "крышка", снабженной пружинящими крючками *2*, с корпусом *3*, в котором выполнены поднутрения *4*

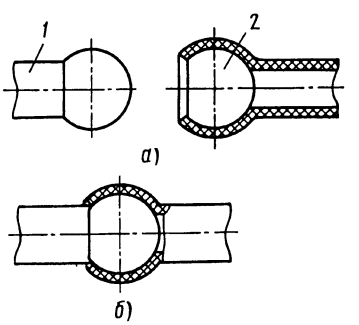


Рис. 1.13.6. Сферическое замковое соединение:
а – перед сборкой; *б* – после сборки; *1* – деталь с выступом; *2* – деталь с поднутрением

Технология замковых соединений весьма проста. Для их выполнения часто достаточно вручную приложить усилие, чтобы выступ вошел во впадину.

В отличие от прессовых соединений в замковых соединениях упругое деформирование сопрягаемых элементов происходит только во время сборки изделия или разъединении деталей. Оно вовсе отсутствует, когда детали из ПКМ соединяют с помощью замка "ласточкин хвост" (рис. 1.13.7), что позволяет осуществлять многократные сборку и разборку изделий. Технология соединений в этом случае незначительно отличается от технологии соединения металлических лопаток с металлическим диском.

Замковые соединения деталей из отверждающихся ПКМ с деталями из различных материалов могут быть образованы в процессе формования первых, например, методом намотки или в результате переформовывания неполностью отвержденной трубчатой заготовки магнитно-импульсным (см. выше) или другим подходящим методом с дальнейшим ее отверждением (рис. 1.13.8).

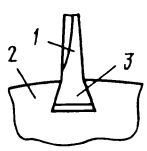


Рис. 1.13.7. Замковое соединение лопатки *1* из ПКМ с диском *2* с помощью замка типа "ласточкин хвост", *3* – трапециевидный хвостовик

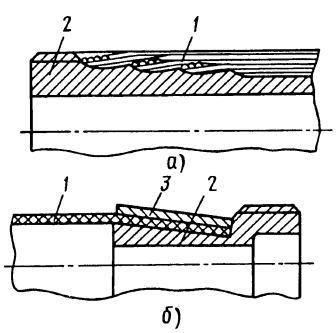


Рис. 1.13.8. Замковое соединение трубчатого стержня *1* из ПКМ с металлической законцовкой *2*, полученное методом приформовки намотанного препрега (*а*) или магнитно-импульсным методом (*б*), *3* – обжимающее металлическое кольцо

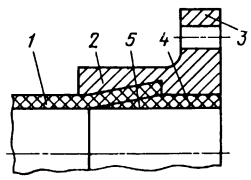


Рис. 1.13.9. Замковое соединение трубчатого стержня из ПКМ и металлического стакана

Замковое соединение трубчатого стержня из ПКМ с металлическим фланцем по схеме рис. 1.13.9 выполняют в такой последовательности. На конце не полностью отвержденного стержня *1* выполняют шесть продольных разрезов на длину около 50 мм, затем разрезанный конец вводят в стакан *2* с фланцем *3* и расширяют до соприкосновения с внутренней конической поверхностью, на которой оформлена насечка глубиной 0,5 мм и может быть нанесен слой связующего. Внутрь стержня вставляют втулку *4*, конический участок *5* которой прижимается к его разрезанной части. На наружную поверхность втулки может быть дополнительно нанесен клей. После сборки узел поступает на дальнейшее отверждение.

1.13.4. МЕХАНИЧЕСКОЕ КРЕПЛЕНИЕ

Механическое крепление нашло наибольшее применение при соединении деталей из конструкционных ПМ и в первую очередь ПКМ. Механическое крепление предпочитают другим способам соединения в следующих случаях: 1) при сборке изделий из деталей сравнительно больших сечений, тем более когда требование равнопрочности в альтернативном механическому креплению клеевом соединении делает необходимым применение больших поверхностей соединения; 2) при действии на соединение сосредоточенных нагрузок; 3) при необходимости обеспечить разъемность соединения; 4) при сборке деталей, изготовленных из материалов с различными физическими свойствами, когда невозможно осуществить сварку и трудно подобрать надежный клей; 5) при проведении монтажных работ для закрепления деталей и узлов на корпусных деталях.

При выборе механического крепления учитывают его эффективность при работе в условиях расслаивающих и отдирающих нагрузок, так как крепежные элементы в отличие, например, от клеевых прослоек позволяют

вовлечь в работу больший объем материала деталей, а также возможность контроля качества полученного соединения и быстроту его выполнения.

К преимуществам механического крепления относят возможность обеспечения заданной прочности непосредственно после сборки и получения подвижных соединений, а также довольно низкие затраты на оборудование.

Из способов механического крепления деталей из ПКМ наибольшее распространение получили заклепочные и резьбовые (болтовые и винтовые) соединения, отличающиеся друг от друга типом крепежных элементов и назначением.

Шарнирные и шплинтовые соединения, зубчатые пары и винтовые передачи в изделиях из ПМ выполняют по схемам, аналогичным схемам этих соединений в изделиях из металлов, с учетом свойств соединяемых материалов.

Общими признаками заклепочного, болтового и винтового соединений служат присутствие отверстий для крепежных элементов, а в технологическом процессе соединения – операции изготовления этих отверстий.

Одним из основных способов выполнения этих отверстий в деталях из ПКМ является механическая обработка.

Принципиально технологический процесс механической обработки ПКМ не отличается от соответствующего процесса механической обработки металлов: ему сопутствуют образование стружки, тепловыделение, возникновение силовых полей и т.д. Однако специфические свойства ПКМ оказывают влияние на выбор режимов резания и средств технического оснащения.

Из особенностей ПКМ, влияющих на их механическую обработку, основными являются следующие: низкая теплопроводность, если наполнитель не обладает теплопроводностью; низкая межслоевая прочность, если используется слоистый наполнитель; присутствие волокнистых и порошкообразных наполнителей, оказывающих абразивное действие на режущий инструмент; анизотропия механических свойств; низкая твердость полимерной матрицы; низкая теплостойкость; высокая податливость; низкая прочность при срезе; хрупкий характер разрушения; низкая термостойкость.

Из-за низкой теплопроводности ПКМ образующаяся в зоне резания теплота при удлиненном цикле работы поглощается инструментом, что приводит к сильному его нагреву и термическому отпуску. Поэтому при обработке больших поверхностей целесообразно применять обработку несколькими инструментами или работать при менее интенсивных режимах резания. Тяжелые тепловые условия резания ПКМ обусловливают интенсивное охлаждение инструмента. Однако охлаждение водой или эмульсиями, которыми пользуются при механической обработке металлов, может привести к ухудшению физико-механических и диэлектрических характеристик ПКМ. Поэтому остается пользоваться охлаждением струей сжатого воздуха. Перегрев обрабатываемого ПКМ может вызвать его размягчение, что явится причиной деформирования детали и/или прилипания полимера. Деструкция полимера в результате перегрева приводит к появлению в его структуре поверхностно-активных веществ, которые, смачивая поверхность инструмента, снижают поверхностную энергию металла и облегчают отрыв от его поверхности микро- и макрочастиц. Таким образом ускоряется износ инструмента. Подвергнутый нагреву слой ПКМ характеризуется повышенным уровнем остаточных напряжений растяжения. Релаксация эластических деформаций является причиной изменения размеров обрабатываемых деталей и обусловливает соответствующий выбор размеров инструмента.

Процесс резания ПКМ характеризуется образованием макротрещины в материале перед рабочей кромкой режущего инструмента и развитием этой трещины в нужном направлении с целью формирования стружки. Однако наряду с главной (доминирующей) трещиной в ПКМ образуется целая сетка мелких трещин, идущих в глубь материала и являющихся дефектом обработанной поверхности. Наибольшая склонность к образованию микротрещин и даже расщеплению слоистого ПКМ наблюдается при работе с недостаточно острым инструментом и при неправильно выбранных режимах резания. Большей склонностью к расслоению обладает углепластик, нежели органопластик, что объясняется большей чувствительностью к концентраторам напряжений первого, чем второго.

Более низкая по сравнению с металлами прочность ПКМ при срезе допускает высокие скорости резания и большие подачи.

Анизотропия механических свойств определяет различие режимов резания ПКМ в разных его направлениях и применение осо-

бых приемов, позволяющих обеспечить сохранность структуры материала.

Высокая упругость ПКМ приводит к восстановлению обработанной поверхности, в результате чего увеличивается площадь контакта инструмента с деталью, интенсифицируется износ задней его поверхности резания, увеличивается сила резания. Упругое восстановление обработанной поверхности отражается также на точности размеров. В связи с такими явлениями рекомендуется применение инструментов с бóльшим задним углом α резания, чем у инструментов для металлов. Кроме того, увеличение α дает возможность уменьшить радиус закругления режущей кромки, что при высокой податливости и сравнительно малой твердости ПМ способствует лучшему врезанию инструмента в обрабатываемый материал.

Ряд проблем возникает из-за высокой твердости наполнителей в некоторых ПКМ. Для их обработки требуется применять сверхтвердые инструментальные материалы.

Из всех способов механической обработки ПКМ наибольший интерес представляют способы, связанные с изготовлением отверстий и резьбы.

Отверстия для заклепок и болтов получают сверлением или просечкой (штамповкой).

Сверлением выполняют отверстия в толстостенных (более 6 мм) деталях и деталях, имеющих сложную форму, а также отверстия диаметром менее 4 мм в деталях, изготовляемых прессованием или литьем под давлением, так как тонкие оформляющие знаки пресс-форм и литьевых форм могут в процессе формования деформироваться.

Рекомендации по выбору геометрии сверл и режимов резания при сверлении отверстий в пластмассах достаточно широко освещены в литературе и приведены в гл. 1.9.

Штамповку с помощью инструментального штампа применяют для получения отверстий с ровной поверхностью среза в листовых стеклопластиках и других слоистых ПКМ диаметром не менее 75 % толщины листа. Отверстия меньшего диаметра имеют низкое качество вследствие высокой жесткости материала. Отверстия с ровными краями могут быть получены только при толщине листа до 2,5 мм, отверстия удовлетворительного качества получаются при толщине листа до 4 мм. Плиты толще 6,5 мм штамповке не подвергаются.

Для штамповки отверстий в стеклопластиках требуется оборудование с меньшей (примерно на 50 %) мощностью по сравнению с мощностью при штамповке стали. Поэтому холостой ход пробивного пуансона может быть равен половине холостого хода, принятого для стали. Принимая во внимание упругое последействие ПКМ, диаметр пуансона на 4...5 % больше диаметра отверстия. Облегчения вхождения пуансона и снижения силы резания путем последовательного разделения материала в зоне отверстия достигают, выполняя рабочую поверхность пуансона наклонной под углом около 10° к поверхности детали. Штамповку слоистых ПКМ толщиной 1...2 мм производят при нормальной температуре, а более толстых – после предварительного нагрева до температуры, зависящей от типа матрицы и толщины ПКМ. Диаметральный зазор между пуансоном и матрицей выбирают равным 1,2...3,8 % толщины листа.

Отверстия с ровными краями и с низким уровнем дефектов вокруг них можно достичь при использовании гидродинамической пробивки (ГДП) (штамповки). Принципиальное ее отличие от пробивки отверстий в инструментальном штампе состоит в отсутствии сил трения между пуансоном и матрицей. Сущность ГДП при использовании схемы, при которой в пробивном пуансоне генерируются упругие волны напряжений и деформаций, состоит в следующем (рис. 1.13.10). Деталь *1* укладывают на стол *2*, в котором размещена матрица *3*, и фиксируют силой *Q*, созданной стаканом *4*.

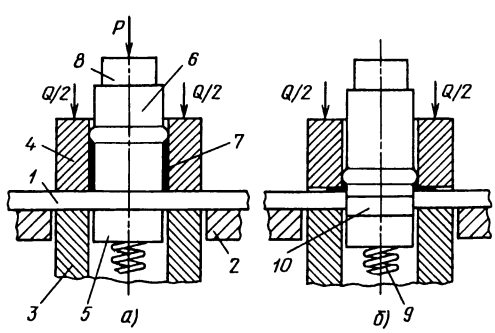


Рис. 1.13.10. Схема гидродинамической пробивки отверстия в слоистом ПКМ:
а – момент нанесения удара;
б – момент образования отверстия

В матрице и стакане выполнены соосные отверстия, диаметры которых равны. В полости матрицы установлен пуансон *5* подпора. Пробивной пуансон *6* размещен в полости стакана, в зазоре между ними находится вязкая среда *7*, например, смазка с тиксотропной добавкой или пастообразный клей. В момент нанесения удара усилием P со стороны бойка *8*, который разгоняется с помощью, например, индуктора магнитно-импульсной установки, по пуансону в нем возникает волна упругих напряжений и деформаций сжатия (рис. 1.13.10, *а*). Эта волна распространяется вдоль оси пуансона в сторону детали (для стали со скоростью 3000...5000 м/с) и перекрывает зазор с вязкой средой. Величина зазора выбирается с учетом физических характеристик пуансона так, чтобы происходило максимально возможное его перекрытие. Осуществляется сжатие вязкой среды, давление в ней резко повышается, в результате чего ею преодолевается сила прижима Q и происходит ее затекание в зазор между стаканом и деталью. Тем самым создается дополнительный импульсный прижим детали усилием P и предварительное ее радиальное растяжение. В момент, когда упругая волна достигнет торца пуансона, давление вязкой среды поднимается до максимального значения. По периметру пуансона зарождается трещина (рис. 1.13.10, *б*). Одновременно с ударной волной происходит небольшое осевое перемещение пуансона и вязкой среды. При этом упругий элемент *9* и пуансон подпора оседают вместе с отделенной таблеткой *10*.

Резьбу в полимерных деталях изготовляют механической обработкой или формованием (прессованием, литьем под давлением, накаткой). Выбор метода зависит от материала деталей, размера резьбы, серийности производства и наличия соответствующего оборудования.

1.13.4.1. ЗАКЛЕПОЧНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Заклепочные соединения образуют введением в совмещенные отверстия соединяемых деталей металлических или полимерных стержней, которые могут иметь одну (закладную) головку, и их последующим расклепыванием в заклепку.

К преимуществам применения заклепочных соединений относятся высокая производительность этого метода крепления, низкая стоимость крепежных элементов и оборудования, хорошая работоспособность шва при вибрациях, возможность исключить использование контровочных средств. Невозможность разборки узлов и наличие сквозных отверстий в конструкциях ограничивают области применения таких соединений. Недостатком можно также считать низкие стягивающие силы деталей, создаваемые некоторыми видами заклепок, например, из ПМ, что ограничивает применение заклепочных соединений только для тонкостенных деталей (толщиной менее 6 мм).

Учитывая такие специфические свойства ПМ, как низкая прочность при смятии и невысокая твердость, бóльшие (за исключением углепластиков и арамидопластиков), чем у металлов, температурные коэффициенты линейного расширения, а также ползучесть под нагрузкой, при выполнении заклепочных соединений деталей из этих материалов рекомендуется:

задавать бóльшие, чем при клепке металлов, допуски на отверстия для заклепок;

применять заклепки с крупными головками;

защищать поверхность ПМ прокладками под головками заклепок;

выбирать как можно большие поверхности соединения;

использовать по возможности низкие давления при обжимке деталей в зоне соединения и при расклепывании стержней.

Из-за высокой хрупкости ПМ с порошкообразным наполнителем применение для изделий из них заклепочных соединений сопряжено с большими трудностями.

Заклепочные соединения применяют для крепления эластичных термопластов (полиэтилена, политетрафторэтилена и др.) к металлам при защите металлов от коррозии или износа, а также при декоративней облицовке различных материалов этими термопластами, креплении последних с кожей, тяжелыми тканями, резиной, фиброй.

Построение технологического процесса клепки деталей из ПКМ зависит от типа заклепки, конструктивных особенностей изделия, свойств соединяемого материала и специфики производства.

Соединения металлическими заклепками. Основной особенностью клепки деталей из ПМ является бóльшая вероятность разрушения материала соединяемых деталей, чем при клепке металлов. После клепки в зоне шва появляются остаточные напряжения, релаксация которых ведет к ослаблению соединения.

Технология соединения деталей из ПМ с помощью металлических заклепок в целом аналогична технологии клепки металлических изделий.

Возможны три варианта технологического процесса: 1) обе детали имеют отверстия; 2) одна из деталей (преимущественно элемент каркаса) имеет отверстия, и по ним сверлят отверстия в другой детали; 3) обе детали без отверстий; в этом случае применяют самопробивающие заклепки или процесс ведут в такой последовательности: монтаж деталей в приспособлении, создание отверстий для контрольных болтов или заклепок, введение контрольных крепежных элементов, создание остальных отверстий, выполнение заклепочных соединений.

Процесс клепки включает в себя следующие операции и переходы: входной контроль качества отверстий; введение заклепок в отверстия совмещенных деталей, установку шайб; осадку выступающей из детали части стержня заклепки для получения замыкающей головки необходимой формы; контроль качества соединения.

Диаметр отверстий проверяют стандартизованным методом с помощью калибровочной пробки; он должен быть обычно на 0,1 мм больше диаметра выбранных заклепок. На кромках отверстий должны отсутствовать трещины, расслоения, разлохмачивания, выкрашивания и прочие повреждения ПКМ. У металических деталей, входящих в сборочный узел, не должно быть заусенцев, которые могут создать концентратор напряжений в детали из ПКМ.

Для защиты поверхности углепластика со стороны замыкающей головки укладывают металлические шайбы или наклеивают фольгу из титана.

При клепке деталей из ПМ и, в частности, из ПКМ наиболее распространена плоская замыкающая головка. Если длина стержня для замыкающей головки равна его диаметру, то не происходит слишком сильного расклепывания замыкающей головки и можно избежать больших сжимающих напряжений, действующих на материал.

Разброс значений толщины пластмассовой детали вдоль заклепочного шва оказывает большое влияние на процесс клепки и прочность соединения. Длина участка стержня заклепки для оформления замыкающей головки должна назначаться применительно к номинальной толщине детали из ПКМ. При толщине детали, большей номинальной, образуется неполная головка, а при толщине детали, меньшей номинальной, – увеличенная, что вызывает перенапряжение материала. Поэтому при конструировании ответственных соединений необходимо либо установить допуски на толщину детали, либо сохранить постоянной длину стержня заклепки для замыкающей головки.

При подготовке к клепке хрупких ПМ следует обеспечить расположение осей отверстий под прямым углом к поверхности детали, чтобы исключить локальные перенапряжения материала. Из зоны контакта соединяемых деталей должны быть удалены с помощью щеток или пылесосов инородные тела, препятствующие плотному их контактированию.

В соединениях ПКМ с металлами или другими материалами замыкающую головку оформляют со стороны детали, выполненной из более прочного и твердого материала. При соединении листов различной толщины потайные головки заклепок располагают со стороны листа большей толщины, а выступающие – со стороны более тонкого листа.

Важнейшая стадия процесса клепки – осадка заклепки. Можно выделить три этапа осадки заклепки. На первом этапе происходит равномерная осадка стержня до полного заполнения им отверстия (рис. 1.13.11, *а*).

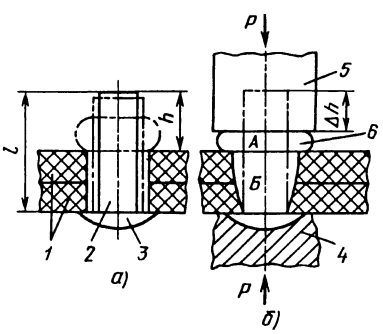


Рис. 1.13.11. Схема осадки стержня заклепки при формировании замыкающей головки:
а – равномерная осадка стержня; *б* – завершающая стадия; *1* – соединяемые детали; *2* – заклепка; *3* – закладная головка; *4* – поддержка, *5* – обжимка; *6* – замыкающая головка, *P* – усилие клепки; Δh – осадка стержня

Второй этап соответствует началу изменения схемы деформирования стержня. Необходимым условием для начала образования замыкающей головки является создание усилия клепки P, достаточного для деформирования стержня в области замыкающей головки. После достижения такого усилия начинается заключительный этап, и образуются две зоны с различными скоростями течения материала заклепки: первая – зона $А$ замыкающей головки, вторая – зона $Б$, заключенная в пакет (рис. 1.13.11, $б$). После завершения осадки материал вокруг отверстия находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, существенно влияющем на несущую способность заклепочных соединений. С увеличением степени деформирования (раздачи) отверстия значительно снижаются прочность и долговечность заклепочных соединений, поэтому клепку необходимо проводить так, чтобы деформация ПКМ была минимальной. Критическая величина $H_{кр}$ натяга крепежных элементов в отверстии детали из стеклопластика составляет 1...3 %, что несколько меньше $H_{кр}$ для матриц на основе наиболее распространенных связующих. Для углепластиков $H_{кр}$ = 1 %, что сопоставимо с предельными деформациями волокон. В то же время не должно быть посадки стержня заклепки с зазором, так как при нагружении заклепочного соединения в результате перекоса заклепки возможно повреждение ПКМ.

Деформации при клепке зависят от свойств соединяемых материалов и материала заклепки, параметров заклепочного соединения и способа клепки.

По характеру деформирования стержня клепку подразделяют на ударную, прессовую и клепку раскатыванием.

Ударную клепку выполняют преимущественно пневматическими клепальными молотками, выбираемыми в зависимости от диаметра и материала заклепки; молоток совершает 1300...1800 ударов в минуту при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа.

Ударную клепку в зависимости от расположения клепального молотка по отношению к замыкающей головке можно выполнять прямым или обратным способами.

При клепке прямым способом удары молотка наносят со стороны замыкающей головки, при этом поддержка находится со стороны закладной головки. Такой способ клепки предпочтителен при постановке заклепок с потайными закладными головками, так как в случае клепки этих заклепок обратным способом при малейшем наклоне обжимки молотка на поверхности ПМ образуется вмятина или царапина.

При клепке обратным способом поддержка располагается со стороны замыкающей головки, что облегчает контроль процесса ее образования. Кроме того, при работе клепальным молотком со стороны закладной головки предотвращается соскальзывание обжимки на ПМ. Все это существенно снижает напряжения в материале деталей и почти полностью исключает его повреждение в зоне отверстия.

Ударная клепка не может обеспечить воспроизводимых показателей качества соединений деталей из ПКМ; она не пригодна для соединения титановыми заклепками из-за растрескивания замыкающей головки.

Альтернативой ударной клепке служит ударно-импульсная клепка, впервые разработанная фирмой Grumman и при которой высокоскоростные удары на выступающую часть стержня создаются путем ускорения бойка в магнитном поле индуктора магнитно-импульсной установки. Деформирование материала заклепки происходит под влиянием волны напряжений, перемещающейся с высокой скоростью вдоль оси заклепки. Эти напряжения заставляют материал течь во все стороны равномерно, проявляя высокую пластичность. После равномерного заполнения отверстия материалом стержня заклепки происходит "перехват" последнего, и начинается формирование замыкающей головки. Посадка стержней заклепок в отверстия деталей из ПКМ происходит с натягом около 0,2 мм. Ударно-импульсная клепка характеризуется бесшумностью, возможностью регулирования параметров клепки в широком интервале, стабильностью и воспроизводимостью параметров. Она может быть применена для выполнения соединения титановыми и стальными заклепками. Высокое качество соединения объясняется минимальным разрушением ПКМ в зоне отверстия. Ограничивают ее использование более высокая стоимость и сложность в обслуживании оборудования.

Прессовая клепка обладает рядом преимуществ по сравнению с ударной клепкой, осуществляемой клепальными молотками: облегчаются условия труда операторов, так как меньше затрачивается ручной силы и отсутствуют вибрации и шум; появляется возможность частично механизировать процесс; уменьшается вероятность повреждения поверхности ПКМ; обеспечивается высокая прочность и стабильность свойств вдоль швов;

создаются условия организации поточной сборки, а следовательно, и повышается производительность труда при сборке. Однако прессовую клепку сложно организовать при выполнении сборки изделия на стапеле.

Прессовую клепку производят на стационарных прессах для групповой или одиночной клепки или с помощью переносных клепальных прессов. Тип пресса выбирают с учетом формы и размеров собираемого изделия, а также давлений, необходимых для образования замыкающих головок.

Давление p, необходимое для формования из монолитного стержня заклепки выступающей замыкающей головки при условии, что оно идет на пластическое деформирование стержня заклепки и преодоление сопротивления склепываемого материала, можно найти по формуле

$$p = \left\{\sigma_p / [1-\varepsilon_p)\varepsilon_p^n (1+n)]\right\}[1+0{,}2(1+\psi)\times$$

$$\times(1+n)]\varepsilon_z^n + 0{,}33\psi\sigma_{сж} R/h, \qquad (1.13.4)$$

где σ_p – разрушающее напряжение материала заклепки при растяжении; ε_p – относительная деформация при растяжении, отвечающая моменту образования устойчивой шейки; для алюминиевых сплавов ε_p = 0,16, а для сталей марок 10 и 15 ε_p = 0,20; $n = \varepsilon_p / (1 - \varepsilon_p)$; $\psi = f + 1/4\,[R/l\,(1-f)f^{1/2}]$ (здесь f – коэффициент трения металла по ПКМ, для стеклопластиков f = 0,25...0,33; l – длина стержня заклепки, R – наружный радиус стержня заклепки); ε_z – относительная деформация выступающей части стержня заклепки: $\varepsilon_z = \Delta h/h$ (см. рис. 1.13.11); $\sigma_{сж}$ – разрушающее напряжение ПКМ при сжатии в направлении, перпендикулярном соединяемым поверхностям; h – длина стержня для замыкающей головки.

Необходимое давление клепки возрастает, если оформляется потайная замыкающая головка; желательно ее оформлять из пустотелого стержня. Давление при осадке таких стержней рассчитывают по формуле

$$p = \left\{\sigma_p / 3^{1/2}[1-\varepsilon_p)\varepsilon_p^n (1+n)]\right\}[B + (1+n)R(1+\psi m)/3h]\varepsilon_z^n + 0{,}33\psi\sigma_{сж} R_г / h + \sigma_{rcp} h_г / h, \quad (1.13.5)$$

где $B = \left(3+\varphi^4\right)^{1/2} - 2\varphi^2 + \varphi^2 \ln\left\{\left[\varphi^2 + (3+\varphi^4)^{1/2}\right]/3\right\}$; $m = 1 - 3\varphi^2 + 2\varphi^3$

(здесь $\varphi = r/R$; r – внутренний радиус стержня заклепки); $R_г$ и $h_г$ – соответственно радиус и высота головки заклепки); $\sigma_{rcp} = (H/q)[K - \mu_{12} + N(\sin^2\alpha + K\cos^2\alpha)]$ (здесь H – натяг стержня в отверстии; $q = (1 - \mu_{12}\mu_{21})E_2 + K/G$; $K = (E_1/E_2)^{1/2}$; μ_{12} и μ_{21} – коэффициенты Пуассона для ПКМ в двух взаимно перпендикулярных направлениях; $N = [(2K - \mu_{12}) + (E_1/G)]^{1/2}$; α – угол радиуса-вектора точки, в которой определяют напряжение σ_{rcp}; G – модуль сдвига ПКМ в плоскости, перпендикулярной к оси заклепки; E_1, E_2 – модули упругости при растяжении ПКМ в двух взаимно перпендикулярных направлениях).

На основании результатов, полученных при расчетах по формуле (1.13.5), было установлено, что существует область оптимальных значений отношений R/h и r/R. При равенстве этих значений 0,5...0,6 обеспечивается заполнение гнезда материалом заклепки и образование потайных замыкающих головок.

Приняв в формуле (1.13.5) φ = 0, получим выражение для расчета давления клепки монолитных заклепок.

Анализируя формулу (1.13.4) можно прийти к выводу, что давление при клепке стеклопластиков без применения шайб несколько меньше, чем при клепке легких сплавов. Однако при клепке без подкладок под замыкающую головку возможно незначительное искривление слоев наполнителя в слоистом ПКМ под влиянием заклепки, что указывает на некоторое смятие материала в процессе выполнения соединения. В связи с этим рекомендуется увеличивать опорную поверхность головки заклепки. Кроме общей подкладки под все заклепки, применяют шайбы под каждую заклепку. Шайбы в процессе клепки распределяют давление на бóльшую поверхность, а в процессе эксплуатации уменьшают опасность того, что ПКМ по краю отверстия раскрошится. Для получения плотных швов применяют выпуклые в сторону головки шайбы, которые после клепки создают осевое натяжение заклепки.

Давление при клепке стеклопластиков с применением шайб и давление при клепке легких сплавов одинаково для одних и тех же марок материала заклепок.

Недостатком клепки прессовым способом является значительная деформация стержня в зоне отверстия, особенно при получении потайной замыкающей головки. При этом может произойти разрушение материала соединяемых деталей, а при клепке тонкостенных деталей – его выпучивание; кроме того, этим методом нельзя создать подвижные шарнирные соединения. Можно несколько облегчить клепку, проводя осадку стержня в два приема.

Одним из наиболее эффективных путей снижения деформации ПКМ в процессе их клепки является уменьшение давления, необходимого для осадки стержня заклепки. Достичь этого можно, используя полупустотелые заклепки (табл. 1.13.1) или специальные заклепки, например, изготовленные инерционной сваркой трением титанового стержня, имеющего потайную закладную головку, с полым стержнем из более пластичного сплава Ti и Nb для замыкающей головки. Для формования потайной замыкающей головки с углом 90° у полупустотелой заклепки требуется усилие в два раза более высокое, чем при формовании плоской головки.

Используя ультразвуковые колебания рабочего инструмента, подсоединенного, например, к преобразователю типа ПМС 15А-18, питаемого от ультразвукового генератора типа УЗГ 10У, можно снизить давление клепки, а в результате этого и натяг заклепки в отверстии детали из ПКМ.

Давление клепки можно снизить, применяя ***клепку раскатыванием***. Однако при раскатывании оправкой, оснащенной с торца двумя или тремя роликами, поверхность головки имеет низкое качество, а сами ролики быстро изнашиваются.

Устранить недостатки, характерные для описанных методов, удается, применяя клепку орбитальным методом, являющимся разновидностью метода клепки раскатыванием.

Орбитальный метод клепки имеет следующие преимущества: осевое усилие расклепывания меньше, чем при остальных методах, что позволяет полностью предотвратить деформирование стержня заклепки и таким образом снизить нагрузку на ПКМ и выполнить подвижные шарнирные соединения; опорные части приспособлений и станков испытывают меньшие нагрузки; снижаются вибрации и шум; появляется возможность использовать заклепки диаметром 0,76...19 мм, в том числе из коррозионно-стойких сталей (например, марки 12Х18Н9Т). Давление осадки снижается путем последовательного деформирования небольших по объему участков стержня заклепки.

Клепку орбитальным методом подразделяют на круговую, при которой пуансон в процессе работы покачивается, но не вращается вокруг своей оси, и радиальную, при которой пуансон совершает равномерное планетарное движение, одновременно вращаясь вокруг собственной оси и перемещаясь по круговой орбите.

Первый вариант проще в осуществлении и пригоден для выполнения 95 % всех встречающихся видов заклепочных работ. Второй вариант связан с усложнением конструкции применяемого оборудования.

При круговой клепке ось инструмента описывает в пространстве поверхность прямого кругового конуса с вершиной в точке *А* (рис. 1.13.12, *а*), лежащей на оси вращения шпинделя. При таком перемещении инструмента исключается возникновение сил трения в зоне контакта инструмента с заклепкой. Материал заклепки смещается в радиальном направлении, при этом толщина деформируемого слоя стержня за один проход инструмента невелика.

1.13.1. Влияние диаметра полупустотелой заклепки на величину усилия *Р* прессовой клепки при формовании плоской замыкающей головки

Материал заклепок	*Р*, кН, для диаметров			
	3,0 мм	3,5 мм	4,0 мм	5,0 мм
Алюминиевый сплав В-65	6,5	10,5	12,8	22,0
Сталь 15	7,0	13,0	15,5	25,5

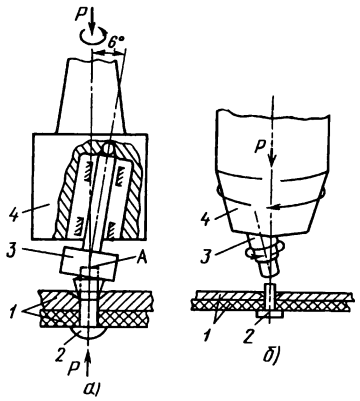


Рис. 1.13.12. Схема круговой (*а*) и радиальной (*б*) клепки:
1 – соединяемые детали; 2 – заклепка, *3* – инструмент, *4* – шпиндель установки

Таким образом, создание напряжений, превышающих предел текучести, в деформируемом материале обеспечивается малой площадью контакта рабочей поверхности инструмента с поверхностью стержня заклепки, что приводит к уменьшению в 6 – 9 раз усилий осадки по сравнению с прессовым методом (табл. 1.13.2).

Уменьшение усилия осадки позволяет получить соединение с величиной натяга (при выполнении соединения заклепками из легированной стали 12Х18Н9Т радиальный натяг в зоне замыкающей головки не выше 0,6...1,0 %), не превышающей $H_{кр}$, что в итоге обеспечивает более высокие прочность, выносливость и долговечность соединений по сравнению с такими же характеристиками соединений, полученных при клепке другими способами. При меньшей степени увеличения диаметра заклепки требуется меньший зазор между стержнем и стенками отверстия.

При радиальной клепке (рис. 1.13.12, *б*) происходит бесшумное смещение материала головки в трех взаимно перпендикулярных направлениях под воздействием инструмента, совершающего радиальное и тангенциальное движения. При этом только небольшая площадь головки заклепки контактирует с инструментом при его перемещении по одной из петель гипоциклоиды. Продольная ось инструмента пересекает по центру ось замыкающей головки заклепки. При таком деформировании разрушающее напряжение металла заклепки и его микроструктура не меняются, форма головки получается правильной, и брак практически отсутствует.

Радиальная клепка может быть использована для формования головок у заклепок из черных и цветных металлов. При этом обеспечивается более высокое качество соединения. Продолжительность клепки в зависимости от размера и формы головки составляет несколько секунд. При радиальной клепке затрачиваются усилия, на 10...20 % меньшие, чем при круговой клепке. Поэтому такую клепку можно применять для хрупких, тонких и слоистых материалов и для термопластичных КМ (ТКМ). Так как в процессе клепки происходит разогрев материала заклепки, чтобы исключить деформирование ТКМ, детали после соединения необходимо выдержать под давлением в течение около 10 с для охлаждения головки заклепки.

1.13.2. Влияние способа клепки стеклопластика* марки ТСУ 8/3 ВМ-78 толщиной 2 мм на величину усилия *P* осадки стержня заклепок из различных металлов**

Материал заклепок	*P*, кН	
	при прессовом способе	при круговом способе
Алюминиевый сплав В-65	37,8	4,2
Сталь 15	40,4	4,7
Сталь 12Х18Н9Т	49,6	8,6

* На основе связующего ЭДТ-10 и стеклоткани ТСУ 8/3 ВМ-78.
** Диаметр 3 мм, длина 9 мм.

Радиальная клепка применяется для образования головок у мелких заклепок.

Расклепывание пустотелых и полупустотелых заклепок, за исключением двухсторонней потайной клепки, заключается в "статическом" развальцовывании выступающего над поверхностью детали трубчатого конца заклепки.

Выбор способа постановки заклепок для односторонней клепки и инструмента зависит от типа заклепки (рис. 1.13.13). Для образования замыкающих головок у заклепок с сердечником используют специальные ручные клещи или пневморычажные прессы, при помощи которых последний вытягивается при одновременном прижиме закладной головки заклепки к детали. Обрыв стержня идет по перемычке. Сердечник заклепки, показанной на рис. 1.13.13, *а*, вытягивается из тела заклепки, но не обрывается. Выступ конца сердечника удаляется последующей механической обработкой. Специально разработанные для соединения податливых материалов заклепки для односторонней клепки (рис. 1.13.14) дают возможность получать плотное соединение, избегать растрескивания, расслоения и выпучивания ПКМ и возникновения больших остаточных напряжений.

Сердечник заклепки, изображенной на рис. 1.13.13, *д*, приводится во вращение специальным инструментом. В результате стенка тела заклепки расширяется с образованием замыкающей головки.

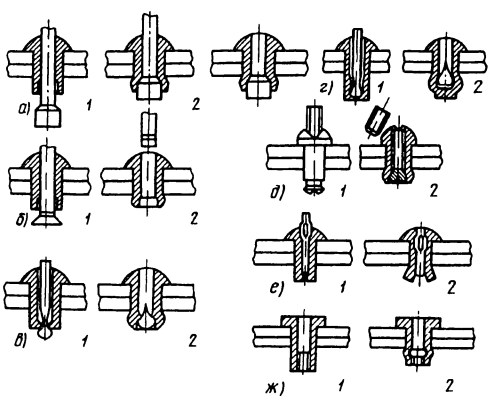


Рис. 1.13.13. Схема расклепывания заклепок при односторонней клепке:
с необрываемым сердечником (*а*); *с* проходящим насквозь сердечником (*б*), с обрываемыми сердечниками (*в, г*), с резьбовым развальцовывающим сердечником (*д*); с вбиваемым штифтом (*е*) и типа гайка-пистон (*ж*)

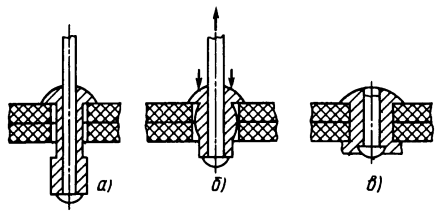


Рис. 1.13.14. Схема плотной постановки заклепок при односторонней клепке:
а – заклепка введена в отверстие;
б – процесс расклепывания; *в* – готовое соединение

Заклепки с вбиваемым штифтом (рис. 1.13.13, *е*) расклепывают, прикладывая осевую силу к штифту, который, входя в тело заклепки, раздвигает ее выступающую разрезную часть.

Для постановки заклепок типа гайка-пистон (рис. 1.13.13, *ж*) применяют, например, переносной гайковерт пистолетного типа с наконечником, имеющим резьбу. Наконечник ввертывают в резьбовое отверстие пистона, который вставляют в отверстие склепываемого пакета или в отверстие одной из деталей (в основном из ПКМ в комбинированных узлах), входящей в узел. Замыкающая головка образуется в результате поворота инструмента с наконечником вокруг оси пистона при одновременном прижиме инструмента к закладной головке заклепки. Резьба при этом повреждается не полностью; не менее шести ниток остается целыми, что позволяет использовать заклепку в качестве гайки для резьбового соединения склепанных деталей с элементом жесткости. Винт закрывает отверстие и повышает прочность заклепки при срезе.

Соединения полимерными заклепками. Известные способы соединения деталей заклепками из реактопластов имеют много недостатков. Основной из них – низкая производительность, которая ограничена большой длительностью отверждения материала заклепок. Формование замыкающих головок у заклепок из термопластов проводят "на холоду" или при нагреве.

В случае холодной (при температуре 18...23 °С) клепки с помощью полимерных крепежных элементов замыкающая головка образуется из конца стержня заклепки или имеющегося на детали выступа при приложении к ним сжимающего напряжения, превышающего предел $\sigma_т$ текучести материала, равный (в МПа):

Полиметилметакрилат	40...60
Поливинилхлорид	35...56
Полисульфон	70...80
Поликарбонат	56...63
Полиамид 6	77...85
Полиэтилен НП	9...10
Полиэтилен ВП	22...26
Полипропилен	15...25
Полиамид 6,6	49
Полиформальдегид	50...75

В принципе крепежные элементы для холодной клепки можно изготовлять практически из всех конструкционных термопластов, в том числе наполненных волокнами. Но по комплексу физико-механических свойств лучшими являются кристаллизующиеся термопласты с высоким уровнем вынужденной эластичности, в частности, полиформальдегид и полиамид.

Длина стержня, необходимая для образования замыкающей головки, зависит от его диаметра и типа материала и может быть рассчитана из условия равенства объема головки объему выступающей части стержня при отношении диаметра головки к ее высоте, равном 2 : 1.

Сжатие соединяемого пакета удобно осуществлять подпружиненным полым стаканом, в котором перемещается пуансон, осаживающий головку заклепки (рис. 1.13.15).

Ниже приведены значения усилий сжатия $P_{сж}$ склепываемого пакета и осадки $P_{ос}$ головки для заклепок из полиформальдегида различных диаметров:

d, мм	2	3	4	5	6	8	10
$P_{сж}$, Н	200	450	800	1200	2000	3000	5000
$P_{ос}$, Н	400	900	1600	2400	4000	6000	10000

Преимуществом холодной клепки является высокая производительность процесса. Однако соединения, полученные холодной клепкой, чувствительны к изменениям температуры и могут ослабевать в результате релаксации эластических деформаций в стержне заклепки. Кроме того, при проведении процесса возможно ухудшение механических свойств материала заклепки.

Более стабильное по свойствам соединение получается, если расклепыванию подвергают полую часть стержня. При этом образование головки происходит при меньшем усилии, в результате чего тело крепежного элемента в меньшей степени подвергается эластическим деформациям, которые релаксируют после снятия давления.

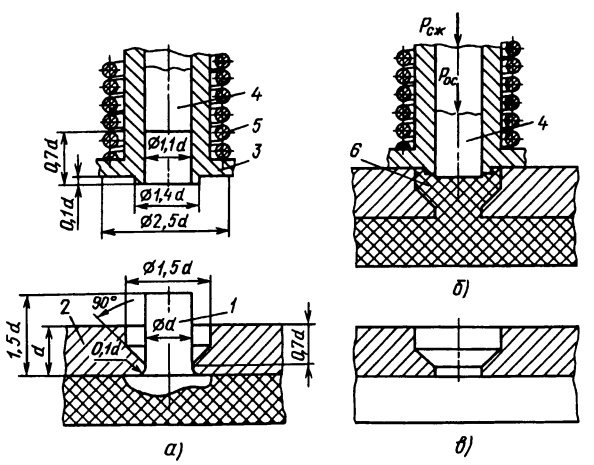


Рис. 1.13.15. Схема холодной клепки с помощью термопластичных заклепок и соотношение размеров соединения и клепального инструмента:

а – положение перед клепкой, *б* – оформление (осадка) замыкающей головки; *в* – готовое соединение; *1* – стержень на пластмассовой детали; *2* – присоединяемая деталь; *3* – направляющий стакан; *4* – пуансон; *5* – пружина; *6* – замыкающая головка

Соединение, более устойчивое к нагреву, получают, осуществляя клепку при повышенных температурах. Восстановление первоначальной формы стержня не наблюдается, если образование головки термопластичной заклепки проводить при нагреве выступающей части стержня до температуры текучести материала. При клепке таким способом исключается ползучесть пластмассовой детали в отличие от расклепывания при нормальной температуре.

Замыкающие головки у термопластичных заклепок или шипов, отформованных за одно целое с деталью из ПКМ, можно оформлять при помощи открытого пламени, струи нагретого газа, лазерного излучения, нагретого инструмента или инструмента, к которому подведен ток высокой частоты.

Из способов горячей клепки полимерными заклепками наибольшее распространение получила клепка с помощью ультразвука (УЗ). Этот метод обеспечивает наиболее высокую производительность и возможность механизации и автоматизации процесса сборки (скорость соединения приблизительно в 2 раза больше, чем при формовании нагретым инструментом).

Клепка с помощью УЗ заключается в размягчении и деформировании полимерного стержня инструментом, поверхность рабочего конца которого подобна поверхности замыкающей головки. Превращение механической энергии УЗ-колебаний в тепловую происходит в ограниченном объеме полимерного стержня. При этом сам инструмент остается холодным, что способствует быстрому охлаждению размягченного материала головки. То, что после достижения температуры текучести тепловыделение в головке заклепки прекращается, является важным преимуществом УЗ-клепки, поскольку благодаря этому предотвращается термическое разложение материала заклепки.

Для ускорения образования головки рабочий конец УЗ-инструмента в начале клепки соприкасается со стержнем по линии (по окружности торца стержня) или в точке (в центре основания). В зависимости от этого инструмент имеет сферическую рабочую поверхность и оформляет полукруглую замыкающую головку (рис. 1.13.16, *а* и *б*) или выступ и оформляет развальцованную полутороидальную замыкающую головку (рис. 1.13.16, *б* и *в*). Такая рекомендация касается прежде всего стержней из термопластов, наполненных стекловолокном в количестве 15...20 % (масс. доля).

Полукруглую головку можно оформить для стержней диаметром 1 – 3 мм из жестких и эластичных термопластов, а полутороидальную – для стержней диаметром 3 – 10 мм. Оформляя в инструменте несколько полостей, можно выполнять так называемую групповую клепку, при которой оформляется одновременно несколько замыкающих головок.

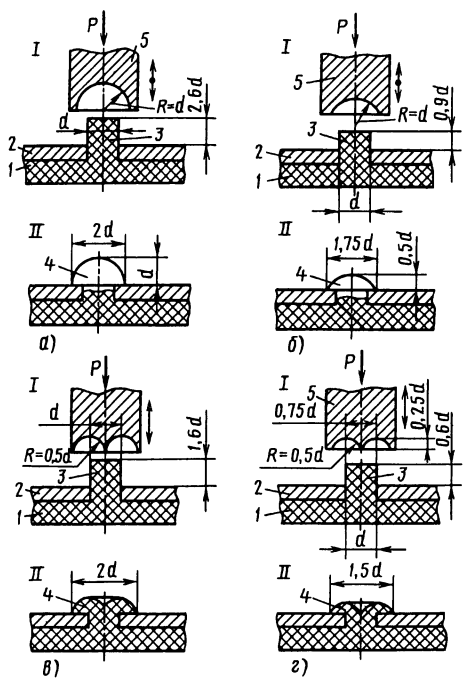


Рис. 1.13.16. Схема ультразвуковой клепки термопластичных стержней с образованием полукруглой (*а*, *б*) или полутороидальной (*в*, *г*) замыкающих головок:

I – положение деталей и инструмента перед расклепыванием; II – собранный узел; *а*, *в* – нормальный профиль головки; *б*, *г* – низкий профиль; *1* – деталь из ТКМ; *2* – присоединяемая деталь; *3* – стержень; *4* – головка заклепки; *5* – инструмент

Опытные и мелкосерийные работы по УЗ-клепке можно выполнять с помощью инструментов конической или экспоненциальной формы из сплава AlCu4Mg1. В серийном производстве хорошо себя зарекомендовали инструменты из Ti-сплавов. При больших нагрузках и износе инструмента применяют насадки из твердого металла.

Параметры УЗ-клепки (амплитуда колебаний инструмента или потребляемая мощность УЗ-генератора, продолжительность, осевое усилие на стержень) зависят от формы головки, материала и диаметра стержня заклепки (табл. 1.13.3).

Амплитуда колебаний инструмента при клепке составляет 15...100 мкм. Потребная мощность при клепке инструментом с выступом, создающим полутороидальную поверхность головки (см. рис. 1.13.16, *в*), в течение 1 с составляет 215 Вт, а осевое усилие осадки инструментом стержня – 640 Н.

УЗ-клепку наиболее широко используют для соединения полимерных деталей с металлическими деталями или с деталями из реактопластов. Полученные соединения имеют небольшие остаточные напряжения, способны работать при высоких нагрузках и малочувствительны к изменениям температуры.

1.13.3. Параметры ультразвуковой клепки термопластичными заклепками с полукруглой головкой нормального профиля (см. рис. 1.13.16, *а*) для различных диаметров стержней*

Материал заклепки	Диаметр стержня, мм					
	2,0		2,5		3,0	
	N	P_{oc}	N	P_{oc}	N	P_{oc}
Линейный полиэфир	100	220	124	340	150	280
Полиамид	86	210	107,5	320	129	280
Полиамид, наполненный стекловолокном	81,5	210	102	320	122,5	270
Поливинилхлорид	54,5	180	68	300	81,5	260
Поликарбонат	–	–	85	320	102,5	280
Полиметилметакрилат (литьевой)	54,5	180	68	310	81,5	260
Полипропилен	63,5	190	79	300	95	260
Полистирол	45	170	56,5	300	68	250
Полиформальдегид	90	220	113	320	136	280
Полиэтилен	54,5	180	68	300	81,5	260
Производные целлюлозы	54,5	180	68	300	84,5	260
Сополимер АБС	54,5	170	56,5	300	68	250
Сополимер стирола и акрилонитрила; полистирол, наполненный стекловолокном	50	180	62	310	75	260

* Продолжительность клепки стержней диаметром 2 и 2,5 мм составляет 1 с, а диаметром 3 мм – 1,5 с

Примечание N – мощность электрических колебаний, Вт, P_{oc} – усилие осадки стержня заклепки, Н.

С помощью ультразвука можно расклепывать не только монолитные, но и полые термопластичные стержни. Детали из термопластов можно соединять с помощью термопластичных заклепок по принципу сварки, т.е. приваривая стержень, имеющий замыкающую головку. Для УЗ-клепки применяют то же оборудование, которое используется для сварки, склеивания и запрессовки металлических деталей в полимерные с помощью УЗ.

1.13.4.2. БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Болтовые соединения применяют вместо заклепочных, если соединяемые детали нуждаются в периодической замене или в ремонте, а также если толщина их стенок более 4...6 мм. Болтовые соединения хорошо выдерживают статические нагрузки. Они могут быть использованы также в конструкциях, испытывающих динамические нагрузки, если есть возможность предотвратить самоотвинчивание гаек. Болтовые соединения вместо винтовых рекомендуется применять тогда, когда требуются большие стягивающие усилия и при этом в соединяемых деталях допускаются сквозные отверстия.

Надежная работа болтовых соединений зависит от правильности выбора крепежных элементов (в том числе их геометрических размеров и материала) конструкции соединения. Технология болтовых соединений обеспечивает реализацию конструкторских решений и влияет на сохранение свойств ПКМ в зоне расположения болтов.

Крепежные элементы. Для крепления ПКМ применяют стандартные болты из углеродистой стали, а для тяжело нагруженных соединений – болты из легированных сталей (например, марки 30ХГСА). Для повышения коррозионной устойчивости стальные крепежные элементы иногда покрывают кадмием, цинком, никелем или хромом.

Титановые сплавы благодаря их низкой плотности (на 40 % меньшей, чем у стали), высокой прочности при срезе, а также коррозионной стойкости к агрессивным средам широко используют для изготовления крепежных элементов, применяемых при сборке элементов летательных аппаратов. В отличие от алюминиевых, медных, покрытых кадмием стальных крепежных элементов титановые болты обладают гальванической совместимостью с углепластиком. Причем они могут быть покрыты серебром или фторопластом-4 (если давление на болты невелико). В баллистических ракетах и космических аппаратах применяют бериллиевые болты.

Для облегчения конструкций применяют полые болты диаметром 6...50 мм, у которых при той же массе, что и у монолитных болтов, площадь, работающая на смятие, больше.

К преимуществам полимерных болтов по сравнению с металлическими относят отсутствие требований к специальной обработке или защите против коррозии, хорошие тепло- и электроизоляционные характеристики, небольшую массу, что позволяет использовать их в производстве летательных аппаратов и средств транспорта. Крепежные элементы из ПМ во многих случаях прозрачны в диапазоне радиочастот и поэтому эффективны в оборудовании обнаружения летательных аппаратов.

Крепежные элементы можно изготовлять из термопластов и реактопластов.

Крепежные элементы из термопластов. Крепежные элементы из полиамидов способны стопориться без контровочных средств. Они стойки к действию слабых кислот, масел, жиров и многих растворителей. Их применяют в качестве соединительных элементов технологического оборудования в пищевой и химической промышленности. Полиамидные винты и гайки больших размеров несколько дороже стальных или латунных, но дешевле крепежных элементов из коррозионно-стойкой стали. Мелкие крепежные элементы из полиамидов дешевле металлических.

Из поливинилхлорида изготовляют болты, эксплуатирующиеся на открытом воздухе и в контакте с минеральными кислотами.

Политетрафторэтилен применяют для получения болтов, используемых в различных конструкциях специального назначения. Для них характерны высокая химическая стойкость и термостойкость (200 °С), но низкая прочность при растяжении. Большей жесткостью и сопротивлением ползучести обладают крепежные элементы из полиформальдегида и поликарбоната.

Крепежные элементы из полиэтилена имеют низкую стоимость, они характеризуются хорошими электроизоляционными свойствами и высокой эластичностью. Они удобны при выполнении сборочно-монтажных работ на холоде (например, при сборке ангаров и помещений из полиэфирных стеклопластиков).

Крепежные элементы из реактопластов. Соединения с помощью болтов из реактопластов с волокнистым наполнителем обладают большей прочностью, чем соединения с использованием болтов из термопластов.

При работе болтов на растяжение максимальная прочность достигается, если армирующий материал в винте ориентирован в направлении нагружения. В условиях сложнонапряженного состояния более эффективно применять армирующие материалы с менее выраженной анизотропией свойств (например, рубленую стеклянную ткань), крученые шнуры или комбинированные материалы (ровничную ткань со стекловолокнистым матом в отношении 6:4). Прочность гаек из стеклопластика максимальна, если армирующие волокна в них расположены перпендикулярно к оси резьбы.

При сопоставлении болтов с резьбой различных типов было установлено, что предпочтение следует отдавать крепежным элементам со стандартной резьбой.

Из полимерных материалов, в том числе армированных волокнистыми наполнителями, можно изготовлять и прокладочные шайбы. Использование выпуклых шайб типа тарельчатых пружин из стеклопластика способствует снятию пиков напряжений в болтовых соединениях и обеспечивает постоянство заданного усилия предварительной затяжки. Такие пружины из стеклопластиков сохраняют свои упругие свойства после теплового старения под нагрузкой.

Технология болтовых соединений деталей из ПКМ мало чем отличается от технологии болтовых соединений металлических элементов. Однако при правке и подгонке деталей приходится соблюдать некоторые меры предосторожности, а работу проводить в определенной последовательности.

На поверхности деталей из ПКМ всегда имеются неровности, которые являются причиной их неплотного прилегания в узле после сборки. Устранять неплотности прилегания усилением затяжки болтов недопустимо, так как в этом случае возможны местные перенапряжения материала и разрушение конструкции в области шва при напряжениях, меньших расчетных.

Для обеспечения плотного прилегания соединяемых элементов конструкции проводят приформовку материала в местах увеличенных зазоров (например, при изготовлении деталей контактным формованием) или снимают механической обработкой часть материала в местах выступов.

Твердость полимерных матриц КМ невелика, поэтому они легко повреждаются при ударе инструментом, острыми краями металлических крепежных элементов и т.д. Образующиеся при этом вмятины и царапины становятся дополнительными центрами концентрации напряжений. Чтобы избежать этого, необходимо применять крепежные элементы со скругленными углами, а тело болта в зоне контакта с ПКМ должно быть гладким, без резьбы или оно по всей длине в зоне отверстия будучи с резьбой отгорожено потайной гайкой. Для обеспечения плотного соединения необходимо также тщательно удалять заусенцы, металлическую стружку и другие частицы инородных тел из зоны контакта соединяемых деталей. Иначе возможны "нестесненное смятие" ПКМ стержнем болта, т.е. беспрепятственное деформирование ее в направлении вдоль оси болта, и резкое ослабление осевого усилия затяжки с течением времени.

При сборке болтовых соединений выполняют следующие операции: контроль качества отверстий для болтов, фиксирование гайки на конце винта, предварительное ее навинчивание, затяжку, при необходимости дополнительную затяжку, контроль качества соединения.

Наиболее важными являются входной контроль качества отверстия, затяжка и ее контроль.

При затяжке болтового соединения примерно 90 % работы тратится на преодоление сил трения и упругое закручивание элементов соединения и только 10 % связано с созданием в болте необходимого усилия натяжения Q.

Сборку болтовых соединений производят приложением статического крутящего момента; с помощью ударных импульсов или путем приложения осевых усилий к соответствующим деталям соединения. Наиболее универсальным методом является сборка приложением статического крутящего момента с помощью ручных завертывающих машин или автоматических и полуавтоматических стационарных установок. Основными преимуществами такого способа служат простота и высокая производительность, а недостатками – возмож-

ность появления в винте касательных напряжений, что снижает несущую способность болтового соединения, невысокая точность контроля крутящего момента при затяжке, обусловленная изменениями коэффициента трения, деформированием ПКМ и др. Прикладываемый к соединению крутящий момент (момент на ключе) $M_{кл}$ при затяжке уравновешивается моментом сил трения в резьбе – $M_р$ и на торце гайки $M_т$.

$$M_{кл} = M_р + M_т.$$

Момент в резьбе определяют по следующей приближенной формуле:

$$M_р = \left(Qd_{ср}/2\right)\operatorname{tg}(\beta+\rho'),$$

где Q – усилие, вызывающее растяжение винта; $d_{ср}$ – средний диаметр резьбы; β - угол подъема винтовой линии; $\rho' = \operatorname{arctg}\mu'$ – угол трения в резьбе (здесь $\mu' = \mu/\cos\alpha/2$ – приведенный коэффициент трения в резьбе; μ – коэффициент трения пары винт – гайка; α – угол профиля резьбы).

$M_т$ при равномерном распределении давления (что наблюдается в большинстве практических случаев) можно найти из выражения

$$M_т = 1/3\left[Q\mu_0(D^3 - d_0^3)/(D^2 - d_0^2)\right],$$

где μ_0 – коэффициент трения на кольцевой опорной поверхности гайки с диаметрами D и d_0.

Заданные значения $M_{кл}$ и Q можно обеспечить, воспользовавшись методикой, согласно которой определяют максимальное $M_{кл\,max}$ и минимальное $M_{кл\,min}$ значения крутящих моментов на ключе, если известны коэффициенты трения и заданы пределы изменения Q:

$$M_{кл\,max} = \frac{S\nu_п\sigma_т\left[\dfrac{d_{ср}}{2}\operatorname{tg}(\beta+\rho')_{min} + \right.}{\sqrt{1+0{,}75\left[d_{ср}\dfrac{S}{W_р}\operatorname{tg}(\beta+\rho')_{max}\right]^2}} \rightarrow$$

$$\left. + \frac{1}{3}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}\mu_{0\,min}\right]$$

$$\rightarrow \frac{}{};$$

$$M_{кл\,min} = 0{,}5S\sigma_т\left[\frac{d_{ср}}{2}\operatorname{tg}(\beta+\rho')_{max} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{3}\frac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}\mu_{0\,max}\right],$$

где S – площадь сечения болта; $\nu_п$ – коэффициент использования предела текучести материала болта $\sigma_т$; $W_р$ – полярный момент инерции сечения болта.

Если сумма верхнего и нижнего отклонений $M_{кл}$ для технологического инструмента превышает разность $M_{кл\,max} - M_{кл\,min}$, то с вероятностью θ можно утверждать, что фактическое усилие Q натяжения болта будет находиться в пределах:

$$\frac{M_{кл\,max}}{\dfrac{d_{ср}}{2}\operatorname{tg}(\beta+\rho')_{min} + \dfrac{1}{3}\dfrac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}\mu_{0\,min}} \geq Q \geq$$

$$\geq \frac{M_{кл\,min}}{\dfrac{d_{ср}}{2}\operatorname{tg}(\beta+\rho')_{max} + \dfrac{1}{3}\dfrac{D^3 - d_0^3}{D^2 - d_0^2}\mu_{0\,max}}.$$

Величина θ определяется по произведению вероятностей того, что величины $\operatorname{tg}(\beta + \rho')$ и μ_0 лежат в интервалах $\operatorname{tg}(\beta + \rho')_{min} \ldots \operatorname{tg}(\beta + \rho')_{max}$ и $\mu_{0\,min} \ldots \mu_{0\,max}$. Если разность $M_{кл\,max} - M_{кл\,min}$ меньше суммы верхнего и нижнего отклонения $M_{кл}$ для инструмента, то следует уменьшить интервалы $\operatorname{tg}(\beta + \rho')$ и μ_0.

При выборе крутящего момента можно воспользоваться практическими рекомендациями. Так, например, при сборке болтами из термопластов крутящий момент рекомендуется принимать в пределах 3...6 кН·м.

Для всех ответственных болтовых соединений необходимо контролировать усилие затяжки, так как при чрезмерной или недостаточной затяжке наблюдались случаи поломки резьбовых элементов и узлов в целом.

Степень затяжки, осуществляемой путем приложения статического крутящего момента, контролируют по его величине, по степени деформирования винта или промежуточных деталей, например, колончатой втулки между головкой винта и поверхностью детали или по углу поворота гайки. Можно использовать метод контроля степени затяжки болтовых

соединений, основанный на том, что при достижении необходимого осевого усилия изменяется характер зависимости крутящего момента от угла поворота.

При ударной затяжке гайке от гайковерта ударного действия передаются последовательные ударно-вращательные импульсы. Это позволяет создавать необходимые усилия затяжки при небольшой мощности привода машин и практически полном отсутствии реактивного момента. Благодаря небольшим габаритным размерам и массе гайковерты ударного действия можно использовать при работе в стесненных условиях сборки. В зависимости от энергии единичного удара гайковерта и требуемых параметров затяжки необходимое число импульсов может достигать 100 и более. С уменьшением частоты ударов снижается вибрация и шум и увеличивается надежность работы устройств, обеспечивающих заданное значение параметров затяжки.

1.13.4.3. ВИНТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

К винтовым относят резьбовые соединения, в которых гайкой служит одна из соединяемых деталей. Такие соединения более дешевы, чем болтовые, но менее экономичны, чем заклепочные. Кроме того, винтовые соединения можно применять только при большой толщине стенки хотя бы одной из соединяемых деталей. Винтовые соединения предпочтительнее болтовых в конструкциях, для которых по условиям эксплуатации не допускаются сквозные отверстия и которые должны иметь малую массу. Однако такие соединения не рекомендуются для изделий, подвергающихся частой сборке и разборке, так как вследствие износа резьбы может произойти ослабление соединения.

Для соединения деталей из ПМ и, в частности, из ПКМ применяют винты трех типов: винты для металлов (с потайной, полукруглой, полупотайной, цилиндрической и другими головками); самонарезающие винты и формующие винты (шурупы).

Соединение с помощью винтов для металлов. Для соединения полимерных деталей не рекомендуется применять винты больших диаметров, так как для их завинчивания требуются значительные крутящие моменты, в результате чего возможно повреждение ПМ.

Размеры и форма головки винта не влияют на удерживающую силу. В корпусных деталях, которые условно рассматриваются как гайки с бесконечной толщиной стенки, рекомендуют применять метрический профиль резьбы. Вместе с тем, с целью увеличения несущей способности резьбовых соединений деталей из ПМ вершины выступов резьбы у винта и впадину резьбы в отверстии скругляют. Радиус скругления должен составлять не более 5,5 % шага резьбы. С этой целью можно уменьшить также высоту профиля резьбы на 45 % высоты остроугольного профиля, уменьшив наружный диаметр винта.

Винты для крепления деталей из стеклопластиков изготовляют из конструкционной углеродистой стали. В изделиях электротехнического назначения применяют винты из сплавов меди. Крепежные элементы можно изготовлять из материала соединяемой детали или из полиамида, поликарбоната, полиацеталей. Высокая прочность крепления достигается при использовании винтов из ПКМ.

Технологический процесс выполнения винтового соединения деталей из ПКМ включает входной контроль соединяемых деталей, ориентирование винта в заданном положении, свинчивание деталей, затяжку винтового соединения. Входной контроль аналогичен контролю при выполнении болтовых соединений деталей из ПКМ. Для ориентирования винтов используется деталь с гладким отверстием или приспособление. Основной стадией является затяжка винтового соединения, оказывающая большое влияние на его прочность.

При выборе параметров затяжки, можно воспользоваться данными, приведенными для болтового соединения.

Для создания определенного усилия затяжки Q необходим крутящий момент $M_{кл}$, который затрачивается на преодоление момента $M_р$ трения в резьбе и момента $M_г$ трения головки винта. Составляющие $M_р$ и $M_г$ рассчитывают по следующим формулам:

$$M_р = Qr_{тр}\operatorname{tg}(\beta + \rho');$$

$$M_р = Qr_{тг}\mu_0,$$

где $r_{тр} = (d + D_1)/4$ – радиус трения в резьбе с учетом степени перекрытия профилей резьбы винта и отверстия. Здесь d – внешний диаметр резьбы винта; D_1 – внутренний диаметр резьбы в отверстии; β – угол подъема винтовой линии ($\operatorname{tg}\beta = t/\pi d_{ср}$; t – шаг резьбы; $d_{ср}$ – средний

диаметр резьбы винта); $\rho' = \text{arctg}\,\mu'$ (μ' – коэффициент трения в резьбе); $r_{тг} = (D_г + d_1)/4$ – радиус трения головки винта по поверхности детали (здесь $D_г$ – диаметр головки; d_1 – диаметр отверстия в детали); μ_0 – коэффициент трения в зоне контакта головки винта с поверхностью детали.

Совместное решение уравнений для $M_р$ и $M_г$ дает почти линейную зависимость Q от $M_{кл}$:

$$Q = M_{кл} / [r_{тр}\,\text{tg}(\beta + \rho') + r_{тг}\mu_0].$$

Эксперименты показали, что линейный характер зависимости $Q = f(M_{кл})$ сохраняется только на определенном участке кривых. Если свойства материала винта чувствительны к влаге, то для обеспечения заданного усилия затяжки требуется приложить больший крутящий момент вследствие увеличения коэффициентов трения μ' и μ_0 и посадки с натягом разбухшего винта. Необходимость создания повышенных крутящих моментов при затяжке характерна для винтов, хранящихся во влажных условиях, у которых зазор в резьбе мал. Основной причиной повышения момента затяжки считают увеличение диаметра винта в результате поглощения воды.

Твердость поверхности винта с увеличением содержания поглощенной воды уменьшается. Это частично компенсирует возрастание $M_{кл}$ для винтов большого диаметра. При возрастании содержания влаги в полиамидных винтах максимальное усилие затяжки, которое можно создать с их помощью, снижается. Этого не наблюдается для винтов из поликарбоната и полиформальдегида, что объясняется их меньшей влагоемкостью, а следовательно, и меньшим снижением прочности материала при сорбции воды.

В результате трения в резьбе и под головкой винта снижается теоретически достижимое усилие затяжки и повышаются напряжения кручения, которые действуют на винт. Поэтому при расчете крутящего момента необходимо знать коэффициенты трения пар: винт–отверстие и головка–подложка. При использовании подложек из термопластов или реактопластов и постоянном крутящем моменте достигают бóльшие усилия, чем при использовании подложек из стали, а коэффициент μ_0 трения при этом снижается.

В случае применения винтов из ПМ необходимо прикладывать крутящий момент, соответствующий концу линейного участка ("пределу пропорциональности") кривой $Q = f(M_{кл})$. При этом не возникают повреждения профиля резьбы.

Для винтов из полиамидов различных типов и полиформальдегида рекомендуемые значения крутящих моментов примерно одинаковы (45...55 Н·см).

Большинство резьбовых крепежных элементов завертывается вручную ключами и отвертками стандартного и специального исполнения. По способу контроля точности затяжки отвертки (ключи) подразделяют на: динамометрические, предельные (ключи с регулируемым моментом затяжки), а также ключи без ограничения крутящего момента.

Для сборки резьбовых соединений наибольшее распространение получили резьбозавертывающие ручные машины, что объясняется простотой их конструкции, надежностью в эксплуатации, экономичностью (сроком окупаемости от двух недель до двух месяцев) и высокой производительностью. Применение машин с прецессирующими головками обеспечивает автопоиск резьбового отверстия и снижает вероятность срывов первых витков резьбы в детали.

Резьбозавертывающие машины классифицируют в зависимости от их конструкции и вида потребляемой энергии. Для сборки деталей из пластмасс рекомендуется применять резьбозавертывающие машины безударного статического действия. Преимуществом таких машин является постоянство крутящего момента. Однако в результате возникновения большого реактивного момента, действующего на руку рабочего, их применение возможно для резьб диаметром только до 12...16 мм. Установив на такой машине ограничительную муфту, можно осуществлять затяжку с тарированным крутящим моментом.

В крупносерийном и массовом производстве для сборки резьбовых соединений рентабельно использовать автоматы и полуавтоматы. С целью сокращения затрат на сборку применяют транспортирующие устройства и крепежные элементы, изготовленные в виде ленты.

Прочность резьбовых соединений в случае, когда винты завинчиваются в предварительно нарезанные (или отформованные) отверстия, зависит от усилия затяжки винтов, которое может, как и при болтовом соединении, со временем ослабевать. Для предотвра-

щения ослабления и самопроизвольного отвинчивания винтов (особенно в соединениях, подвергнутых действию динамических нагрузок) применяют различные стопорящие средства.

При использовании самонарезающих винтов (метчикового типа) или формующих винтов (шурупов) обеспечивается посадка с натягом винта в детали из ПКМ, и соединение остается достаточно прочным, несмотря на возможную ползучесть материала.

Соединение с помощью самонарезающих и формующих винтов. Соединение деталей винтами, нарезающими или формующими резьбу в процессе их завинчивания, является наиболее дешевым и простым методом винтового крепления, поскольку при его использовании упрощается операция формования деталей и исключается необходимость нарезки резьбы. Кроме того, вследствие отсутствия зазоров между винтом и резьбовым отверстием повышается вибрационная стойкость соединения.

При использовании самонарезающих или формующих винтов в детали из ПКМ высверливают гладкие цилиндрические (направляющие) отверстия диаметром, как правило, равным 0,8 – 0,9 диаметра винта.

Самонарезающие винты имеют режущую кромку, обеспечивающую нарезание резьбы в отверстии. В зависимости от формы режущей части их подразделяют на винты: с пятью равномерно расположенными по окружности режущими кромками и канавками для сбора стружки (рис. 1.13.17, *а*, *д*) (между канавками находится резьба); с глухой (рис. 1.13.17, *б*) или сквозной (рис. 1.13.17, *в*) прорезью, образующее соответственно одну или две режущие кромки; с выборкой (желобком), сделанной под углом 90° для размещения стружки (рис. 1.13.17, *г*). Резьба у самонарезающих винтов (рис. 1.13.17, *а* – *в*) такая же, как у винтов для металлов, или разрежена (рис. 1.13.17, *г*, *д*), а концы имеют небольшую конусность.

Выбор типа винта зависит от вида соединяемого ПКМ и глубины завинчивания. Для винтов типа *а*, *б*, *в*, *д* (см. рис. 1.13.17) требуется малый установочный момент, поэтому их можно применять для хрупких дисперсно-наполненных ПКМ (например, фено- и аминопластов). При завинчивании на большую глубину предпочтительнее использовать винты типа *в*, *г* и *д*.

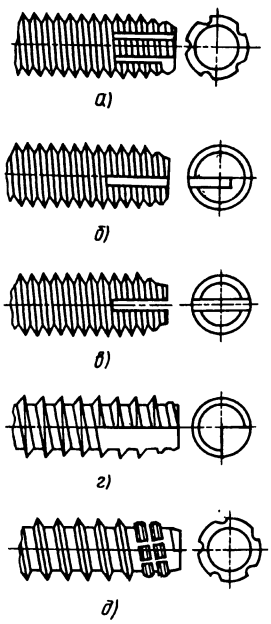


Рис. 1.13.17. Резьбовая часть самонарезающих винтов

Благодаря упругости разрезной части винта типа *в* обеспечивается его хорошее сцепление с резьбой детали. В случае правильной подготовки отверстий соединяемых деталей при ввинчивании самонарезающих винтов остаточные напряжения в материале незначительны, при этом обеспечиваются достаточное усилие затяжки и возможность разборки соединения.

Формующие винты (рис. 1.13.18) создают резьбу путем перемещения и уплотнения материала стенок отверстия в детали, т.е. без образования стружки. При таком способе оформления резьбы обеспечивается хорошее прилегание резьбовых поверхностей, а следовательно, и увеличение трения между ними. Это обеспечивает самостопорение винта, что особенно важно при вибрационных нагрузках. В формующих винтах резьбовая часть может быть выполнена с коническим или тупым концом, с большим или малым шагом. Первые витки резьбы, как и у самонарезающих винтов, срезаны или выполнены коническими для облегчения ввода винта в отверстие. Винты с малым шагом резьбы благодаря их большой поверхности сцепления менее склонны к самоотвинчиванию при вибрационных нагрузках.

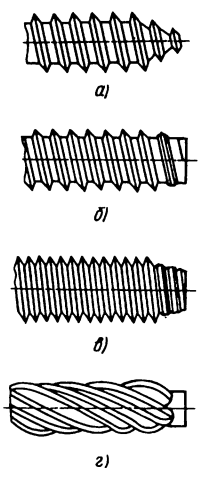


Рис. 1.13.18. Резьбовая часть формующих винтов

Кроме того, они, в отличие от винтов других типов, при одинаковых установочных крутящих моментах создают наибольшее осевое удерживающее усилие. Винты с многозаходной резьбой и большим углом подъема вводят в отверстие приложением осевого усилия, например, с помощью пуансона пресса. Такие винты эффективно применяют в неразборных конструкциях, испытывающих вибрационные нагрузки. Однако толщина деталей, в которые вводят такие винты, должна быть не меньше диаметра.

Самонарезающие и формующие винты для соединения деталей из стеклопластиков изготовляют из качественных низкоуглеродистых сталей с последующей цементацией и закалкой. Для них характерны резьбовые участки повышенной твердости.

При соединении деталей из фенопластов, аминопластов с порошкообразным наполнителем и термопластов винты изготовляют из низкоуглеродистой стали (для дешевых изделий), монель-металла и коррозионно-стойкой стали (для предотвращения коррозии и придания изделиям хорошего внешнего вида), а также из латуни или бронзы – для изделий электротехнического назначения, когда винт является токонесущей деталью.

Чтобы предотвратить выкрашивание первых витков резьбы на детали и облегчить ввод винта, рекомендуется снимать фаску под углом 120° на входе отверстия или нарезать не менее двух-трех витков полной резьбы.

Крутящий момент $M_{кл}$, прикладываемый при установке самонарезающего или формующего винта, больше крутящего момента, необходимого для завинчивания винтов для металлов. Крутящий момент $M_{кл} = M_р + M_з$ (здесь $M_р$ – момент для образования резьбы; $M_з$ – момент, обеспечивающий затяжку винта) не должен быть чрезмерно большим, чтобы не перегружать ПКМ стягивающим усилием. С увеличением диаметра отверстия для самонарезающего винта крутящий момент при завинчивании уменьшается. При установке шайбы под головку винтов можно увеличить усилие затяжки.

Для создания необходимого крутящего момента $M_{кл}$ рекомендуется применять механизированный инструмент с регулируемыми параметрами затяжки. Высокая производительность достигается при использовании пневматической завертывающей машинки с регулируемым крутящим моментом и прутковой загрузкой винтов.

Прочность соединения, обеспечиваемая применением самонарезающих или формующих винтов, зависит от диаметра предварительно просверленного или отформованного отверстия и глубины завинчивания. Основные виды нагрузок, возникающие при сборке, – это крутящий момент и осевая нагрузка, сохраняющаяся также при эксплуатации собранного узла.

Для полиэфирных стеклопластиков с содержанием 50 % стеклянной ткани или 37 % стекловолокнистого мата удерживающая сила винтов снижается с увеличением диаметра отверстия в результате уменьшения площади контакта крепежного элемента с материалом детали. Для ПКМ с низким (15 %) содержанием стекловолокнистого мата существует оптимальный размер отверстия, при котором достигается максимальная удерживающая сила. В соединениях с отверстиями малых диаметров низкая удерживающая сила обусловлена расслоением ПКМ при установке винта и действием остаточных напряжений в детали. Для формующих винтов характерны меньшие значения удерживающей силы, чем для самонарезающих винтов такого же диаметра .

При увеличении содержания стеклянного волокна в ПКМ, но не более чем до 85 %, прочность соединения повышается; минеральный порошкообразный наполнитель, введен-

ный в стеклопластик, способствует уменьшению прочности соединения (крутящий момент при срыве резьбы снижается приблизительно на 10 %). Менее прочными являются соединения деталей из стеклопластика на основе матов, нежели ткани при одинаковом содержании матрицы. Структура мата (из рубленого или непрерывного стеклянного волокна) не влияет на удерживающую силу винтов.

Соединение с помощью винтов и промежуточного резьбового элемента. Наиболее простым вариантом такого способа соединения является крепление с помощью разрезной вставки с гладким отверстием, изготовленной из упругого ПКМ, например из наполненного стекловолокном полиамида (рис. 1.13.19). Разрезную вставку вводят в гнездо одной из соединяемых деталей, к которой затем с помощью винта присоединяют вторую деталь. Благодаря тому что отверстие во вставке коническое, ее разрезные части несколько расходятся ("раздаются"), обеспечивая плотную посадку винта.

При использовании таких вставок, например для соединения деталей из ТКМ, создаются предпосылки для повышения прочности соединения за счет увеличения глубины завинчивания и оформления резьбы во вставке, выполненной из более прочного и упругого материала, чем соединяемые детали.

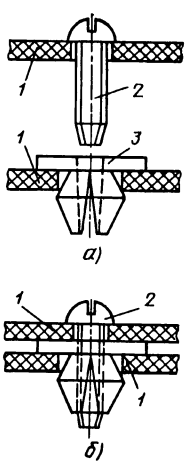


Рис. 1.13.19. Соединение деталей с помощью разрезной полиамидной вставки:
1 – деталь, *2* – формующий винт;
3 – разрезная вставка; *а* – положение перед сборкой;
б – собранный узел

Обычно в качестве промежуточных резьбовых элементов используют металлическую арматуру с внутренней резьбой. Арматура в полимерных деталях не только играет роль резьбового элемента с малым диаметром и шагом, но и выполняет другие функции.

Соединение конструируют таким образом, чтобы рабочая нагрузка воспринималась арматурой, а ПКМ по возможности разгружался.

Арматура может служить токоведущим элементом в изделиях электротехнического назначения. Она упрочняет также некоторые узлы и конструкции и способствует более равномерному распределению теплоты в деталях. При сборке по базовым отверстиям арматуру используют иногда в качестве установочных деталей. Многочисленные примеры функционального многообразия арматуры указывают на то, что использование металлических вставок только для того, чтобы исключить нарезку или формование резьбы в ПКМ, не всегда оправдано.

Арматуру изготовляют обычно из латуни, алюминия или стали и снабжают резьбой, аналогичной нарезке винтов для металла, а также резьбой специального профиля. Наружная поверхность арматуры может иметь насечку, канавки, огранку, резьбу и т.д.

Металлическую арматуру в полимерные детали заформовывают в процессе их изготовления прессованием, литьем под давлением или другими методами или закрепляют в уже отформованных деталях.

Выбор метода закрепления арматуры определяется конструктивными особенностями самой арматуры, требованиями к прочности ее соединения с деталью и к точности получаемых изделий, а также условиями производства.

Для процесса формования деталей из ПМ с металлической арматурой характерны следующие недостатки: 1) сложность конструкции литьевой формы; 2) применение ручного труда; 3) низкая производительность труда (однако трудозатраты в этом случае все же меньше, чем при изготовлении резьб в готовых деталях); 4) прерывистость технологического цикла литья под давлением и прессования, что влечет за собой увеличение простоев оборудования; 5) сравнительно высокий процент брака. Механизация и автоматизация установки металлической арматуры в литьевые или пресс-формы значительно увеличивают стоимость оборудования.

В тех случаях, когда установка резьбовой арматуры в литьевых формах и пресс-формах невозможна, используют специальные резьбовые вставки, вводимые в детали после их формования. Этот метод по сравнению с заформовываемой металлической арматурой позволяет: снизить затраты на изготовление оснастки благодаря замене съемных резьбовых знаков стационарно устанавливаемыми в формующем инструменте цилиндрическими штифтами; отказаться от свинчивающих приспособлений при механизации процесса прессования; уменьшить простои и повысить степень загрузки основного перерабатывающего оборудования; исключить ручные операции и обеспечить непрерывность производства, а также возможность одновременного обслуживания персоналом нескольких установок; автоматизировать процесс изготовления деталей; повысить точность установки выставок в полимерные детали; расширить применение высокопроизводительного оборудования для литья под давлением; сократить процент брака получаемых изделий.

Резьбовые вставки подразделяют на монолитные и легко деформируемые. Они состоят из одной или нескольких деталей, включая элементы с внутренней резьбой и фиксаторы (стопоры) вставок. В одних случаях для установки вставок требуется гладкое отверстие, в других – необходимо отверстие с резьбой.

Наиболее простые соединительные элементы – резьбовые легко деформируемые (спиральные) вставки, представляющие собой по форме обычную пружину, навитую в холодном состоянии из прутка коррозионно-стойкой стали или фосфористой бронзы (рис. 1.13.20). Сечение прутка имеет вид ромба с двумя срезанными противоположными вершинами, стороны которого образуют угол, равный углу профиля резьбы. Такая вставка плотно заполняет канавки резьбы в отверстии детали и образует прочную металлическую "облицовку"

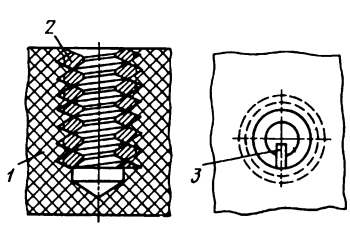


Рис. 1.13.20. Спиральная упругая вставка в отверстии с резьбой:
1 – деталь; *2* – вставка; *3* – захват

резьбы. После ввинчивания вставки в гнездо ее наружной диаметр уменьшается, а внутренние размеры отвечают стандартной метрической резьбе. Основная особенность резьбового соединения со спиральной вставкой состоит в большой податливости резьбы, способствующей равномерному распределению нагрузки по виткам.

Спиральные вставки ввинчивают с помощью дрели специальной конструкции. Патрон дрели удерживает конец вставки, отогнутый в радиальном направлении. Описанные соединительные элементы могут устанавливаться в гладкие отверстия с помощью прессовой посадки.

По сравнению с применением монолитных резьбовых элементов армирование резьбовых отверстий спиральными вставками имеет следующие преимущества: 1) обеспечивает фиксацию соединения при вибрационных нагрузках, так как благодаря упругости вставки не проявляют склонности к самоотвинчиванию; 2) предотвращает возникновение больших напряжений в полимерных деталях и, следовательно, их растрескивание. Кроме того, при использовании таких вставок снижается стоимость изделия, повышается срок службы конструкций, упрощается их монтаж, упрощается и удешевляется ремонт поврежденных или изношенных резьб, а также снижается масса собранного узла.

Ремонт выполняют в такой последовательности:

1) рассверливают отверстие до диаметра, несколько большего, чем диаметр впадин поврежденной резьбы;

2) нарезают новую резьбу в полученном отверстии;

3) ввинчивают в него спиральную вставку с размерами, аналогичными поврежденной резьбе.

Монолитные вставки в резьбовом отверстии можно фиксировать от вывинчивания различными способами. Вставки в гладких отверстиях стопорятся с помощью клея или резьбы, выполненной на наружной поверхности вставки; путем прессовой посадки; навинчиванием на крепежный элемент, прижимающий вставку к стенкам отверстия или паза. Кроме того, крепление вставок в полимерных деталях может достигаться благодаря их упругому деформированию.

Резьбовые вставки, закрепляемые в гладких отверстиях с помощью клеев, как правило,

имеют цилиндрическую форму. Максимальный зазор между вставкой и деталью составляет не более 0,3 мм. В качестве клея применяют полимерные композиции, способные отверждаться без давления, например, анаэробные одноупаковочные клеи.

При закреплении вставок в отверстиях полимерных деталей прессовой посадкой очень важно правильно выбрать натяг; при чрезмерно большом натяге возможно образование трещин в зоне вокруг вставки, а при слишком малом – снижение прочности соединения. Чтобы исключить появление зон с локальной концентрацией напряжений, рекомендуется использовать вставки круглой формы без приливов и накатки.

Максимальный натяг H_{max} можно рассчитать формуле

$$H_{max} = (2\sigma r_1 / E)\left[(L+\mu)/L\right];$$

здесь $L = (r_2^2 + r_1^2)/(r_2^2 - r_1^2)$, где σ – допустимое напряжение; r_2, r_1 – соответственно внутренний и наружный радиусы детали до запрессовки вставки; E – модуль упругости ПКМ; μ – коэффициент Пуассона.

Максимальный натяг снижается с уменьшением толщины стенки "ступицы" (толщины слоя ПКМ вокруг вставки). Наружный диаметр ступицы должен, по крайней мере, в 2 – 3 раза превышать наружный диаметр резьбовой вставки. Мощность прессового оборудования, необходимого для выполнения прессовой посадки резьбовой вставки, рассчитывают подобно тому, как это показано в п. 1.13.2. При использовании прессовой посадки необходимо учитывать снижение прочности соединения вставки с ПКМ в результате релаксации напряжений и изменение размеров детали вокруг вставки.

Менее склонны к ослаблению вставки, заформованные с помощью ультразвука, самонарезающие, формующие и разжимные (распорные) вставки (табл. 1.13.4). Другое преимущество названных соединительных резьбовых элементов состоит в том, что для их установки требуются оборудование и приспособления малой мощности.

При ультразвуковой запрессовке в полимерной детали предварительно оформляют гладкое отверстие, диаметр которого несколько меньше посадочного диаметра вставки. Схема введения вставки аналогична преимущественно применяемой схеме при ультразвуковой сварке ПМ: механические колебания УЗ-частоты, передаваемые к деталям, и давление действуют по одной линии.

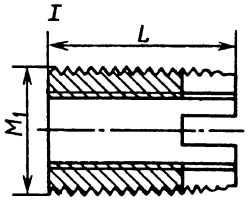
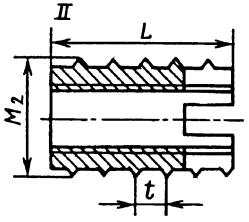
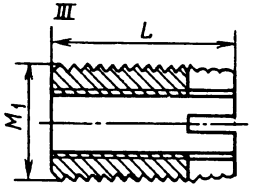
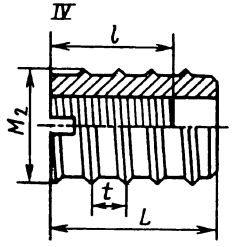
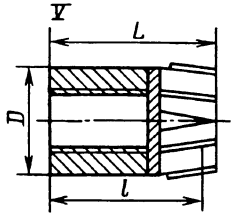
Самонарезающие вставки (см. табл. 1.13.4, эскизы I, II) – вставки типа "Ensat" и другие (см. табл. 1.13.4, эскизы III) представляют собой втулки с наружной и внутренней резьбами, имеющие на нижнем конце конус и один или два продольных шлица с острыми режущими кромками. При завинчивании вставки ее разрезные сегменты прогибаются внутрь. При завинчивании винта во вставку ее разрезная часть вдавливается в стенки отверстия, что обеспечивает фиксацию винта и вставки. Жесткость такого "стопора" можно регулировать изменением диаметра отверстия в детали. Внутренняя резьба неразрезанной части вставки предназначена для передачи усилия от винта.

Соединения, выполненные с помощью вставок "Ensat", обладают высоким сопротивлением усталости, обеспечивают практически неограниченное число сборок и разборок без извлечения вставок из материалов, имеющих различные коэффициенты трения. При использовании таких вставок исключается необходимость применения для ПМ с низкой прочностью винтов увеличенных размеров по сравнении со стандартными винтами. Вставки "Ensat" изготовляют из стали, в том числе с гальваническим покрытием, а также из латуни.

Вставки, представленные на эскизе III в табл. 1.13.4, относят к одним из первых самонарезающих вставок. Их обычно снабжают внутренней резьбой М12...М26, а установку осуществляют с помощью инструмента с цилиндрическим хвостовиком такого размера, чтобы отклонение разрезной части вставки было незначительным.

Ниже приведены соотношения между диаметром D отверстий и основными размерами вставок, рекомендуемые для различных ПМ: мягкие термопласты: $D = d_1$; жесткие термопласты: $D = d_1 + (0{,}4...0{,}6)\,h$; мягкие дисперсно-упрочненные отвержденные реактопласты и слоистые ПКМ: $D = d_1 + (0{,}6...0{,}8)\,h$; жесткие дисперсно-упрочненные отвержденные реактопласты: $D = d_1 + (1...1{,}2)\,h$; здесь d_1 – диаметр тела вставки, h – высота профиля наружной резьбы.

1.13.4. Геометрические параметры основных типов резьбовых вставок

Номинальный размер внутренней резьбы	I		II			III		IV				V		
														
	M_1	L	M_2	t	L	M_1	L	M_2	t	L	l	D	L	l
M2,6	4,5	6	5	2	6							4	6,5	5
M3	5	6	5,5	2	6							4	6,5	5
M3,5	6	8	6,5	2,5	8							4,8	8	6,4
M4	6,5	8	7	2,5	10			8	3,5	8	4	5,5	9,5	8
M5	8	10	9	3	12			10	4,5	10	5	6,5	11	9,5
M6	10	14	10	4	14			12	5	12	6	8	12,5	11
M8	12	15	13	4	16	12	15	16	6	15	8			
M10	14	18	16	5	18	14	18	18	6	18	10			
M12	16	22				16	22	20	7	20	12			
M14	18	24				18	24							
M16						20	25	25	7	25	16			
M18						22	28							
M20						24	30	32	7	30	20			
M22						26	32							
M24						28	34							

Формующие резьбовые вставки используют для получения резьбы в деталях из слоистых пластиков и эластомеров. Для облегчения установки их снабжают фаской под углом 45° и коротким цилиндрическим участком в нижней части (см. табл. 1.13.4, эскиз IV). Длина внутренней метрической резьбы приблизительно равна ее диаметру, в то время как общая длина может достигать 30 мм. Вставки изготовляют из стали, латуни и алюминиевых сплавов и ввинчивают в отверстия полимерных деталей с помощью отверток.

Простейшие разжимные (самоконтрящиеся) вставки состоят из одного элемента (рис. 1.13.21). Наиболее распространены разжимные вставки, конструкция которых показана на рис. 1.13.22. Благодаря разрезам в нижней части они упруго деформируются при введении в гладкое отверстие и после завинчивания винта плотно закрепляются в ПКМ с помощью насечки или кольцевых выступов на наружной поверхности вставки.

Механические свойства соединений, выполненных с помощью разжимных вставок, зависят от прочности соединяемых материалов

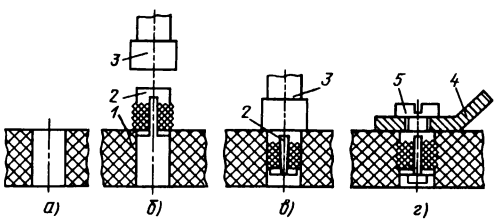


Рис. 1.13.21. Крепление с помощью разжимной резьбовой вставки:
а – отверстие в полимерной детали; *б* – вставка и инструмент в исходном положении; *в* – вставка с инструментом в крайнем нижнем положении; *г* – собранный узел; *1* – полимерная деталь; *2* – резьбовая вставка; *3* – запрессовывающий инструмент; *4* – присоединяемая деталь, *5* – винт

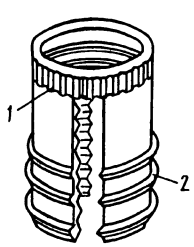


Рис. 1.13.22. Разжимная резьбовая вставка:
1 – накатка для удержания вставки;
2 – кольцевой выступ

и диаметра отверстия, при уменьшении которого до определенного значения возникает опасность разрушения соединения из-за радиальных напряжений, превышающих разрушающее напряжение материала при растяжении.

При увеличении диаметра отверстия за оптимальный предел (от 5,1 до 5,3 мм) усилие, необходимое для извлечения разжимной вставки с резьбой М4 из реактопластов, обрабатываемых прессованием, уменьшается от 1,25 до 0,4...0,5 кН, а удерживающий крутящий момент – от 0,45 до 0,20...0,27 кН · см. Менее резко с увеличением диаметра отверстия снижаются указанные характеристики для вставок в термопластах. Внешний диаметр вставки должен быть больше диаметра отверстия на 0,10 мм для деталей из эластичных или волокнистых ПКМ и на 0,05 мм больше при соединении хрупких материалов.

Толщина ступицы вокруг вставки должна быть не менее номинального диаметра d резьбы для эластичных и не менее $1{,}5\,d$ для хрупких ПМ. Для обеспечения более надежной фиксации вставки в полимерной детали глубина отверстия должна в 1,5 раза превышать длину вставки, чтобы конец винта не выступал из нее.

При многократных циклах сборки (ввинчивании и вывинчивании винтов) характеристики соединений с помощью разжимных вставок изменяются незначительно.

При вывертывании винта из разжимной вставки (см. рис. 1.13.22) возможно уменьшение размеров ее разрезной части, что крайне нежелательно.

Ничего подобного не происходит в случае использования распорных вставок типа "Dodge" (рис. 1.13.23), так как благодаря наличию стопорящего элемента – шайбы – обеспечивается их стабильная фиксация. Шайба имеет четыре усика, которые перемещаются в пазах вставки, способствуя ее упругому деформированию при ввинчивании крепежного элемента (рис. 1.13.24). Вставки типа "Dodge" более эффективны по сравнению с другими

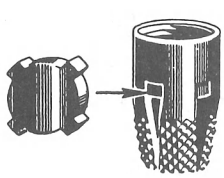


Рис. 1.13.23. Вставка типа "Dodge" (*1*) и фиксирующая шайба (*2*)

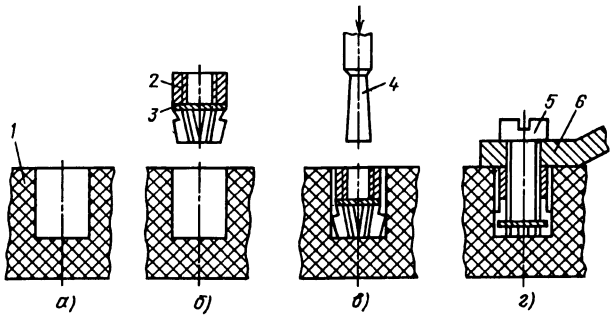


Рис. 1.13.24. Крепление с помощью разжимных резьбовых вставок типа "Dodge":
а – отверстие в полимерной детали; *б* – вставка в исходном положении; *в* – вставка в отверстии; *г* – собранный узел, *1* – полимерная деталь; *2* – вставка; *3* – фиксирующая шайба, *4* – инструмент; *5* – винт; *6* – присоединяемая деталь

резьбовыми вставками. Их применяют не только в машиностроении и электротехнике, но и при проведении ремонтных работ. Изготовляют такие вставки в основном из латуни и снабжают внутренней метрической резьбой. При единичном или мелкосерийном производстве вставки вводят в отверстия полимерных деталей вручную, а при крупносерийном – специальными инструментами или автоматически.

При использовании вставок "Dodge" особое внимание рекомендуется обращать на размеры отверстия для вставки, чтобы достичь оптимальных показателей прочности соединения. При правильном выборе диаметра и высококачественной сборке осевая удерживающая сила в соединениях достигает значений, превышающих предельно допустимые нагрузки винтов, уменьшаясь с увеличением диаметра отверстия в полимерной детали.

Сказанное характерно также для удерживающего момента. Даже при наличии зазора между стенкой отверстия и устанавливаемой вставкой удержание последней обеспечивается благодаря деформированию ее посадочной части при завинчивании винта. Диаметр отверстия под вставку $d_{отв}$ должен превышать диаметр вставки D на 0,05...0,08 мм. При больших рабочих нагрузках и зазорах для более прочного крепления вставки в отверстии рекомендуется применять клеи.

Толщину стенки ступицы вокруг вставки принимают равной не менее 0,6 $d_{отв}$, а толщину донышка детали под вставкой – не менее половины ее длины.

Крепление резьбовой вставки в полимерной детали или слоистом изделии за счет прижима к стенкам отверстий при ввинчивании во вставку крепежных элементов, а в некоторых случаях дополнительно с помощью клеевого слоя обеспечивается при так называемом штифтовом или штифто-болтовом способе соединения (рис. 1.13.25).

Такие соединения точнее, вероятно, относить к болтовым, если штифт, по конструкции не похожий на вышерассмотренные вставки, принять за гайку. С целью предотвращения выпадания штифтов из отверстий на их концах нарезают резьбу для навинчивания гаек.

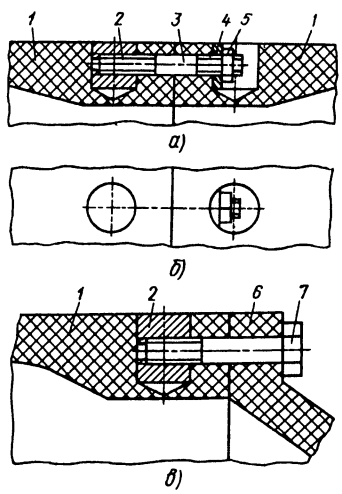


Рис. 1.13.25. Штифто-болтовое соединение при стыковке двух секций (*а*) и при креплении цилиндра к фланцу (*б*):
1 – цилиндрическая секция; *2* – штифт; *3* – шпилька; *4* – шайба; *5* – гайка; *6* – деталь с фланцем; *7* – винт

Штифто-болтовое соединение нашло преимущественное применение при так называемой бесфланцевой стыковке оболочек (обечаек) из ПКМ. Для облегчения установки крепежных элементов в отверстиях стыка вместо винтов целесообразно использовать шпильки.

При штифто-болтовом соединении элементов трехслойных конструкций непрочный заполнитель в зоне расположения штифта заменяют вкладышем из материала, аналогичного по свойствам материалу наружных слоев (обшивки), а последние подвергают фольгированию.

1.13.5. ФОРМОВАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Формованные соединения основаны на замыкании связи между деталями с помощью накладок, формуемых на их поверхностях из препрегов на основе жидких связующих или премиксов и одновременно присоединяемых к ним. Развитие способа началось с момента расширения применения полиэфирных и эпоксидных стеклопластиков в производстве крупногабаритных изделий сложной формы: элементов корпусов судов, средств спасения на воде, цистерн, контейнеров и т.п. В настоящее время он распространился и на изделия из других типов ПКМ.

Процесс образования формованных соединений – приформовка по своему механизму и по природе вспомогательных материалов близок к склеиванию, а по технологическому оформлению похож на контактное формование или намотку (в зависимости от выбранного метода) деталей из ПКМ. Формованные соединения при действии на них нагрузки ведут себя аналогично клеевым нахлесточным и встык с накладками соединениям.

Как приформовку, а точнее заформовывание, можно рассматривать введение металлической или другой арматуры (вставок) в отверстия полимерных деталей с помощью ультразвука или контактного и индукционного нагрева арматуры без использования дополнительных накладок из полимерного материала. Основные преимущества метода – не требуется точная подгонка соединяемых деталей (особенно важно это при соединении крупногабаритных деталей) и не нужно прикладывать давление при отверждении материала накладок.

В зависимости от формы соединяемых деталей и места расположения шва приформовкой выполняют стыковое с накладками (рис. 1.13.26, *а*), реже нахлесточное, угловое листовых деталей (рис. 1.13.26, *б*), листовой детали и профиля (рис. 1.13.26, *в*) и Т-образное с накладкой (рис. 1.13.26, *г*) соединения.

Стыковое с накладками соединение используют при сборке листовых элементов (полотнищ) и наращивании длины элементов жесткости. Нахлесточное формованное соединение методом намотки применяют для создания гибридной конструкции из стеклопластиковой оболочки *1* и металлического шпангоута *2* (рис. 1.13.27).

При соединении встык допускаются следующие отклонения деталей по толщине:

толщина детали, мм	≤5	5...10	>10
разнотолщинность, %.....	25	15	8

При большей разнотолщинности требуется обработка стыкуемых кромок.

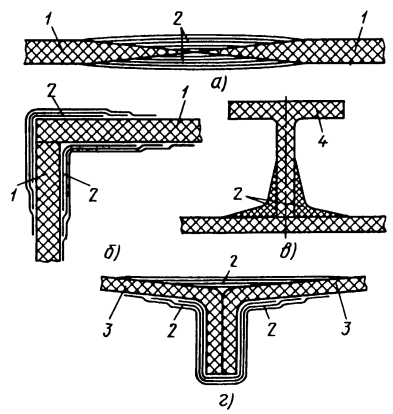


Рис. 1.13.26. Схемы формованных соединений деталей из слоистых ПКМ:
1 – листовые детали; *2* – накладки, *3* – фасонные детали, *4* – Т-образный профиль

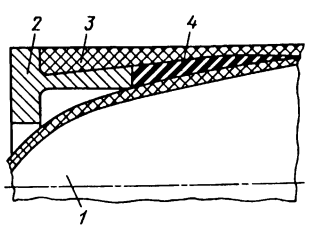


Рис. 1.13.27. Схема формованного соединения оболочки из ПКМ с металлическим шпангоутом:
1 – оболочка, *2* – шпангоут, *3* – накладка, *4* – элемент сопряжения

Соединять детали внахлестку целесообразно при комбинировании приформовки со склеиванием.

Угловые соединения применяют для крепления элементов жесткости к листам (полотнищам), переборок к оболочке или листов под углом.

Детали Т-образным швом соединяют в тех случаях, когда невозможно другими способами обеспечить точное совпадение стыкуемых кромок и когда подход к деталям возможен только с одной стороны.

Соединение деталей приформовкой применяют также для крепления различной металлической арматуры, оборудования и узлов к элементам конструкций из стеклопластиков; для стыковки металлических листов, например со стеклопластиковыми; для заделки в стеклопластиковый корпус заполнителя из пенопластов.

Для всех способов соединения деталей оптимальной формой продольного сечения накладок из приформовочной массы является сегментообразная. При такой форме накладок сокращается расход связующего и стеклянной ткани (на 40...45 %), уменьшается трудоемкость изготовления соединения почти на 40... 45 %, увеличивается прочность конструкций при изгибе и растяжении, изделия характеризуются лучшей обтекаемостью и большей надежностью в эксплуатации по сравнению с соединениями, в которых применяются накладки прямоугольной формы.

Относительная прочность формованных соединений снижается с увеличением толщины соединяемых деталей. На практике обычно применяют накладки, длина которых значительно больше минимально допустимой (оптимальной) величины, определенной экспериментально. Это обусловлено возможностью появления воздушных включений и других дефектов в контактном слое в процессе приформовки в производственных условиях, отличающихся от эксперимента.

При выполнении формованных соединений встык полиэфирных стеклопластиков длину накладки $l_н$ принимают равной (150 + 10δ) мм (δ – толщина соединяемых деталей в области стыкуемых кромок, мм).

Экспериментально было установлено, что при толщине $\delta_н$ накладки в области стыкуемых кромок деталей, превышающей 0,4δ, прочность соединения существенно не изменяется. Рекомендуемая $\delta_н = 0{,}5\delta$.

Оптимальные параметры углового соединения полиэфирных стеклопластиков найдены экспериментально. Высота вертикальной стороны угольника (с некоторым запасом) должна быть в 7 – 8 раз больше толщины элемента жесткости, а длина горизонтальной его стороны равна 30 мм. Однако в производственных условиях наиболее рационально формовать равносторонние угольники. Длину b стороны приформовываемой накладки в виде уголка в случае соединения элементов жесткости с листами или соединения листовых деталей под углом можно определить из соотношения $b = (7...8)\,\delta_{min}$ (здесь δ_{min} – толщина наиболее тонкой из соединяемых деталей). Толщина приформовываемого уголка в области угла принимается равной половине толщины наиболее тонкой из соединяемых деталей.

При выборе формы приформовываемого уголка необходимо учитывать технологические особенности процесса приформовки. Наиболее технологичными являются уголки, изображенные на рис. 1.13.28, *б* и *в*. При одинаковом содержании наполнителя (25 %, мас.) прочность уголков типа *б* на 20 % больше прочности уголков типа *в*. Кроме того, они проще в изготовлении.

Накладки в виде уголков, изображенные на рис. 1.13.28, *б*, рекомендуется применять для соединения элементов жесткости с обшивкой способом, предусматривающим использование приформовочной массы на основе рубленого стеклянного волокна. Максимальная толщина приформовочных угольников типа *б* и *в* равна 16 и 12 мм.

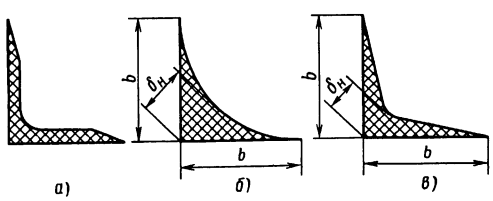


Рис. 1.13.28. Приформовываемые уголки из препрега на основе стеклянной ткани (*а*) и премикса на основе стеклянного волокна (*б*) и (*в*)

Материал накладок. Формованные соединения применяют главным образом при сборке изделий из стеклопластиков. В этом случае для изготовления накладок (приформовочной массы) используют композиции, содержащие стеклянное волокно. Связующее, применяемое для приготовления приформовочной массы, должно прочно сцепляться с соединяемым материалом и отверждаться при невысоких давлении и температуре. Этим требованиям, например при соединении деталей из полиэфирных стеклопластиков, удовлетворяют полиэфирные и эпоксидные связующие. Обычно применяют связующие на основе полиэфирных смол. В отечественной технологии максимальная прочность соединения достигнута при использовании связующего на основе отечественной полиэфирной смолы ПН-609-21М, которое обладает большим периодом гелеобразования. Связующее на основе смолы ПН-609-27 характеризуется негорючестью и малой токсичностью.

Для соединения приформовкой можно использовать модифицированную 20%-ным раствором полиизоцианата в стироле полиэфирную композицию, которая обеспечивает высокую прочность соединения полиэфирных стеклопластиков. Отверждение полиэфирных связующих происходит в присутствии инициирующей системы, состоящей из гидропероксида изопропилбензола и нафтената кобальта.

При длительной выдержке готовых деталей перед приформовкой (больше четырех суток) применяют эпоксидные связующие.

Для соединения листовых деталей, подверженных действию больших растягивающих и изгибающих нагрузок, лучше использовать препреги на основе стеклянной ткани сатинового или полотняного переплетения, в которых содержится 50 % связующего.

Для приформовки уголков применяют рубленое стеклянное волокно. Прочность стеклопластика, полученного напылением стеклянной ровницы РБР 1042 × 60,3, в среднем составляет 60 % прочности стеклопластика, изготовленного на основе стеклянной ткани Т-11-ГВС-9 контактным методом с применением смолы ПН-609-21М. Однако прочность при отрыве углового соединения, выполненного напылением, выше, чем у соединения, выполненного контактным методом с помощью стеклотекстолита.

Физико-механические свойства напыленной приформовочной накладки треугольного сечения из стеклопластика улучшаются с увеличением содержания наполнителя. Однако с повышением содержания наполнителя больше времени затрачивается на удаление воздушных включений и обеспечение равномерного смачивания волокна связующим. Наибольшая производительность и прочность соединения достигаются при содержании в приформовочной массе 20...25 % (масс. доля) стеклянного волокна. Оптимальная длина стеклянного волокна – 15 мм.

При нанесении приформовочной массы на детали выдавливанием в нее вводят порошкообразные наполнители: графит (3...5 %), тальк (10...15 %), каолин (10...20 %), оксид цинка (15...20 %), асбестовый порошок (10... 15 %) и др. Для выполнения соединения деталей приформовкой в вертикальном, наклонном или так называемом потолочном положениях в связующее добавляют 1,5...3,0 % тиксотропных наполнителей (аэросилы А-175, А-300 и А-380).

Зазоры (но не более 5 мм) между соединяемыми кромками деталей из стеклопластиков заполняют массой, в состав которой входят рубленая стеклянная ткань или стеклянный жгут (например, ЖСН-3) и связующее в соотношении 1:1. При большем зазоре между кромками помещают вкладыши из стеклопластика того же состава, что и детали, а зазоры между вкладышем и деталями заполняют массой на основе стеклянного волокна.

Технология соединения. Технологический процесс приформовки включает приготовление приформовочной массы, подготовку соединяемых поверхностей, нанесение приформовочной массы, отверждение и контроль качества соединения. Контроль качества исходных материалов и условия их хранения аналогичны контролю качества материалов, обрабатываемых контактным формованием, и условиям их хранения.

Для приготовления приформовочной массы стеклянную ткань в помещении, оборудованном приточно-вытяжной вентиляцией, с

влажностью не более 65 % и температурой не ниже 18 °С раскраивают на прямолинейные полосы, которые вырезают по линейке остро отточенными ножами или пневматическими машинками; на криволинейные полотнища, вырезаемые по шаблонам; на заготовки сложной конфигурации. При необходимости хранения раскроенных тканей более суток их укладывают в герметичные полиэтиленовые пакеты.

Процесс приготовления связующего для приформовочной массы аналогичен процессу его приготовления в случае контактного формования.

Одной из важнейших операций процесса приформовки является подготовка соединяемых поверхностей. Наиболее эффективные способы подготовки поверхностей – использование сдираемых слоев и механическая обработка.

В первом случае соединяемые участки поверхностей перед формованием деталей покрывают одним слоем, например, полиэфирной ткани так, чтобы исключалась ее сквозная пропитка. Непосредственно перед приформовкой этот слой удаляют.

Если этот способ подготовки не приемлем из-за экономических соображений, поверхности зачищают машинками, снабженными шлифовальными кругами, до полного удаления с них лаковой пленки связующего. При этом прочность при растяжении соединения встык с накладками тем больше, чем меньше зернистость шлифовальных кругов, поскольку при более гладкой поверхности (при меньшей зернистости) обеспечивается более равномерная толщина слоя связующего в зоне контакта накладки с соединяемой деталью. Механизированную обработку можно вести с помощью машинок, снабженных наждачными полотнами, или обдувая поверхность абразивным порошком. Способ зачистки не оказывает влияния на прочность углового соединения при отрыве. После механической обработки поверхности очищают тампоном, смоченным растворителем (ацетоном, нефрасом или хлорсодержащими углеводородами). При разнотолщинности стыкуемых кромок, превосходящей допустимые нормы, их выравнивают, приформовывая или снимая слои материала. В случае соединения приформовкой деталей из металла и стеклопластика поверхность металла подвергают дробеструйной обработке, наносят приформовываемую массу и отверждают до момента потери ею липкости.

Способ нанесения приформовываемой массы зависит от типа наполнителя в ней. Приформовываемую массу на основе стеклянной ткани наносят преимущественно вручную аналогично выкладке слоев материала при контактном формовании. Применяют послойную укладку или используют пакеты из стеклянной ткани. Прочность стыковых соединений (выполняемых в идеальных условиях) при послойной укладке приформовочной массы и использовании пакетов одинакова. Однако прочность соединений, изготовленных в производственных условиях укладкой пакетов, на 25 – 34 % ниже прочности соединений, изготовленных способом послойной укладки. Поэтому на практике применяют последний метод, несмотря на его более низкую производительность.

При выполнении углового соединения приформовываемую массу целесообразнее наносить в виде пакета из двух-трех слоев стеклянной ткани, причем первый и последний слои следует укладывать отдельно. Поверхности деталей сначала покрывают слоем связующего (преимущественно кистью), затем на них укладывают первый слой армирующей ткани наименьшей длины и пропитывают связующим с помощью кисти. Аналогично поступают со вторым и последующими слоями ткани до получения накладки необходимой толщины.

Для окончательной пропитки ткани и удаления из нее воздушных пузырей накладку прикатывают рифлеными валками (с продольными или кольцевыми канавками), валками из перфорированного листа или валками с поверхностью из проволочной сетки, так как они не разбрызгивают смолу, хорошо вытесняют воздушные пузырьки и не приклеиваются к приформовываемой массе в отличие от гладких валков. Чтобы не промывать валки (например, из полипропилена) после окончания прикатки, используют сменные чехлы из полиамидного плюша.

Одним из недостатков приформовки методом, аналогичным контактному формованию, является неравномерная пропитка накладок связующим, что объясняется трудностью поддержания постоянного усилия (50...160 Н) при ручной прикатке валками. Применение валков с регулируемым прижимом, например пневматическим способом, позволяет улучшить качество накладок.

Прочность стыковых и угловых соединений при расположении деталей в нижнем и вертикальном положениях практически одинакова, а при расположении деталей в потолочном положении – уменьшается соответственно на 20...40 и 24...30 %. Такое снижение прочности объясняется трудностью обеспечения качественной прикатки накладок вручную и возможностью образования в них пор.

Для фиксации перед приформовкой элементов жесткости, соединяемых с корпусной деталью, применяют деревянные бруски, временно приклеиваемые к корпусу. Клей выбирают таким, чтобы бруски можно было легко удалить после приформовки. Для того чтобы ускорить проведение подготовительных монтажных работ и снизить затраты на производство, с одной стороны элемента жесткости экструзией наносят уголок из полиэтилена.

Для ускорения нанесения приформовочных накладок можно использовать препрег. Однако укладка препрега – достаточно трудоемкий процесс, при котором к тому же труднее обеспечить нормальные санитарные условия труда.

Более совершенна приформовка так называемым симплекс-методом, сущность которого заключается в пропитке уложенной ткани одновременно с уплотнением формуемой накладки. Связующее подается по шлангу непосредственно в прикатывающие полые рифленые валки с отверстиями.

Отверждение связующего при приформовке происходит преимущественно без приложения давления и без нагрева. Можно создавать давление с помощью мешков и диафрагм подобно вакуумному формованию, а на заготовку, нанесенную методом намотки, – с помощью резиновой ленты или (при горячем отверждении) с помощью намотанной термоусаживающейся ленты, например, из пленки ПЭТ. Выдержка при комнатной температуре в зависимости от рецептуры связующего составляет от 24 ч до трех суток. Более прогрессивной является технология формованных соединений, при которой предусматривается дополнительная обработка шва в поле токов высокой частоты, в электростатическом поле, с помощью ультразвука или электромагнитных вибраторов. Наиболее целесообразно проводить обработку шва через 30 ч (но не позднее чем через 70 ч) после нанесения приформовываемой массы на основе полиэфирного связующего. Упрочнение соединения при его обработке в поле токов высокой частоты и электростатическом поле объясняется дальнейшей полимеризацией связующего, ориентированием диполей вдоль силовых линий поля, а следовательно, усилением их взаимодействия и возрастанием глубины диффузии связующего в материал соединяемых деталей. При ультразвуковой обработке и обработке электромагнитными вибраторами происходит главным образом уплотнение материала накладок.

При использовании в качестве приформовываемой массы композиции на основе рубленого стеклянного волокна операцию нанесения материала накладок можно механизировать. Особенно это эффективно при угловом соединении полотнищ или оболочки с элементами жесткости, так как, например, трудоемкость изготовления формованных уголков в зависимости от их типоразмера, массы и конфигурации составляет 25...30 % общей трудоемкости изготовления корпуса судна.

Механизированным способом формирования заготовки накладки при выполнении соединения элементов жесткости с обшивкой корпусов судов из стеклопластика служит напыление приформовываемой массы. Этот способ характеризуется производительностью в 3 – 3,5 раза большей, чем при контактном формовании и, кроме того, позволяет применять более дешевые материалы по сравнению с приформовкой методом контактного формования, снизить массу приформованных уголков и увеличить прочность углового соединения при отрыве.

На современных установках, снабженных устройствами регулирования и настройки, можно изменять производительность напыления, соотношение между связующим и стеклянным волокном в приформовываемой массе, а также длину волокон. С помощью такой установки материал уголков можно напылять в горизонтальном, наклонном и вертикальном положениях, т.е. при угле наклона обшивки к горизонтальной плоскости 0...90°.

Приформовка при сборке изделий, имеющих форму тел вращения (трубопроводы, цилиндрические контейнеры и др.), выполняется подобно намотке. Места стыка или перекрытия деталей заматывают лентой из стеклянного волокна, стеклянной ткани или другого наполнителя, пропитанного преимущественно полиэфирным или эпоксидным связующим, которое затем отверждают, в ряде случаев применяя высокочастотный нагрев.

Заключительной операцией в технологическом процессе приформовки является контроль качества соединения. При визуальном контроле проверяют наличие складок в материале, смещений наружных слоев накладок, разрывов армирующих наполнителей, участков с неоднородной пропиткой связующим. С помощью разрушающих методов контроля определяют прочность соединения образцов при различных видах нагружения.

Качество формованных соединений (в судостроении) оценивают главным образом по их непроницаемости и наличию сквозных внутренних дефектов. Более удобным и более чувствительным методом контроля непроницаемости по сравнению с известным методом "керосин – мел" является люминесцентный. Дефекты обнаруживаются по яркому желто-зеленому свечению люминесцентной жидкости, освещаемой источником УФ-света. Таким методом контроля удобно пользоваться для оценки плотности (проницаемости) узлов, в которых продольные элементы жесткости конструкции проходят сквозь непроницаемые переборки (перегородки).

Из современных методов неразрушающего контроля в технологии сборки применительно к формованным соединениям наибольший интерес представляют ультразвуковая дефектоскопия и рентгенография (см. гл. 1.12).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сироткин О.С., Литвинов В.Б., Гришин В.И.** Технология и механика соединений. М.: ООО "М. Арктика", 2000. 314 с.

2. **Воробей В.В., Сироткин О.С.** Соединения конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 168 с.

3. **Комаров Г.В.** Способы соединения деталей из пластических масс. М.: Химия, 1979. 288 с.

Раздел 2

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Глава 2.1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ПЛАСТМАСС

Конструкционные пластмассы – полимерные материалы (ПМ), комплекс свойств которых обеспечивает возможность применения их в конструкциях, работающих при воздействии значительных механических нагрузок.

Необходимые показатели эксплуатационных свойств могут быть достигнуты при использовании как термопластичных (на основе полипропилена, АБС-пластиков, полиамидов, поликарбоната и др. полимеров), так и термореактивных (на основе фенолоформальдегидных смол, эпоксидных олигомеров, ненасыщенных полиэфиров и др. олигомеров и мономеров) ПМ. Изготовление деталей из ПМ связано с протеканием во время переработки их полуфабрикатов широкого круга физических, химических и физико-химических процессов. Степень завершенности этих процессов оказывает решающее влияние на формирование комплекса эксплуатационных свойств готовых деталей. Анализ методов переработки позволяет выделить ряд свойств полуфабрикатов ПМ, знание которых позволяет грамотно подходить к конструированию оснастки, выбору технологических режимов и управлению технологическим процессом, обеспечивая получение качественной продукции. Комплекс таких свойств, различных для термопластов и реактопластов, принято называть технологическими.

2.1.1. ТЕРМОПЛАСТЫ

Большинство полуфабрикатов термопластичных ПМ поступает на переработку преимущественно в гранулированном виде и обрабатывается в виде расплавов. Возможность их успешного превращения в качественные детали зависит от молекулярной массы полимеров, влажности, теплофизических свойств, реологических характеристик, термостабильности их расплавов, усадки. Технологические свойства должны соответствовать режимам переработки и техническим характеристикам оборудования. Развитие вычислительной техники позволяет создавать сложные математические модели, которые с достаточной точностью описывают процессы переработки полуфабрикатов ПМ и являются средством их оптимизации. Это сравнительно новое направление в методике проектирования технологии переработки предусматривает исследование технологических свойств термопластов с целью не только контроля качества и сравнительной характеристики полуфабрикатов, но и математического моделирования процессов обработки.

Важнейшей характеристикой полимеров является их молекулярная масса, для оценки которой обычно используется значение приведенной вязкости их растворов; она связана с мол. массой M простым отношением $\eta = KM^{\alpha}$, где η – вязкость; K и α – константы для каждой пары полимер–растворитель. К сожалению, для значительной части термопластичных полимеров, особенно относящихся к конструкционным (полиамиды, поликарбонат, полисульфон и др.), выбор подходящих растворителей весьма ограничен. Поэтому в качестве технологического свойства, характеризующего величину мол. массы полимера, обычно используют показатель текучести расплава (ПТР), который обратно пропорционален мол. массе (см. ниже).

Технологические свойства и качество готовой продукции существенно зависят от влажности термопластов. Под влажностью понимают содержание влаги в ПМ, выраженное в процентах его массы. Избыточное количество влаги вызывает ухудшение внешнего вида готовых деталей – помутнение, образование пор и ухудшение качества поверхности. У некоторых термопластов даже ничтожные количества влаги (0,05...0,1 %) вызывают рез-

кое ухудшение деформационно-прочностных характеристик готовой продукции в результате интенсивного протекания деструктивных процессов (гидролиз).

Существует несколько методов определения влажности; наиболее простой – сушка образца до постоянной массы (обычно в вакууме), однако его недостатки – продолжительность и низкая точность. Значительно большей точностью характеризуется метод Фишера, который основан на взаимодействии йода с диоксидом серы в присутствии воды. Однако этот метод достаточно сложен в аппаратурном оформлении, что ограничивает его применение. Данные о влажности позволяют оценить необходимость предварительной сушки исходного сырья и ее режимы.

Теплофизические характеристики – теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, температурный коэффициент линейного расширения и особенно температуры переходов (стеклования, текучести, плавления) – определяют процессы нагрева и плавления гранул в цилиндре литьевых и экструзионных машин, процессы затвердевания расплавов в форме и на калибрующих устройствах, т.е. в конечном итоге определяют режимы всех процессов переработки полуфабрикатов термопластичных ПМ.

Температуры переходов – температура стеклования $T_с$, температура текучести $T_т$, температура плавления $T_{пл}$ – характеризуют способность термопластичных полимеров переходить из одного состояния в другое. $T_с$ и $T_т$ характерны для аморфных полимеров, неспособных к кристаллизации, $T_{пл}$ – для полимеров, охлаждение расплава которых сопровождается образованием кристаллической фазы. Аморфный полимер ниже $T_с$ является твердым телом, выше $T_т$ – высоковязкой жидкостью, а в интервале температур между $T_т$ и $T_с$ при приложении нагрузки дает значительные обратимые деформации (такое состояние называется высокоэластическим).

Кристаллизующийся полимер ниже $T_{пл}$ проявляет свойства твердого тела, а выше $T_{пл}$ является жидкостью, вязкость которой у различных полимеров может меняться в широких пределах.

Указанные температуры определяют как температурный интервал переработки, так и температурную область эксплуатации каждого конкретного ПМ – в зависимости от прилагаемых нагрузок.

Обработка полуфабрикатов ПМ на основе аморфных полимеров осуществляется либо выше $T_т$ (литье под давлением, экструзия), либо в интервале $T_т - T_с$ (вакуум-формование, выдувное формование), ПМ на основе кристаллизующихся полимеров – выше $T_{пл}$. При низких температурах – ниже $T_с$ и $T_{пл}$ – для изготовления изделий могут использоваться только традиционные методы механической обработки.

На практике температуры переходов определяют обычно термомеханическим методом. Для этого к образцу прикладывают небольшую по величине нагрузку и при плавном повышении температуры измеряют изменении деформации. На кривых полученных зависимостей у аморфных ПМ имеются две характерные точки – при резком увеличении угла наклона кривой ($T_с$) и при резком возрастании деформации после некоторого плато ($T_т$). На аналогичной кривой у кристаллизующегося термопласта фиксируется только одна точка – резкое увеличение деформаций после плавления полимера ($T_{пл}$).

Как правило, детали из конструкционных термопластов могут эксплуатироваться при температурах ниже $T_с$ и $T_{пл}$.

Теплоемкость C термопластов по порядку величины близка для большинства термопластов. В практических целях можно считать, что величина C не зависит от гидростатического давления, незначительно увеличивается (15...30 %) с возрастанием температуры вблизи областей температурных переходов и резко возрастает в области плавления материала (в 5 – 10 раз).

Теплопроводность λ и температуропроводность a также имеют близкие значения для большинства конструкционных термопластов. Величина λ термопластов в твердом состоянии увеличивается с повышением температуры, а у расплавов термопластов она практически не изменяется. У кристаллических термопластов λ снижается с ростом температуры.

При ориентации ПМ λ возрастает в направлении ориентации в 5 – 10 раз и снижается в перпендикулярном направлении (на 20...30 %).

Для термопластов $a = \lambda/C\rho$, где ρ – плотность расплава; приближенные значения коэффициента сжимаемости расплавов и температурного коэффициента линейного расширения составляют соответственно $1{,}5\cdot10^{-9}$ Па$^{-1}$ и $5\cdot10^{-4}$ К$^{-1}$.

Реологические технологические свойства обусловливают характер гидродинамических процессов при литье, экструзии и других процессах обработки. Важнейшей реологической характеристикой является вязкость расплава. При небольших напряжениях и скоростях сдвига вязкость остается постоянной – это наибольшая ньютоновская вязкость, значение которой $\eta_н \approx M^{3,5}$, где M – мол. масса. Существует критическая мол. масса сегмента $M_с$, ниже которой $\eta_н \approx M^{\beta}$, где $\beta \le 1$; при $M < M_с$ обрабатывается уже не полимер, а олигомер.

Как уже отмечалось, одной из реологических характеристик, связанных с мол. массой полимера, является ПТР. Он характеризует расход материала в процессе течения расплава через стандартный капилляр при заданных температуре и давлении. Значение ПТР – количество выдавленного полимера в г/10 мин – определяют на специализированной капиллярном вискозиметре – экструзионном пластометре ИИРТ или ИИРТ-М. Прибор состоит из цилиндра с поршнем, на выходе из цилиндра устанавливается капилляр (обычно диаметром 2 мм, длиной 8 мм). После термостатирования и создания с помощью груза необходимого давления выходящий из капилляра пруток взвешивают и вычисляют ПТР = $600\,m/t$, где m – масса прутка, г; t – время, с. По величине ПТР можно судить о целесообразности переработки ПМ тем или другим методом. Если при известной температуре обработки ПТР составляет 0,01…0,03 г/10 мин, то его следует перерабатывать методом прессования. Для переработки методом экструзии используется полимер ПМ с ПТР от 0,3 г/10 мин (трубные марки) до 1,5…3 г/10 мин (пленочные марки). Для литья под давлением применяют марки с ПТР 5…20 г/10 мин, для производства волокон – 15…30 г/10 мин.

Определение ПТР необходимо для контроля качества сырья – в соответствующих ГОСТах и ТУ приводятся условия определения (нагрузка, температура) и значения ПТР для соответствующих марок (табл. 2.1.1).

Каналы оборудования для переработки ПМ имеют конечную длину, поэтому при определении потерь давления на течение в таких каналах нельзя пренебрегать потерями давления на входе в канал и выходе из него.

При течении любой жидкости с постоянным расходом через сужающийся канал в зоне его сужения затрачивается дополнительная кинетическая энергия, необходимая для изменения профиля скоростей и средней скорости течения. Поскольку расплавы ПМ представляют собой упругие жидкости, при их течении в зоне сужения канала необходимы затраты дополнительной энергии на обратимое деформирование жидкости. Как правило, для расплавов термопластов эта энергия значительно больше кинетической поправки. Потери давления $p_{вх}$ на входе в канал составляют основную долю общих потерь давления при течении расплавов ПМ через фильеры и точечные впуски литьевых каналов. Построив зависимости потерь давления для семейства капилляров с различным отношением длины к диаметру для ряда значений скорости сдвига, можно получить функцию $p_{вх}(\dot{\gamma})$. Поскольку $p_{вх}$ зависит от упругих свойств расплава, эта функция является сравнительной характеристикой технологических свойств сырья, т.е. два образца могут иметь одинаковые вязкости, но разные функции $p_{вх}(\dot{\gamma})$.

Расплавы термопластов являются малосжимаемыми средами, однако при значительных гидростатических давлениях вязкость заметно возрастает. Экспериментально доказано, что с ростом давления потери на входе в канал изменяются согласно формуле $p^{p}_{вх} = p^{0}_{вх}\mathbf{e}^{2p\beta}$. Величина β – постоянная для каждой родственной группы ПМ и мало изменяется в зависимости от напряжения. Учет зависимости вязкости и потерь давления на входе в канал необходим при анализе процессов литья при высоком давлении и расчете точечных впусков.

Влияние давления на реологические свойства полистирола, поликарбоната и полисульфона становится достаточно значительным при $p \ge 30$ МПа, полиэтилена – при $p \ge 100$ МПа. Так, при общем перепаде давления в канале ($L/d = 100$, где L – длина капилляра; d – диаметр капилляра), равном 90 МПа, вклад величины $p_{вх}$ составляет 70 МПа.

2.1.1. Условия определения ПТР полимеров

Полимер	Температурный интервал обработки, К	Условия определения ПТР		Температурный интервал эксплуатации, К	Энергия активации вязкого течения кДж/моль
		Нагрузка, Н	Температура, К		
Полиэтилен высокой плотности (ГОСТ 16338–85)	473...533	50,0	463	173 343	25.. 32
Полиэтилен низкой плотности (ГОСТ 16337–77)	453 ..493	21,6	463	173...373	54 57
Полипропилен (ГОСТ 26996–86)	463...543	21,6	503	263...363	38.. 46
Полистирол (ГОСТ 20282–86)	453...513	50,0	473	233...343	96
Ударопрочный полистирол (ГОСТ 28250–89)	453. 503	50,0	473	233.. 343	73
АБС-пластик (ТУ 6-05-1587–84)	473 .513	216,0	483	233...343	–
Сополимеры стирола марок МС, МСН (ГОСТ 12271–76)	453...503	100,0	473	233...338	–
Полиамид ПА-6 (ОСТ 6-06-09–93)	503...543	21,6	508	223...353	38. .54
Полиамид ПА-610 (ГОСТ 10589–87)	493...543	21,6	508	213...343	38...46
Полиамид ПА-12 (ОСТ 6-05-425–92)	513...553	21,6	508	213...333	43. .62
Поликарбонат (ТУ 6-06-68–89)	523...563	21,6	553	173...393	110...126
Полиформальдегид, сополимеры формальдегида (ТУ 6-05-1543–87)	463...493	21,6	463	213...343	21...25
Полиэтилентерефталат (ТУ 6-06-415–73)	533...543	–	–	213. 443	86. 107
Полибутилентерефталат (ТУ 6-05-211-1117–77)	508 ..533	21,6	523	233...413	71...98
Полиметилметакрилат (ОСТ 6-02-112–90)	463...503	125,0	463	223...363	–
Полисульфон (ТУ 6-05-211-939–80)	553...613	21,6	573	213...423	71...77
Полиарилат (ТУ 6-05-221-669–83)	553...623	–	–	213. 423	–

При большой скорости деформирования напряжения в расплаве не успевают релаксировать, что обусловливает неустойчивость течения в каналах перерабатывающего оборудования, отличающуюся от явления турбулентности, наблюдаемого при течении низкомолекулярных жидкостей.

При достижении неустойчивого режима течения в процессе переработки термопластов качество экструдата резко снижается, наблюдаются колебания давления и расхода материала, а также другие нежелательные явления. Критическая скорость наступления неустойчивого режима течения определяет верхний допустимый предел скорости экструзии при заданных размерах формующего инструмента.

Возможны два принципиально различных типа неустойчивости течения. Первый связан с переходом ПМ в вынужденное эластическое состояние под действием больших скоростей и напряжений сдвига: не успевая релаксировать, расплав начинает скользить по стенкам канала. Критерием оценки неустойчивости такого типа является критическое напряжение сдвига $\tau_{кр}$. Наблюдается резкое повышение скорости деформирования (на несколько порядков) в узком интервале скоростей сдвига; как правило, $\tau_{кр} = 10^5 \ldots 10^6$ Па. При этом расплав ПМ не течет в канале, а скользит по его стенкам. Явление "срыва" наблюдается также при течении наполненных термопластов.

Второй тип неустойчивости – разрушение расплава: под действием растягивающих напряжений на входе в канал расплав разрушается, поток жидкости теряет сплошность. При постоянном объемном расходе наблюдается колебание давления и из канала выходит негладкий экструдат. Для оценки условий возникновения нерегулярного режима течения этого типа следует использовать поправку $e = p_{вх}/2\tau$. Значение критической величины входной поправки $e_{кр}$ составляет как правило 6–7.

В условиях переработки термопластичных ПМ может происходить деструкция полимера, т.е. разрушение макромолекул. Склонность термопласта к деструкции характеризуется временем термостабильности – временем, в течение которого вязкость расплава или ПТР изменяется на 10...15 %. Такая величина выбрана потому, что более точно измерить вязкость промышленными приборами не представляется возможным. За нормируемый показатель термостабильности принимают также отношение ПТР расплавов до и после прогрева в течение заданного промежутка времени (5... 30 мин). ПМ считается термостабильным, если за время более 15 мин его вязкость или ПТР не изменяются. Исходя из требований к готовой детали и стабильности технологического процесса, можно также задаваться величиной допустимого относительного изменения вязкости при выбранной температуре переработки. Время, за которое происходит такое изменение, является допустимым временем пребывания термопласта в каналах перерабатывающего оборудования.

Оценка формуемости является важной проблемой в технологии обработки ПМ. Технологические свойства в полной мере характеризуют поведение материала в процессе переработки только в комплексном виде. Каждый отдельный показатель, реологический или теплофизический, не определяет всей совокупности технологических проблем, которые во многом зависят еще и от оборудования или оснастки.

Вследствие этого для более полной оценки формуемости используют метод определения длины течения по спирали. Этот показатель, получаемый на специальной литьевой форме (расширяющаяся спираль Архимеда, имеющая в сечении форму полуокружности), зависит от всех технологических факторов, определяющих течение ПМ и его затвердевание при литье под давлением. Длина спирали позволяет также определить оптимальный диапазон температур и давлений литья, оценить влияние компонентов ПМ (наполнителей, смазок и т.д.) на его формуемость.

Процессы уплотнения полуфабрикатов ПМ при переработке, транспортировке и дозировании определяются объемными характеристиками сыпучих гранулированных материалов в твердом состоянии. Насыпная плотность – масса единицы объема гранулированного ПМ (кг/м^3). Насыпная плотность сыпучих материалов зависит от формы и размеров частиц ПМ, его плотности и гранулометрического состава. Материалы с низкой насыпной плотностью (200...400 кг/м^3) обладают, как правило, плохой сыпучестью, поэтому при их объемной дозировке нарушается точность дозирования, что может сопровождаться нарушением режимов переработки, снижением производи-

тельности оборудования и увеличением выхода бракованных деталей. Оптимальное значение насыпной плотности конструкционных термопластов 600...800 кг/м^3. Разница между насыпной плотностью гранул и плотностью расплава определяет необходимую степень сжатия шнеков экструзионных агрегатов.

Гранулометрический состав термопластов определяется размерами и формой гранул. Для беспрепятственной подачи необходимо, чтобы они имели форму цилиндров, кубиков или эллипсоидов диаметром 2...4 мм и длиной 4...6 мм. Содержание гранул большего (6... 8 мм) или меньшего (0,5...1,5 мм) размера не должен превышать 5...7 %, в противном случае возможно зависание гранул в воронках или в горловинах бункеров.

Кроме насыпной плотности важными технологическими параметрами являются коэффициенты внутреннего и внешнего трения гранул полимера, знание которых необходимо для расчета длины загрузочной зоны экструдера.

Некоторые данные о характеристиках основных видов гранулированных термопластов приведены в табл. 2.1.2.

Различие объема ПМ в твердом и расплавленном состоянии, т.е. его усадка, определяется разностью температурных коэффициентов объемного расширения и сжимаемости ПМ под действием давления на материал в форме. Значения усадки необходимо знать при конструировании деталей и формообразующей оснастки. ПМ на основе аморфных полимеров обладают меньшей усадкой, чем усадка ПМ на основе кристаллических полимеров.

Усадка практически всех отливаемых деталей неоднородна, что объясняется неравномерным охлаждением изделий из-за их различной толщины, а также из-за различий в степени ориентации полимера в различных частях детали. Усадка уменьшается при использовании наполненных ПМ, а также при уменьшении интервала между температурой расплава и температурой литьевой формы.

2.1.2. РЕАКТОПЛАСТЫ

Основная масса полуфабрикатов из реактопластов в исходном состоянии представляет собой сыпучие порошкообразные материалы. Их свойства и возможности использования зависят от плотности, влажности, сыпучести, слеживаемости, насыпной плотности. Контроль этих технологических характеристик предусматривается соответствующими стандартами на материалы.

Наиболее распространенным методом определения плотности пресс-порошков и гранул является пикнометрический метод. Он основан на сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества и жидкости с известной плотностью; жидкость должна хорошо смачивать испытуемый материал, не вызывая его растворения или набухания.

Плотность материалов готовых деталей оценивается с помощью метода гидростатического взвешивания.

Удельный объем (насыпная плотность) порошков и гранул характеризуется отношением объема формовочной массы к ее массе и оценивается путем взвешивания массы материала, заполнившей измерительный цилиндр при свободном его заполнении высыпающимся из воронки материалом. Он позволяет оценивать структуры различных партий материала, знание его необходимо при проектировании технологического оборудования и оснастки. Порошки с малым удельным объемом имеют лучшую сыпучесть при таблетировании, и поэтому загрузочная камера пресс-формы может быть меньше.

На объемные характеристики материала и его поведение в процесс уплотнения большое влияние оказывает гранулометрический состав – соотношение количества частиц материала, различных по величине.

Распределение частиц порошка или гранул носит статистический характер, его определение основано на применении седиментационного, микроскопического или ситового анализа. На практике обычно используется ситовой анализ, для проведения которого используют набор сит с различным диаметром отверстий и оценивают массовую долю, оставшуюся на каждом из сит. Испытания проводят путем встряхивания набора сит с навеской с определенной частотой и амплитудой.

От гранулометрического состава существенно зависит плотность пресс-порошка – при колебаниях гранулометрического состава нарушается точность объемной дозировки. Однородность порошка влияет также на тепловой режим в пресс-форме – крупные частицы прогреваются медленнее мелких, что ухудшает качество поверхности готовых деталей.

2.1.2. Характеристики гранулированных термопластов

Полимер	Насыпная плотность, г/см^3	Размер гранул, мм	Плотность (при 293 К), г/см^3	Коэффициент трения по стали, %	Содержание влаги, %	Содержание летучих, %	Усадка, %
Полиэтилен высокой плотности	0,50...0,55	2×5	0,95	0,12	–	0,25	1,0...3,0
Полиэтилен низкой плотности	0,50...0,55	2×5	0,91...0,93	0,33	–	0,10	2,0...5,0
Полипропилен	0,40...0,50	2×5	0,90	–	–	0,90...0,20	1,9...2,0
Полистирол	0,56...0,63	3×5	1,05...1,08	–	0,15...0,30 (T = 343 К, τ = 2...3 ч)	0,05...0,80	0,4...0,8
Ударопрочный полистирол	–	2×5	1,04...1,06	–	0,10...0,20	0,08...0,10	0,4...1,0
АБС-пластик	0,65...0,75	–	1,04...1,05	–	0,30 (T = 353 К, τ = 3...4 ч)	0,10	0,3...0,7
Сополимеры стирола марок МС, МСН	–	2×5	1,12...1,14	–	0,10 (T = 343 К, τ = 4...5 ч)	0,40...0,80	1,2...2,5
Полиамид ПА-6	0,65...0,75	2×3	1,13...1,14	0,20...0,30	0,20 (T = 363 К, τ = 6...8 ч)	–	1,2...1,7
Полиамид ПА-610	0,60...0,70	2×5	1,08...1,10	0,26...0,32	0,20 (T = 358 К, τ = 6...8 ч)	–	0,8...1,5

Продолжение табл. 2.1.2

Полимер	Насыпная плотность, г/см^3	Размер гранул, мм	Плотность (при 293 К), г/см^3	Коэффициент трения по стали, %	Содержание влаги, %	Содержание летучих, %	Усадка, %
Полиамид ПА-12	0,50...0,60	2×4,5	1,01...1,02	0,28...0,30	0,12 (T = 358 К, τ = 5...7 ч)	0,50	0,7...1,5
Полиамид ПА-66	–	–	1,13...1,14	0,15	–	–	1,7...1,8
Поликарбонат	0,65...0,70	2×4	1,19...1,20	0,45...0,55	0,02 (T = 393 К, τ = 8...9 ч)	0,20	0,6...0,8
Полиформальдегид, сополимеры формальдегида	0,60...0,78	4×4	1,41	0,28...0,37	0,01 (T = 363 К, τ = 4 ч)	0,20	1,5...3,5
Полиэтилентерефталат	0,75...0,85	–	1,31...1,32	0,27	0,01 (T = 383 К, τ = 5...7 ч)	–	1,2...1,7 / 0,5...0,7
Полибутилентерефталат	0,73...0,88	–	1,29...1,30	0,15	0,01 (T = 393 К, τ = 8...9 ч)	–	0,9...2,2
Полиметилметакрилат	0,72...0,74	–	1,27...1,31	–	0,01	–	0,2...0,6
Полисульфон	0,70...0,74	2×6	1,18...1,20	0,13...0,17	0,01 (T = 393 К, τ = 8...10 ч)	–	0,7

Примечания: 1. В скобках указана температура и продолжительность сушки. 2. Числитель – при температуре формования 413 К, знаменатель – 323 К.

Сыпучесть характеризуется массой порошка, истекающего из отверстия воронки определенного диаметра за 1 мин. Обычно используют воронку с углом конуса 40° и диаметром сопла 6 мм, однако в некоторых стандартах используют сопла диаметром 10 мм. Сыпучесть может быть охарактеризована также продолжительностью истечения через воронку 100 г неуплотненного порошка. Для оценки сыпучести используют также такой показатель, как угол естественного откоса. Он оценивается по величине угла между горизонтальной плоскостью и образующей конуса, который возникает при высыпании порошка через воронку на горизонтальную плоскость.

Значительная часть пресс-порошков перед обработкой таблетируется с целью уменьшения объема загрузочной камеры, улучшения условий теплопередачи и снижения пылеобразования при дозировке. Способность материала уплотняться в компактную таблетку под действием сжимающих усилий характеризует таблетируемость материала. Она зависит от гранулометрического состава, формы и размера частиц порошка, влажности, присутствия смазывающих веществ. Таблетируемость оценивается по изменению объема пресс-порошка в цилиндрической пресс-форме при воздействии на него давления таблетирования. Как и остальные объемные технологические свойства, таблетируемость определяется в состоянии поставки – без предварительной сушки или другой обработки.

К числу важных технологических характеристик термореактивных пресс-материалов относится содержание влаги и летучих. Содержание адсорбированной влаги и количество летучих, образующихся в результате протекания поликонденсации в ходе обработки реактопластов, оказывает существенное влияние как на выбор параметров процесса обработки (температура, давление, количество подпрессовок), так и на качество готовых деталей. Поэтому определение этих характеристик предусматривается практически всеми стандартами на пресс-материалы. Повышенное количество летучих веществ и влаги ведет к излишнему повышению текучести пресс-материала (см. ниже). Недостаточное содержание влаги ухудшает таблетируемость и затруднят прессование, так как влага и летучие выполняют роль смазки.

Как правило, стандартные методы предусматривают определение общего содержания влаги и летучих путем сравнения массы навески до и после нагрева при заданных режимах. Навеска материала прогревается в бюксе в термошкафу при температурах, близких к температуре обработки (прессования) данного материала в течение определенного времени (15...30 мин). Бюксы с высушенным материалом охлаждают в эксикаторе в течение 25... 30 мин, после чего повторно взвешивают. Содержание влаги рассчитывается как $x = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \cdot 100\%$, где m – масса бюкса, m_1 и m_2 – масса бюкса с навеской до и после сушки.

Для определения содержания влаги (без летучих веществ) сушку проводят при температуре ниже температуры интенсивного отверждения (при 105 ± 5 °С), а также применяют методы титрования с помощью реактива Фишера (см. выше) или метод Дина и Старка. Последний метод основан на азеотропной отгонке воды с использованием органических растворителей (бензол, толуол). Отгонку ведут в специальный приемник-ловушку, где водный слой отстаивается до прекращения увеличения объема водной фазы. Содержание воды рассчитывается по формуле $x = (a - b) \cdot 100/m$; где a – количество воды в рабочем опыте; b – количество воды в холостом опыте (чистый растворитель); m – навеска материала, $см^3$.

В некоторых случаях представляется необходимым оценить содержание связующего в пресс-материале (обычно в стеклопластиках).

Содержание связующего удается определить только в материалах с минеральным наполнителем. Для его определения применяют метод выжигания. Пробу помещают в прокаленный тигель и выдерживают в муфельной печи при режимах, обеспечивающих полную деструкцию связующего; предварительно в той же пробе при температуре 105 ± 5 °С оценивают содержание влаги. Температура прокаливания в муфеле в зависимости от вида связующего находится в интервале 500...900 °С.

Текучесть применительно к пресс-материалам – это способность материала заполнять формующую полость пресс-формы под действием давления. По физическому смыслу текучесть – величина, обратная вязкости, она зависит от природы и молекулярной массы смолы или олигомера, вида и содержания наполнителя, количества влаги и летучих, режимов пред-

варительного подогрева и прессования. Хорошее заполнение пресс-формы в значительной мере зависит от скорости отверждения пресс-материала. При переработке быстро отверждающихся материалов возникает опасность отверждения материала раньше, чем он успеет заполнить полость пресс-формы. Поэтому текучесть следует оценивать в условиях, максимально приближенных к реальным процессам переработки, имея при этом в виду, что у термореактивных материалов при повышенной температуре в результате формирования пространственной сетки вязкость быстро возрастает, вплоть до полной потери текучести. Наличие влаги в пресс-материале способствует повышению текучести; однако избыток влаги весьма нежелателен, так как при этом значительно ухудшается качество поверхности изделий, теряется блеск. Поэтому очень важно поддерживать оптимальное содержание влаги в пресс-порошках – при чрезмерном повышении содержания влаги во время хранения текучесть возрастает настолько, что переработка становится невозможной.

Наиболее часто для оценки текучести пресс-материалов используют метод Рашига: текучесть определяется по длине стержня, отпрессованного в стандартных условиях в специальной пресс-форме. Пресс-форма представляет собой стальной корпус, состоящий из двух половинок и имеющий канал с постепенно уменьшающимся эллиптическим сечением.

Навеску материала массой 7...10 г таблетируют (удельное давление 50 МПа), помещают в камеру пресс-формы, нагретую до температуры обработки испытуемого материала, и быстро прессуют под постоянным давлением 30 МПа в течение 3 мин. Текучесть характеризуется длиной стержня, измеряемой в мм до границы плотно запрессованного материала. Несмотря на то что текучесть является качественной характеристикой, она служит нормирующим показателям для многих типов реактопластов.

При переработке реактопластов нагретый материал в вязкотекучем состоянии заполняет полость нагретой пресс-формы, где происходит его отверждение. Поэтому к важнейшим технологическим характеристикам относятся вязкостные свойства и скорость отверждения.

Вязкостные свойства непосредственно определяют технологический режим формования, а скорость отверждения – продолжительность цикла изготовления и качество деталей. Для определения вязкостных свойств и скорости отверждения реактопластов используются пластометрические методы испытаний. Приборы для измерений – пластометры – универсальны и позволяют реализовать широкий спектр напряжений и скоростей деформирования, они сравнительно просты по конструкции и обеспечивают возможность физического моделирования как отдельных стадий, так и всего технологического процесса формования. Так как производство деталей из реактопластов обычно связано с использованием высоких давлений, температур и скоростей сдвига, то получение объективной информации об основных технологических свойствах возможно лишь при проведении испытаний в условиях, близких к производственным.

Наиболее полно этим требованиям отвечают ротационные пластометры ППР, ПВР и "Полимер-РІ", имеющие незначительные конструктивные различия. Работа всех этих приборов основана на измерении крутящего момента в процессе деформирования образца реактопласта в узком зазоре между двумя коаксиальными сфероцилиндрическими поверхностями пресс-формы при постоянных давлении, температуре и скорости деформирования.

Рабочий узел пластометра "Полимер Р-І" (рис. 2.1.1) выполнен в виде пресс-формы, оформляющая часть которой включает пуансон, матрицу и ротор, расположенные в обогреваемой обойме. Для исключения проскальзывания испытуемого материала в процессе

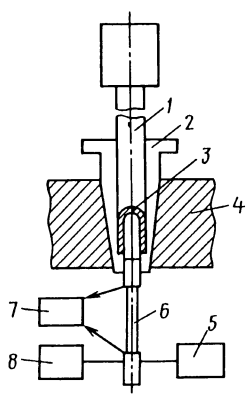


Рис. 2.1.1. Рабочий узел пластометра "Полимер Р-І":
1 – пуансон, *2* – матрица, *3* – ротор, *4* – обогреваемая обойма, *5* – привод; *6* – динамометр, *7* – индукционный датчик, *8* – вторичный прибор

испытаний на формующих поверхностях пуансона, матрицы и ротора нанесено 18 рифлений глубиной 1 мм под углом 60°. Ротор вращается от привода, который включает синхронный электродвигатель, жестко связанный с десятиступенчатой коробкой скоростей. Между коробкой скоростей и ротором установлен динамометр с торсионом, жестко связанным одним концом с ротором, а другим – с приводом. В процессе испытания вращение ротора с постоянной частотой в зависимости от вязкости испытуемого материала вызывает изменение угла закручивания торсиона, которое фиксируется индукционным датчиком. Результаты испытаний автоматически фиксируются на вторичном самопишущем приборе в виде кривых в координатах напряжение сдвига–время (рис. 2.1.2). Напряжение сдвига в вязкотекучем состоянии определяется отрезком *Od*, длину которого получают, продлив участок кривой, параллельный оси абсцисс, до пересечения с осью ординат. Время пребывания в вязкотекучем состоянии определяется отрезком *Oa*; за этот период напряжение сдвига τ_c, характеризующее процесс установившегося течения, увеличивается на $\Delta\tau_1 = 0{,}03$ МПа.

Вязкость реактопласта определяется формулой

$$\eta = \frac{\tau_{пл} \cdot 10^6}{\dot{\gamma}},$$

где $\tau_{пл}$ – напряжение сдвига в вязкотекучем состоянии, МПа; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, $с^{-1}$.

Типичная кривая, полученная при определении характеристик процесса отверждения при скорости сдвига 0,015 $с^{-1}$, представлена на рис. 2.1.3. Испытания прекращают, когда напряжение сдвига достигнет максимума или значения σ_x, которое можно определить из нормативно-технической документации на материал. Если значения нет в стандарте или в технических условиях, то для прессовочных марок реактопластов принимают σ_x, равным 6 МПа, а для литьевых – 3,5 МПа. Такие значения могут гарантировать минимальную степень отверждения, при которой возможна эксплуатация детали из данного материала.

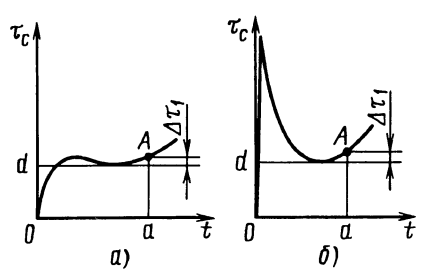


Рис. 2.1.2. Характерные пластометрические кривые при определении вязкостных свойств реактопластов при скорости сдвига $\dot{\gamma}$ = 0,015 1/с (*а*) и γ = 15 1/с (*б*)

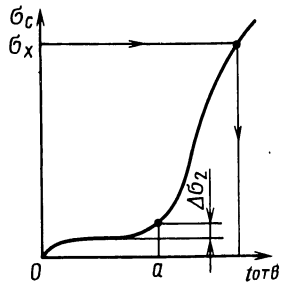


Рис. 2.1.3. Характерная пластометрическая кривая отверждения реактопластов

Время пребывания в вязкотекучем состоянии определяется отрезком *Oa*; за этот период напряжение сдвига, характеризующее процесс установившегося течения, увеличивается на $\Delta\sigma_2 = 0{,}3$ МПа. Время $t_{отв}$ отверждения определяется при напряжении сдвига $\sigma_c = \sigma_x$.

Оптимальной температурой прессования считается температура, при которой для получения образцов, соответствующих техническим условиям, требуется минимальная выдержка. Специальной методики для установления оптимальной температуры прессования не имеется.

В ряде случаев, в частности при использовании в качестве связующих ненасыщенных полиэфирных, олигоэфиракрилатных, эпоксидных и других видов смол, особенно в процессах контактного формования и совместного напыления стекловолокна и связующего, важной технологической характеристикой является время до потери связующим способности течь, которое называют жизнеспособностью, или временем гелеобразования. Оно может оцениваться либо с помощью вискозиметра (по времени достижения определенного значения вязкости), либо, что более точно, по термограммам, полученным в процессе отверждения; последний метод стандартизован.

В зависимости от условий обработки жизнеспособность может определяться при 25, 40, 60, 80, 100 °С. Приготовленный образец связующего, содержащий все компоненты в заданном соотношении, помещают в пробирке в термошкаф с заданной температурой. Там же устанавливают контрольный образец связующего без отверждающих компонентов; в каждую пробирку помещают спай термопары. По кривой самописца (или по результатам измерения изменения температур во времени) строят зависимость $T = f(t)$ (рис. 2.1.4), из которой можно определить соответственно жизнеспособность (AC) и время отверждения (AD) – до начала резкого подъема температуры и достижения максимальной температуры.

Усадкой называют уменьшение размеров детали после извлечения ее из оснастки, на которой она формовалась. Причинами усадки реактопластов в процессе отверждения являются:

охлаждение отвержденных деталей после извлечения из формы и различие температурных коэффициентов линейного расширения материала детали и формы (термическая составляющая усадки);

образование более плотных и упорядоченных структур в процессе отверждения (химическая составляющая усадки);

удаление влаги и летучих в результате нагрева ПМ и протекания процессов поликонденсации (или полимеризации).

Усадка зависит от вида связующего, количества и природы наполнителя, от содержания влаги, от полноты завершения химических процессов поликонденсации в процессе формования. На практике различают усадку действительную и расчетную.

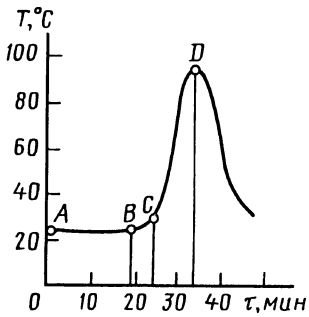


Рис. 2.1.4. Характерная кривая изменения температуры в процессе отверждения ненасыщенной полиэфирной смолы

Действительная усадка – процентное отношение разности между размерами оформляющей поверхности оснастки при температуре формования и детали при комнатной температуре к размеру детали при нормальной температуре.

Расчетная усадка – процентное отношение разности между размерами оснастки и детали к размерам детали при комнатной температуре.

Расчет ведется по формулам: $y_д = \frac{a-b}{b} \cdot 100\%$ и $y_р = \frac{c-b}{b} \cdot 100\%$, где a – размер оснастки при температуре формования; b – размер изделия при нормальной температуре; c – размер оснастки при нормальной температуре.

Кроме того, различают дополнительную (или эксплуатационную) усадку – разность размеров образцов до и после дополнительной обработки (или длительной выдержки), выраженную в процентах от первоначальных размеров образцов, а также анизотропию усадки – отношение величины усадки перпендикулярно к направлению формования к величине усадки вдоль направления формования. Помимо среднего значения усадки вычисляют колебания усадки как доверительный интервал отклонений, рассчитываемый по формулам математической статистики.

Уже отмечалось, что величина усадки имеет важное значение для технологического процесса изготовления деталей. Возрастающие требования, предъявляемые к качеству деталей из ПМ, распространяются и на стабильность размеров при различных условиях эксплуатации деталей. В настоящее время многие изделия из термореактивных пластических материалов имеют допуски по четвертому, третьему, а иногда по второму классам точности. Соблюдение таких допусков возможно только при правильном расчете оснастки, в основу которого положено точное значение величин усадки ПМ, и при использовании ПМ, дающих малую усадку и, что особенно важно, при минимальном разбросе значений усадки у различных партий одного и того же ПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богданов В.В.** Методы исследования технологических свойств пластмасс. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1978. 176 с.

2. **Гурова Т.А.** Технический контроль производства пластмасс и изделий из них. М.: Высшая школа, 1991. 255 с.

3. **Ставров В.П., Дедюхин В.Г., Соколов А.Д.** Технологические испытания реактопластов. М.: Химия, 1981. 248 с.

4. **Яковлев А.Д., Здор В.Ф., Каплан В.И.** Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе. М.: Химия, 1971. 256 с.

Глава 2.2

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Нет ни одной отрасли машиностроения, в составе продукции которой не использовались бы детали, узлы или целые агрегаты из полимерных материалов (ПМ) самых различных видов.

По оценкам специалистов, структуру потребления инженерных (конструкционных) ПМ в машиностроении можно представить следующим образом: автомобили и другие транспортные средства – 50 %; промышленное оборудование – 30 %; авиационно-космическая техника – 15 %; прочие – 5 %.

В современном автомобиле применяется боле 500 наименований деталей из ПМ, составляющих в общей массе примерно 70... 100 кг.

В качестве примера использования конструкционных ПМ в автомобилестроении можно привести детали, составляющие основные части автомобиля:

подкапотное пространство и шасси (бачки радиатора, корпусы аккумулятора и расширительного бачка, центробежная крыльчатка насоса, рычаги педалей, трубопроводы, шланги и др.);

система отопления (корпусные каркасные детали, кран отопителя, роторная и осевая крыльчатка и др.);

интерьер (внутренняя облицовка салона, панель приборов, основание и спинка сидений, панели дверей и др.);

экстерьер (бамперы, спойлеры, колпаки колес, навесные панели кузова и др.).

В станкостроении в настоящее время используется свыше 2000 наименований деталей из ПМ, различных по назначению, применяемым материалам и серийности выпуска. Одной из наиболее распространенных областей применения ПМ в этой отрасли являются детали управления, которые в зависимости от назначения подразделяют на две группы. К первой группе относят детали наружных органов управления – это рукоятки, ручки, маховики, кнопки и др. Вторая группа – детали управления, служащие для передачи усилия от одного органу станка к другому. Это всевозможные рычаги переключения, передачи крестовины, вилки, подшипниковые узлы и др. Значительную часть полимерных деталей, применяемых в станках, составляют ограждения, крышки, кожухи, фланцы, емкости и др.

Большое разнообразие машиностроительных элементов по размерам и эксплуатационным свойствам обусловило неодолимость их формования различными методами.

2.2.1. ЛИТЬЕ

Литье под давлением является наиболее производительным и прогрессивным методом изготовления машиностроительных деталей как из термопластов, так и из реактопластов. Этим методом перерабатывается около 50 % потребляемых ПМ в детали различной конфигурации массой от нескольких граммов до десятков килограммов и толщиной от 0,5 до 10 мм. Например, детали пар трения (подшипники, зубчатые передачи, втулки и др.), эластичные детали (уплотнения, демпферы, манжеты и др.), корпусные детали (бампер автомобиля, элементы остекления, панели приборов и др.).

При формовании литьем под давлением ПМ вначале расплавляется, а затем под высоким давлением впрыскивается в полость закрытой формы. При литье деталей из термопластов заполнивший форму расплав охлаждается и затвердевает, а затем форма открывается и детали извлекаются из формы. Если перерабатывают реактопласт, то впрыснутый в форму ПМ нагревают до температуры отверждения и выдерживают в течение времени, необходимого для его завершения.

Для осуществления литья под давлением применяют плунжерные и шнековые литьевые машины объемом впрыска от 5 до 100 000 $см^3$ (рис. 2.2.1).

Литьем под давлением изготовляют также микродетали массой 1 мгм, и для их производства имеется специализированное оборудование.

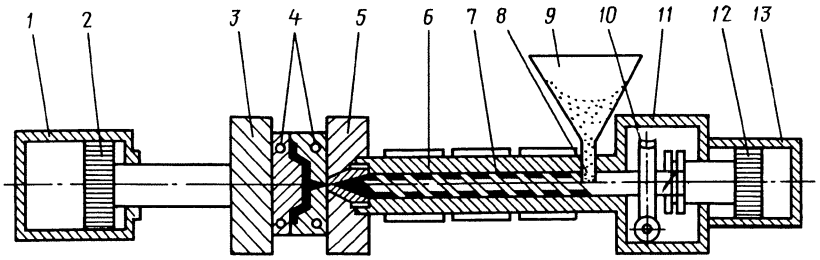


Рис. 2.2.1. Схема литьевой машины со шнековой пластикацией расплава:
1 – гидроцилиндр механизма смыкания, *2* – поршень гидроцилиндра механизма смыкания, *3* – подвижная плита; *4* – полуформы, *5* – неподвижная плита; *6* – пластикационный цилиндр, *7* – шнек; *8* – загрузочное окно цилиндра пластикации, *9* – бункер; *10* – привод шнека; *11* – корпус гидроцилиндра механизма впрыска, *12* – поршень гидроцилиндра впрыска; *13* – гидроцилиндр шнека

Литье осуществляется в режиме интрузии или в инжекционном режиме. При интрузионном режиме расплав постепенно подается в форму вращающимся шнеком до заполнения ее на 70...80 %, а затем оставшаяся часть дозы впрыскивается в форму с помощью поступательного движения шнека. При инжекционном режиме вращение шнека ведется только в период набора дозы материала и его пластикации в инжекционном цилиндре литьевой машины, а подача расплава в форму осуществляется только путем поступательного движения шнека. Режим интрузии используется при изготовлении крупногабаритных толстостенных деталей, а инжекционный процесс получил более широкое распространение для производства различных деталей, в том числе и микродеталей.

В связи с повышением эксплуатационных требований к деталям из ПМ, а также развитием дизайна, например, автомобиля, возникли специальные способы, такие, как литье прецизионных деталей, многоцветных и многокомпонентных, вспененных и стеклонаполненных деталей.

Для литья под давлением используют в основном гранулированные термопласты (реже – порошкообразные) с показателем текучести расплава (ПТР) 2...60 г/10 мин. Перед литьем под давлением необходимо удалить из материала избыток влаги и летучих, так как их присутствие в расплаве приводит к образованию пор в готовой детали, трещин на ее поверхности и других дефектов. При переработке термопластов, склонных к гидролитической деструкции (полиамиды, полиэфиры), даже следы влаги приводят к снижению молекулярной массы, а следовательно, и эксплуатационных характеристик деталей.

Совокупность операций при литье под давлением составляет цикл формования. Цикл состоит из следующих стадий: загрузка сырья в цилиндр литьевой машины, пластикация, смыкание формы, заполнение формы расплавом, выдержка под давлением в форме, выдержка без давления в форме, раскрытие формы и извлечение деталей. Основные стадии литьевого цикла различаются давлением p в форме (рис. 2.2.2).

Начальный участок нулевого давления от (точки 0 до точки *1*) – это время, предшествующее началу заполнения формы, в течение которого форма закрывается и сопло подво-

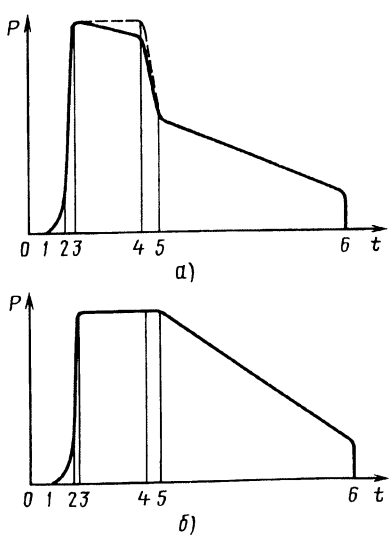


Рис. 2.2.2. Диаграмма литьевого цикла:
а – сопло без обратного клапана,
б – сопло с обратным клапаном

дится к литниковому каналу формы; участок *1 – 2* – это период впрыска. Пока форма не заполнена ПМ, давление в ней невелико. После заполнения формы давление быстро возрастает до максимального значения (участок *2 – 3*). Стадия уплотнения – участок *3 – 4*. На этой стадии цикла течение расплава в форму почти полностью прекращается. Из сопла в форму поступает только небольшое количество расплава, компенсирующее сжимаемость под действием повышенного давления и уменьшение удельного объема в результате охлаждения и температурной усадки. Если конструкция узла впрыска литьевой машины обеспечивает постоянное давление впрыска, то по мере охлаждения и усадки находящегося в форме расплава литьевой поршень будет перемещаться вперед, нагнетая дополнительное количество расплава в форму. В этом случае давление расплава в форме во время стадии уплотнения остается постоянным (штриховая линия на рис. 2.2.2, *а*). Если литьевой поршень занимает в конце впрыска крайнее переднее положение, то во время стадии сжатия наблюдается некоторое уменьшение давления. Следующая стадия цикла – обратное движение литьевого поршня, называемая стадией утечки. Так как в этот момент давление в цилиндре машины оказывается меньше давления в форме, часть расплава вытекает из формы, и давление заметно снижается. Существуют узлы впрыска, оснащенные специальным обратным клапаном, предотвращающим обратное течение расплава (рис. 2.2.2, *б*). Последующее охлаждение расплава сопровождается температурной усадкой и уменьшением давления в форме до момента открытия, отмеченного на диаграмме точкой *б*.

Процесс заполнения формы и охлаждения формованной детали оказывает решающее влияние на надмолекулярную структуру, величину остаточных напряжений и, следовательно, на прочностные и эксплуатационные характеристики детали. Существуют различные методы управления процессом структурообразования, однако во всех случаях для получения оптимальной структуры детали необходимо грамотно выбрать основные параметры режима формования деталей (табл. 2.2.1).

2.2.1. Технологические параметры литья под давлением основных типов термопластов

Термопласт	Температура расплава, °С	Температура формы, °С	Давление литья, МПа	Давление в форме, МПа
Полиэтилен низкой плотности	180...240	20...50	80...120	30...60
Полиэтилен высокой плотности	200...280	30...80	80...140	30...60
Полипропилен	200...270	40...100	80...140	30...60
Полиамид-12	210...285	40...100	60...120	50...70
Полиамид-610	230...280	50...110	80...120	50...70
Полиамид-6	235...270	60...100	80...140	50...70
Полиамид-66	260...290	60...110	80...150	50...80
Сополимеры формальдегида	175...220	60...120	80...150	80...100
Полиформальдегид	185...220	60...120	80...150	80...100

Продолжение табл. 2.2.1

Термопласт	Температура расплава, °С	Температура формы, °С	Давление литья, МПа	Давление в форме, МПа
Полибутилен-терефталат	240...270	60...100	80...150	40...70
Полиэтилентере-фталат	265...280	80...140	70...150	40...70
Полистирол блочный	170...270	20...70	45...120	30...60
Полистирол ударопрочный	180...240	40...70	60...120	30...60
АБС-пластики	200...260	50...90	80...150	30...90
Полиметилме-такрилат	190...240	40...80	45...150	60...100
Поликарбонат	260...320	80...120	80...150	60...100
Полисульфон	280...350	80...150	120...150	60...100
Полифенилен-оксид	270...300	60...130	120...150	60...80
Поливинил-хлорид	160...210	20...60	60...150	50...80

Общая продолжительность цикла – один из основных технологических параметров, который влияет на производительность процесса литья. Продолжительность $\tau_ц$ цикла в конечном итоге определяется продолжительностью охлаждения материала в форме.

Продолжительность $\tau_{охл}$ охлаждения детали в форме в свою очередь связана с ее толщиной δ и конфигурацией, температуропроводностью a полимерного материала, температурами $T_р$ и $T_ф$ соответственно расплава и формы, а также с температурой $T_д$ в центре детали в момент извлечения ее из формы. Полная продолжительность охлаждения детали в форме представляет собой сумму продолжительностей охлаждения под давлением и охлаждения без давления и может быть рассчитана с учетом ряда допущений по формуле

$$\tau_{охл} = \ln\left(A\frac{T_р - T_ф}{T_д - T_ф}\right)\frac{\delta^2}{Ca},$$

где A и C – коэффициенты, определяемые формой детали (для плоской детали A = 1,27; $C = \pi^2$, для цилиндра A = 1,64; C = 5,76).

В связи с развитием компьютерной техники и созданием программных продуктов для моделирования процессов заполнения и охлаждения расплава в литьевой форме, расчеты технологических параметров литья, в том числе и процессов охлаждения, проводятся с применением компьютеров и такой известной программы, как "Mold Flou".

Одним из показателей качества машиностроительных деталей является точность их размеров. Допуск на детали, изготовленные традиционным методом литья под давлением, обычно соответствует 12...14 квалитетам точности системы ИСО. Допуск ε на деталь зависит в первую очередь от разброса значений средней усадки S и от точности изготовления формы и приблизительно определяется соотношением

$$\varepsilon > P_{\text{ф}}(S_{\max} - S_{\min})/2,$$

где $P_{\text{ф}}$ – размер формы.

Значения технологической усадки некоторых термопластов приведены в табл. 2.2.2.

Литье без давления. Процесс литья без давления позволяет изготовлять изделия непосредственно из мономеров или олигомеров, минуя промежуточную стадию получения полимера. Иногда этот процесс называют заливкой или химическим формованием. Большинство мономеров в жидком (расплавленном) состоянии обладают низкой вязкостью. Поэтому для осуществления процесса не требуется приложения значительного внешнего давления. Схема изготовления деталей литьем без давления представлена на рис. 2.2.3.

Методом литья без давления можно перерабатывать как мономеры, дающие при поли-

2.2.2. Технологическая усадка основных типов термопластов

Термопласт	Технологическая усадка, %
Полистирол	0,4...0,6
Поливинилхлорид (жесткий)	0,5...1,0
Полиамид-6	0,8...2,0
Полиамид-66	1,2...2,5
Полиэтилен низкой плотности	1,5...3,0
Полиэтилен высокой плотности	2,5...5,0
Полипропилен	1,3...3,5
Полиформальдегид	2,1...3,0

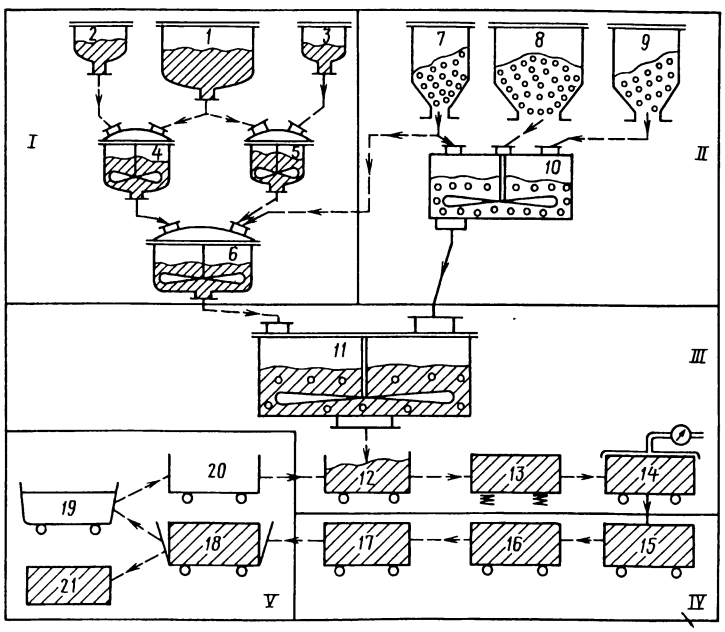


Рис. 2.2.3. Схема литья без давления:

1 – участок приготовления жидких компонентов смеси, *1* – емкость для мономера (смолы); *2* – емкость для катализатора (инициатора, отвердителя), *3* – емкость для активатора (пластификатора, разбавителя), *4*, *5* – реакторы для предварительного смешения компонентов, *6* – реактор для приготовления форполимера (связующего), *II* – участок приготовления твердых компонентов смеси, *7* – *9* – емкости для наполнителей, пигментов, модификаторов, *10* – промежуточный смеситель для сыпучих компонентов, *III* – участок смешения, заливки и формования композиций, *11* – смешение композиций, *12* – заливка композиции в форму; *13* – виброуплотнение композиции, *14* – вакуумирование композиции; *IV* – участок отверждения композиций; *15* – подогрев форм, *16* – выдержка форм до окончательного отверждения, *17* – охлаждение форм, *V* – участок подготовки форм, *18* – съем детали, *19* – чистка и сборка форм, *20* – смазки и подготовка форм, *21* – контроль качества деталей

меризации термопластичные продукты, так и реактопласты, дающие после отверждения неплавкие и нерастворимые продукты с пространственным строением макромолекул.

Типичными мономерами, дающими в процессе полимеризации термопластичные полимеры, являются жидкие акриловые мономеры или порошкообразный ε-капролактам, полимеризация которого с получением капролона происходит в расплаве. Для осуществления полимеризации к жидкому мономеру добавляют инициаторы или катализаторы, а также активаторы, ускоряющие их действие. Кроме того, в состав композиций могут входить наполнители (дисперсные или волокнистые), пластификаторы, пигменты или другие добавки, в частности, полимерные модификаторы (ПММА, ПС, ПВХ) или сомономеры (винилацетат, акрилонитрил, стирол и др.). Высокая прочность и химическая стойкость получаемых полиакрилатов и полиамидов, простота их обработки позволяют получать из этих материалов крупногабаритные детали: детали судовых механизмов, работающих в узлах трения, зубчатые колеса, прокладки, коробчатые изделия, стержни, прутки и др.

Для уменьшения тепловых эффектов, сопровождающих полимеризацию или отверждение мономерных или олигомреных композиций, а также для значительного снижения стоимости и материалоемкости деталей, применяют наполнение композиций до 80...90 % (об.). Высоконаполненные материалы после отверждения обладают хорошими конструкционными свойствами. Их прочность при сжатии близка к прочности гранита. Такие материалы называют полимербетонами. Применяют полимербетоны для изготовления коррозионностойкого технологического оборудования и строительных конструкций (фурфуролацетоновые полимербетоны), деталей прецизионных станков, машин и приборов (эпоксидные и акрилатные полимербетоны), декоративных покрытий (полиэфирные полимербетоны) и др.

Основной подготовительной операцией в производстве подобных деталей является сушка всех ингредиентов, в том числе минеральных наполнителей. Содержание влаги в них, например, при полимеризации ε-капролактама или полиэфирной смолы не должно превышать 0,02 %.

На стадии заливки композиций в форму требуется точное выполнение заданных временных и температурных параметров, так как даже 2–3-минутная задержка при заливке или небольшой перегрев реакционной массы приводят к частичной потере текучести. Для облегчения заполнения форм, удаления пузырьков воздуха, попавших в реакционную массу, и для ускорения процессов уплотнения наполненных и высоконаполненных композиций применяют вакуумирование или вибрацию. Вакуумирование до остаточного давления 0,004...0,007 МПа применяют обычно при формовании небольших изделий из жидких наполненных мономеров. Для уплотнения высоконаполненных композиций применение вибрации является необходимым, а источниками механических колебаний средней частоты (40...60 Гц) являются механические или гидродинамические вибраторы, создающие колебания вследствие вращения несбалансированных противовесов или вследствие колебательного движения сердечника в электромагнитной катушке.

2.2.2. ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ФОРМОВАНИЕ

Центробежным формованием изготовляют детали любой толщины, например, емкости больших размеров, дорожные конусы, разделительные барьеры и др. При этом отклонение от средней толщины может быть меньше 5 %.

Сущность метода заключается в следующем. Материал (порошкообразные термопласты, жидкие пластизоли и реактопласты) помещают в предварительно сомкнутую нагретую форму, которую приводят во вращение. Под действием центробежных сил материал прижимается к оформляющей полости формы, образуя тонкое покрытие, которое плавится под действием внешних нагревателей. После охлаждения и ее усадки оно свободно извлекается из формы.

Для центробежного формования используют одношпиндельные и многошпиндельные машины периодического или непрерывного действия. Наиболее широко применяют многошпиндельные машины трехпозиционного типа: один шпиндель находится в позиции нагрева, второй – в позиции охлаждения, а третий – в позиции загрузки материала и съема детали.

2.2.3. ПРЕССОВАНИЕ

Прессование – это процесс изготовления деталей, заключающийся в пластическом деформировании ПМ при действии на него давления и в последующей фиксации формы детали. Если формуемый материал способен к

пластической деформации без нагрева, то процесс ведется в холодной форме и носит название холодного прессования. Формование в нагретой форме, т.е. горячее прессование, применяют в том случае, если нагрев необходим для снижения вязкости материала перед подачей давления или когда фиксация формы детали осуществляется вследствие реакций отверждения, протекающих при повышенных температурах. Горячее прессование в зависимости от аппаратурного оформления проводится методами прямого или литьевого (трансферного) прессования.

Прямое прессование реактопластов применяется для изготовления несложных по конструкции деталей из пресс-порошков, волокнитов и слоистых пластиков. Давление в пресс-форме создается прессом, на котором она устанавливается с помощью крепежных плит.

Пресс-форма (рис. 2.2.4) состоит из пуансона и матрицы, снабженных нагревателями. Оформляющая полость пресс-формы соответствует форме детали. Материал загружается в открытую полость формы, затем пуансон опускается, материал уплотняется, заполняет оформляющую полость и выдерживается под давлением. После окончания выдержки пресс-форма раскрывается, и с помощью выталкивающего устройства деталь извлекается из пресс-формы.

Основные операции процесса прессования: входной контроль сырья, подготовка сырья и его дозирование, предварительный подогрев, формование в пресс-форме, термическая и механическая обработка деталей, контроль качества деталей.

Качество сырья оценивают по удельному объему, насыпной плотности, гранулометрическому составу, сыпучести, коэффициенту уплотнения, таблетируемости, текучести, продолжительности вязкотекучего состояния, скорости отверждения, усадке, содержанию влаги и летучих.

Подготовка сырья к прессованию включает его сушку. Для новолачных пресс-порошков температура сушки 100 °С, резольных и волокнита 80 °С. Предварительный подогрев пресс-материалов перед подачей их в пресс-форму позволяет в 2–3 раза снизить цикл прессования. Формование детали является основной операцией в процессе ее изготовления. Качество отформованной детали определяется выбором параметров процесса: давления прессования, длительности подпрессовок, температуры пресс-формы и продолжительности отверждения пресс-материала в пресс-форме. Термическая обработка деталей заключается в их отжиге при повышенных температурах с целью уменьшения остаточных напряжений. Механическая обработка деталей проводится с целью удаления излишков материала (облоя, грата), обеспечения требуемой конфигурации детали, изготовления резьбы или доводки размеров детали.

Литьевое прессование реактопластов. Метод литьевого прессования отличается от прямого тем, что пресс-форма имеет загрузочную камеру и соединенную с ней литниковыми каналами формующую полость (рис. 2.2.5).

Материал в виде таблеток, порошка или волокнистой массы после предварительного подогрева подается в загрузочную камеру, нагретую до необходимой температуры. Из загрузочной камеры после смыкания пресс-

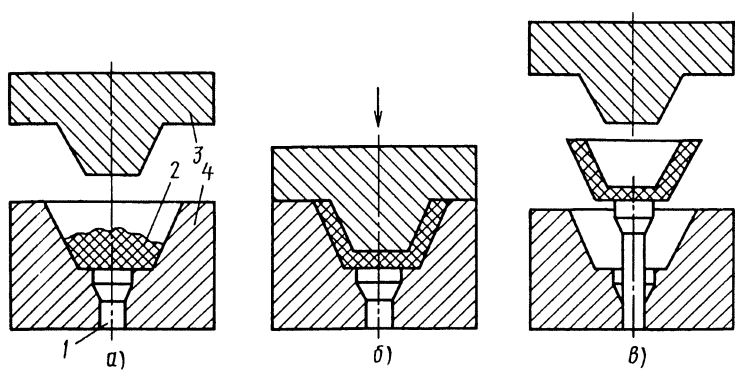


Рис. 2.2.4. Схема изготовления деталей методом прямого прессования:
а – загрузка пресс-материала; *б* – смыкание пресс-формы; *в* – раскрытие пресс-формы и извлечение деталей, *1* – выталкиватель; *2* – пресс-материал, *3* – пуансон; *4* – матрица

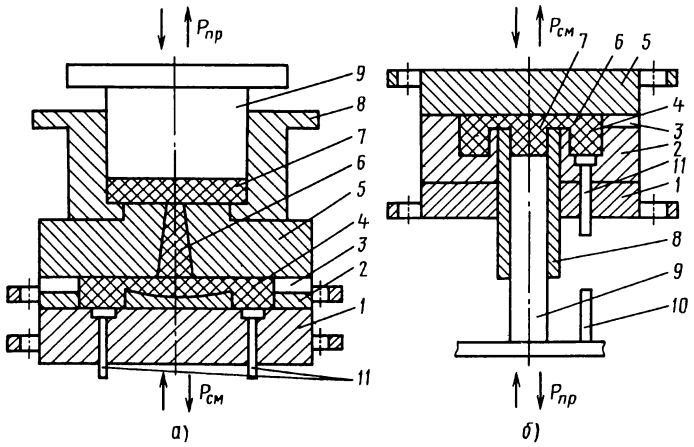


Рис. 2.2.5. Пресс-формы для литьевого прессования с верхней (*а*) и нижней (*б*) загрузочными камерами: *1* – нижняя плита, *2* – матрица; *3* – воздушные каналы; *4* – детали, *5* – верхняя плита, *6* – литниковые каналы; *7* – остаток пресс-материала, *8* – загрузочная камера; *9* – шток· *10* – стержень толкателя; *11* – выталкиватель

формы материал через литниковые каналы под давлением 80...120 МПа подается в оформляющую полость пресс-формы. При прохождении материала по литниковым каналам происходят его дополнительный нагрев и гомогенизация. Низковязкий расплав попадает в оформляющую полость, где давление равно атмосферному. Газообразные продукты, находящиеся в объеме материала, интенсивно выделяются и удаляются из формы через специальные воздушные каналы в плоскостях разъема оформляющей полости. После заполнения формующей полости материал затекает в зазоры, отверждаясь в них, и изолирует полость от атмосферы. Затем давление в формующей полости начинает повышаться до 25...30 МПа, и происходит уплотнение материала.

Прессование термопластов. Метод используется при изготовлении небольших партий толстых листов и блоков, в том числе оптически прозрачных, некоторых деталей из вспененных термопластов, деталей из высоконаполненных абразивными наполнителями термопластов с низким показателем текучести расплава, а также при переработке высоковязких, имеющих высокую температуру плавления ароматических полиамидов.

Материал в виде порошка, гранул или заготовок помещается в нагретую пресс-форму, температура которой несколько выше, чем температура $T_{пл}$ плавления кристаллических полимеров или температуры $T_{тек}$ текучести аморфных полимеров, выдерживается в пресс-форме до перехода в вязкотекучее состояние, затем под давлением, создаваемым прессом, оформляющая полость пресс-формы заполняется, материал уплотняется и деталь охлаждается под давлением вместе с пресс-формой до температуры, обеспечивающей ее формоустойчивость. Детали, изготовленные прессованием из термопластов, характеризуются меньшим уровнем остаточных напряжений, чем изготовленные литьем под давлением.

2.2.4. ЭКСТРУЗИЯ

Экструзия – это процесс изготовления из исходного термопластичного ПМ в виде гранул или порошка длинномерных деталей заданного поперечного сечения путем непрерывного продавливания расплава через формующий инструмент. Этим способом производят трубы, шланги, различные пленки, рулонные и листовые материалы, профили, изоляцию кабелей. Схема одношнекового экструдера представлена на рис. 2.2.6.

В процессе переработки исходный материал из загрузочного устройства поступает в материальный цилиндр и перемещается в осевом направлении в винтовом канале червяка, образованном внутренней поверхностью материального цилиндра и нарезкой червяка. При движении материал уплотняется, плавится, происходит удаление воздуха и гомогенизация расплава, развивается давление, под действием которого подготовленный расплав продавливается через формующий инструмент.

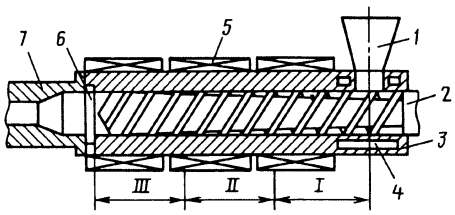


Рис. 2.2.6. Схема одношнекового экструдера:
1 – бункер, *2* – шнек, 3 – цилиндр, *4* – полость для циркуляции воды, 5 – нагреватель; *6* – решетка с сетками; *7* – формующий инструмент (профилирующая головка), *I, II, III* – технологические зоны

Агрегаты и линии на базе экструдеров отличаются большим разнообразием конструкций. Они классифицируются по многим технологическим и конструктивным признакам, таким, например, как форма поперечного сечения детали, способ формования, тип экструдера. Существуют агрегаты и линии производства гранул, плоских пленок, рукавных пленок, труб, открытых и закрытых профилей, кабельных покрытий. Сырьем для экструзии служат ПВХ и сополимеры винилхлорида, полиолефины, полиакрилаты, полиамиды, поликарбонаты, полиформальдегиды и др.

Из маловязких расплавов невозможно получить сплошную экструзионную заготовку в виде пленки, трубы или профиля. Для экструзии применяют материалы, у которых ПТР меняется в пределах 0,3...12 г/мин. При слишком высокой вязкости расплава получать детали экструзией трудно из-за большого сопротивления течению расплава и возникновения неустойчивого режима движения потока. Выходящий из головки экструдат должен обладать формоустойчивостью, которая в свою очередь зависит от температуры и молекулярной массы полимера. Требования к формоустойчивости зависят от последующих технологических операций: деформирования расплава в свободном состоянии или в калибрующем устройстве. Поэтому для различных видов продукции рекомендуется перерабатывать расплав с определенным ПТР. Трубы и кабельные покрытия производят из расплава полимера с ПТР 0,3...1 г/10 мин, а пленки и листы получают при экструзии расплава с ПТР в пределах 1...4 г/10 мин.

Обязательными операциями при экструзии всех видов продукции являются:

1. Приемка и подготовка материалов (смеситель, пневмозагрузчик, питатель);

2. Подготовка гомогенного расплава (червячный экструдер);

3. Формование профиля (экструзионная головка).

После выхода экструдата из профилирующей головки он последовательно подвергается дополнительным воздействиям (табл. 2.2.3), обеспечивающим получение заданных ему геометрии и качества.

Основными технологическими параметрами процесса эктрузии являются: температура в цилиндре и головке, частота вращения червяка, давление в головке и скорость (производительность). В табл. 2.2.4 для некоторых технологических процессов и некоторых перерабатываемых материалов приведены значения указанных величин.

Методом экструзии изготовляют также многослойные пленки и листы из полимерных материалов. В них сочетаются свойства различных составляющих ПМ: высокие механические свойства одного слоя с повышенной эластичностью другого, повышенной химической стойкостью третьего и т.д.

Имеется три основных способа производства многослойных пленок: соединение слоев перед экструзионной головкой, в самой головке, после выхода из головки. Такие процессы получили название соэкструзия.

Принцип соэкструзии основан на том, что каждый полимерный расплав подготавливается на своем экструдере, а далее потоки расплавов соединяются в общей головке, где и формуется изделие, состоящее из слоев разных ПМ. Такой способ называют "два (или несколько) экструдера – одна головка".

Другой способ, "два (или более) экструдера – две (или более) головки", предусматривает соединение слоев после выхода заготовок из головок на валковом оборудовании. Так, ПМ № 1, выходя из своей головки, принимается на горячий валок, передается на последующие и на последнем на него наносится экструдированная заготовка из ПМ № 2. Поскольку оба полимерных слоя находятся в расплавленном состоянии, то происходит прочное адгезионное соединение по границе раздела слоев.

При получении многослойных пленок или листов необходимо стремиться к тому, чтобы вязкость расплавов была одинакова или незначительно различалась. Температура расплава любого составляющего не должна превышать температуру деструкции любого из остальных.

2.2.3. Последовательность дополнительных операций и применяемые оборудование и оснастка при экструзии различной продукции из термопластов

Экструдат	Последовательность операций и их оснащение			
	1	2	3	4
Листы	Калибрование, глянцевание (каландр)	Охлаждение (рольганг)	Приемка (валки)	Резка, укладка (ножницы, листоукладчик)
Трубы, шланги, профили	Калибрование профиля (калибрующее устройство)	Охлаждение (ванна)	Приемка (тянущее устройство)	Резка, укладка или намотка (отрезное и намоточное устройства)
Рукавная пленка	Формование пленочного рукава – раздув потоком воздуха	Охлаждение рукава и складывание (охлаждающее, складывающее устройство)	Приемка, резка, намотка (специальные устройства)	–
Плоская пленка	Приемка и охлаждение (валки приемные и охлаждающие)	Продольное, поперечное ориентирование (устройство для ориентации)	Резка, приемка, намотка (ножницы дисковые, намоточное устройство)	–
Провода и кабели в полимерной изоляции	Нанесение изоляции провода кабеля (устройство отжига)	Охлаждение (ванна)	Намотка, резка (устройство барабанного типа)	–

Формующие головки для производства многослойных материалов методом соэкструзии следует изготовлять с большой точностью.

Если в состав многослойной пленки помимо ПМ входят и другие материалы (металлическая фольга, ткань, бумага и др.), то такие пленки называют комбинированными; если они состоят из двух слоев, то их называют дублированными. Такие пленки получают следующим образом.

Экструдируемый расплав ПМ наносится в виде пленки на движущуюся подложку, например, на ленты из бумаги, ткани, алюминиевой фольги или на готовую пленку из другого полимера. Для обеспечения хорошего контакта слоев в момент нанесения ПМ на подложку вновь сформированный комбинированный ленточный материал пропускается между дублирующими валками, например, каландра и далее постепенно охлаждается. Хорошая адгезия слоев достигается при большой эффективной поверхности контакта.

Особым вариантом дублирования является металлизация поверхности полимерных изделий.

2.2.4. Технологические параметры экструзии типовых деталей из термопластов

Термопласт	Детали	Максимальная производительность	Особенности экструдера	Формующий инструмент	Частота вращения червяка, $мин^{-1}$	Температура в цилиндре / температура в формирующем инструменте, °С
Непластифицированный ПВХ	Трубы, профили	30	Червяк $D = 45$ мм, $L = 25D$	Трубная головка с дорном	2...60	130...170 180
Пластифицированный ПВХ	Мягкие профили	250	Двухступенчатый червяк $D = 90$ мм, $L = 25D$	Профильная головка	13...142	125...160 175
	Кабели	650	Двухступенчатый червяк со смесительными элементами	Кабельная головка	5...153	125...160 175
ПЭНП гранулированный	Рукавные пленки	400	Двухступенчатый червяк со смесительными элементами	Пленочная головка	13...152	170...200 200
ПЭВП порошкообразный	Изоляция проводов	110	$D = 63$ мм, $L = 30D$	Кабельная головка	7...238	190...280 265
	Кабели	450	Цилиндр с водяным охлаждением загрузочной воронки	Кабельная головка	5...153	170...180 170
ПЭВП гранулированный	Кабели	560	$D = 125$ мм, $L = 25D$	Кабельная головка	5...153	190...220 235

2.2.5. КАЛАНДРОВАНИЕ

Каландрование – это процесс непрерывного формования полимерного материала при пропускании его расплава через зазор между вращающимися валками каландра. При этом происходит увеличение ширины ленты из ПМ при одновременном ее утонении. В результате каландрования получают полотно заданной толщины и ширины. Схема линии каландрования представлена на рис. 2.2.7.

Скорость получения конечного продукта зависит от ряда факторов: 1) способности каландра смешивать и расплавлять материал; 2) интенсивности воздействия рабочих органов каландра на свойства материала при его переработке; 3) требуемого комплекса свойств продукта, особенно качества поверхности листов и пленок.

Сравнительно несложно получать листы с грубой поверхностью толщиной $\geq 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ м, скорость процесса при этом может превышать 60 м/мин. Можно достигнуть и бóльших скоростей формования, если пленка предназначена для дальнейшей переработки, например, для нанесения покрытий или печати, так как в результате этих операций в значительной степени "залечиваются" дефекты, возникающие при каландровании.

Получение тонких пленок часто сопряжено с большими трудностями, однако, несмотря на это, скорости процесса могут достигать 100 м/мин. Для получения глянцевых тонких и жестких пленок и листов рабочую скорость приходится снижать до 10 м/мин.

Экструдер, питаемый перерабатываемым материалом, может подавать материал непосредственно в зазор каландра. Материал, проходя через решетку и фильтр экструдера, подвергается дополнительной гомогенизации.

Стабильность режимов каландрования является одним из основных условий успешного проведения процесса. Любые изменения параметров процесса необходимо проводить плавно. При скорости нагрева 1 °С/мин продолжительность нагрева рабочих органов до достижения требуемой температуры составляет 5...10 ч. Время выхода технологической линии на режим, позволяющий получать продукт стабильного качества, увеличивается также из-за большой тепловой инерции ПМ, для которых характерна низкая теплопроводность.

Ввиду большой длительности запуска в работу и технологической наладки каландров большой мощности промышленные производства выгодно оснащать группой каландров, каждый из которых выпускает продукт определенной (фиксированной) толщины. В этом случае не следует стремиться к достижению технологической гибкости и универсальности машин.

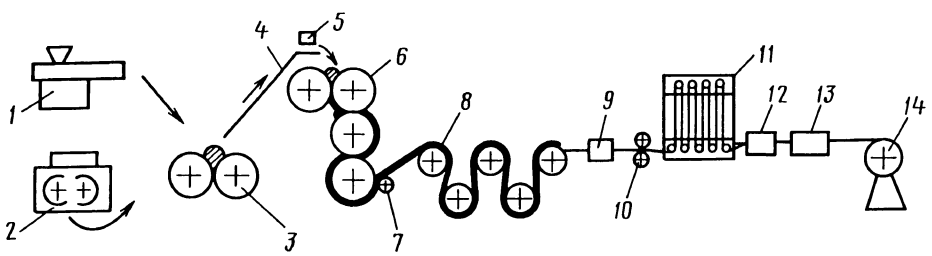


Рис. 2.2.7. Схема линии каландрования для производства пленок из пластифицированного ПВХ:
1 – смеситель непрерывного действия, *2* – смеситель периодического действия, *3* – вальцы, *4* – транспортер, *5* – детектор металлических предметов, *6* – каландр, *7* – приемный валок, *8* – охлаждающее устройство барабанного типа, *9* – устройство непрерывного автоматического контроля толщины, *10* – устройство обрезки кромок, *11* – многопетлевой компенсатор, *12* – счетчик метража, *13* – устройство поперченной резки пленки, *14* – намоточный агрегат

2.2.6. РАЗДУВНОЕ ФОРМОВАНИЕ

Объемные детали (автомобильные бензобаки, бочки, фляги, канистры и др.) из термопластов изготовляют тремя методами: а) сборкой с применением склеивания или сварки двух половин (заготовок), литьем под давлением или вакуум-формованием; б) раздувом сжатым воздухом трубчатой заготовки, изготовленной литьем под давлением; в) раздувом сжатым воздухом трубчатой заготовки, изготовленной экструзией. При массовом производстве объемных деталей целесообразно воспользоваться двумя последними методами, называемыми раздувным формованием. Преимущества этого метода: сравнительно простая технология производства, высокая производительность оборудования, возможность автоматизации производства и др. Изделия, полученные этим методом, обладают большой прочностью, имеют лучшее качество по сравнению с деталями, полученными методом центробежного формования.

Изготовление объемных изделий из термопластов методом раздувного формования состоит из двух стадий: 1) изготовление трубчатой заготовки и 2) раздув трубчатой заготовки сжатым воздухом. Заготовку из термопласта для последующего раздува можно получить, как было сказано выше, литьем под давлением или экструзией, поэтому различают два метода производства раздувных объемных изделий: литье с раздувом и экструзия с раздувом.

Сущность литья с раздувом заключается в следующем (рис. 2.2.8): термопласт в вязкотекучем состоянии впрыскивается под давлением в предварительно сомкнутую литьевую форму, внутри которой укреплен пустотелый сердечник. Трубчатая заготовка оформляется в зазоре между сердечником и внутренней поверхностью литьевой формы. Заготовка может быть отлита по форме, близкой к раздуваемой детали. При литье нераздуваемые части (горловина, резьба, ручки, приливы и др.) могут полностью соответствовать готовому изделию. После оформления заготовки литьевая форма сразу же размыкается и сердечник вместе с горячей заготовкой переносится в раздувную форму. После смыкания полуформ раздувной формы внутрь заготовки подается сжатый воздух, и заготовка раздувается по конфигурации оформляющей полости формы, при этом толщина стенок заготовки уменьшается, а ее размеры по сечению увеличиваются в 3 – 5 раз.

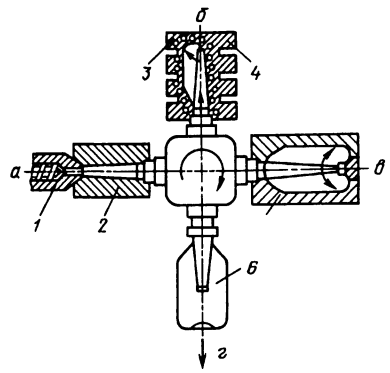


Рис. 2.2.8. Схема литья с раздувом объемных деталей:
а – формование заготовки литьем под давлением, *б* – термостатирование и предварительный раздув, *в* – раздув и охлаждение детали, *г* – удаление детали, *1* – механизм пластикации и впрыска, *2* – литьевая форма; *3* – форма для предварительного раздува, *4* – форма термостатирования; *5* – раздувная форма, *6* – деталь

Деталь охлаждается подаваемым на раздув холодным воздухом, а также при контакте с поверхностью оформляющей полости формы (полуформы охлаждаются водой). После окончании охлаждения детали полуформы размыкаются, и деталь удаляется. На производство объемных деталей литьем с раздувом требуются значительные капитальные затраты ввиду высокой стоимости оборудования, а также из-за дополнительных расходов на изготовление дорогостоящих литьевых форм. Поэтому данный метод рекомендуется лишь для производства небольших емкостей крупных серий, несмотря на то, что качество деталей, раздуваемых из заготовок, полученных литьем под давлением, значительно выше, чем изделий, раздуваемых из заготовок, полученных методом свободной экструзии. Однако наибольшее распространение в промышленности получила экструзия с раздувом, обеспечивающая высокую производительность при сравнительно невысоких капитальных затратах.

Сущность экструзии с раздувом состоит в следующем (рис. 2.2.9). Порошок или гранулы из термопласта загружаются в бункер экструдера и захватываются вращающимся червяком. За счет механической энергии вращающегося червяка и теплоты, подводимой к цилиндру экструдера нагревательными элементами, термопласт разогревается, пластицируется при интенсивном перемешивании и в

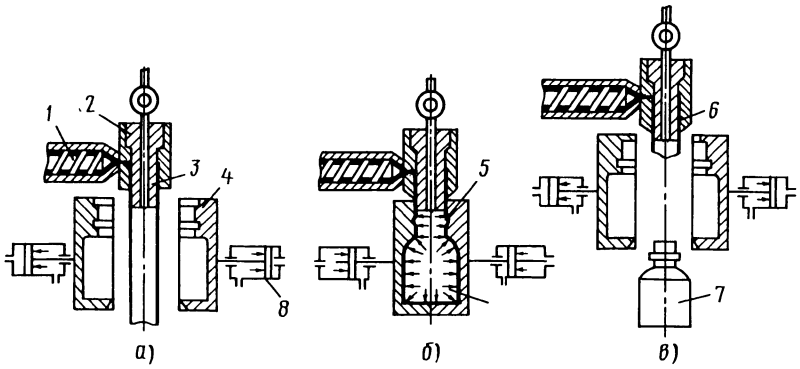


Рис. 2.2.9. Схема формования объемных деталей экструзией с раздувом:
а – выдавливание заготовки, *б* – раздув, *в* – съем детали, *1* – экструдер, *2* – экструзионная головка, *3* – дорн, *4* – полуформа, *5* – заготовка, *6* – мундштук, *7* – деталь; *8* – привод полуформ

размягченном состоянии выдавливается через формующий инструмент (прямоточную или угловую головку) в атмосферу в виде трубчатой или листовой заготовки. При достижении необходимой длины заготовки смыкаются полуформы раздувной формы. Внутрь заготовки подается сжатый воздух, который обеспечивает ее раздув. После охлаждения детали форма размыкается, и деталь удаляется.

Недостатком экструзии с раздувом является неравномерная толщина стенок детали (разнотолщинность), возникающая в результате разнотолщинности заготовки из-за ее вытяжки под действием собственной массы во время экструзии, а также из-за неравномерности температуры заготовки по высоте (более низкую температуру имеет нижняя часть заготовки, которая успевает значительно охладиться). Различие в толщинах стенок деталей круглого поперечного сечения по высоте может достигать 30...40 %, а для деталей других сечений – еще выше. Вторым недостатком этого метода является большое количество отходов – 50 % массы детали.

2.2.7. ФОРМОВАНИЕ ИЗ ЛИСТОВ И ПЛЕНОК

Большое количество объемных машиностроительных деталей (например, для отделки внутреннего салона автомобиля, кожухи, ограждения и др.) производят из листов, рулонных материалов и пленок.

В настоящее время известно три основных метода формования деталей из листов и пленок.

В основу классификации методов формования листовых и пленочных термопластов можно положить способы нагрева заготовки и создания давления формования. Различают следующие способы нагрева:

радиационный, когда лист размещается на определенном расстоянии от поверхности нагревателя;

контактный, при котором нагреваемый лист входит в контакт с обогревающей его поверхностью;

конвективный, при котором лист нагревается посредством омывания его теплоносителем (например, горячим воздухом).

Для того чтобы нагретый лист термопласта принял необходимую форму, на него воздействуют определенным давлением, которое создается по-разному.

При создании давления с помощью вакуума требуется герметизация полости под заготовкой. После герметизации из оформляющей полости выкачивают воздух. Давление под заготовкой постепенно уменьшается, в то время как над заготовкой давление воздуха попрежнему будет оставаться равным атмосферному. Заготовка начинает втягиваться в полость, из которой откачан воздух, и формуется в ней. Такой метод формования называют вакуумным (рис. 2.2.10). По мере увеличения разрежения под заготовкой будет расти давление формования. Обычно остаточное давление составляет 0,060...0,085 МПа, и его достаточно для формования деталей из листов толщиной до 5 мм. Для более толстых листов метод вакуумного формования практически не применяется.

Увеличить давление формования можно, если герметизировать полость над заготовкой и подать в нее сжатый воздух, а нижнюю по-

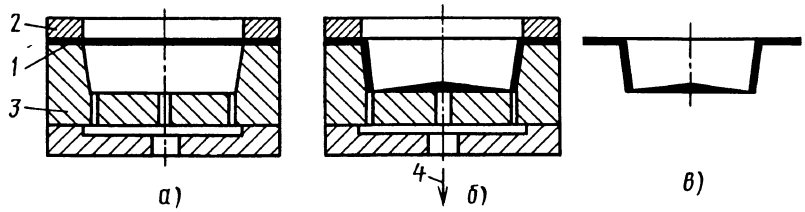


Рис. 2.2.10. Схема вакуумного формования:
а – исходное положение; *б* – формование; *в* – готовая деталь;
1 – заготовка; *2* – прижим, *3* – форма; *4* – соединение с вакуум-насосом

лость соединить с атмосферой. Как и в первом случае, заготовка примет вид формы, расположенной в нижней полости, однако давление формования при таком методе будет равно давлению сжатого воздуха минус атмосферное давление. Теоретически давление сжатого воздуха может быть любым, и давление формования в данном случае может быть сколь угодно большим. На практике давление формования сжатым воздухом колеблется от 0,15 до 2,5 МПа. Этим методом хорошо формуются детали из толстых заготовок, а также детали с глубокой вытяжкой и сложной конфигурацией. Такой метод формования называют *пневмоформованием* (рис. 2.2.11).

Иногда вместо сжатого воздуха используют жидкость, нагнетаемую под давлением в полость над листом из термопласта. Этот метод называют *гидроформованием*. Часто, чтобы избежать прямого контакта жидкости с термопластом, между заготовкой и жидкостью прокладывают резиновую мембрану.

В ряде случаев давление, необходимое для формования, создается механически (механическая штамповка).

Для получения качественных деталей сложной формы приходится использовать комбинации различных способов создания давления формования. Обычно сочетаются методы вакуумного, пневматического и механического формования.

Характеристика различных способов формования штамповкой и области их применения даны в табл. 2.2.5.

Правильный выбор метода формования дает возможность наилучшим образом сочетать конфигурацию, функциональное назначение и качество детали с технологичностью и экономичностью его производства.

Пневмовакуумформованием можно перерабатывать большинство термопластичных листовых и пленочных материалов. Основные требования к заготовкам для формования включают: низкую удельную теплоемкость, высокую температуропроводность, относительно низкую температуру формования.

Основные свойства листовых и пленочных ПМ, применяемых в промышленности, представлены в табл. 2.2.6.

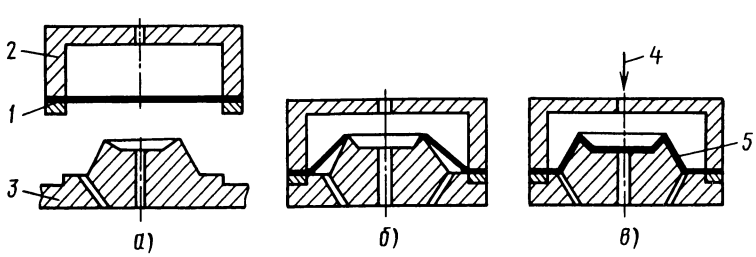


Рис. 2.2.11. Схема позитивного пневмоформования:
а – исходное положение; *б* – подвод пневмокамеры; *в* – формование; *1* – заготовка; *2* – прижим; *3* – форма,
4 – подача сжатого воздуха; *5* – деталь

2.2.5. Характеристика различных способов формования из листов и пленок и области их применения

Способ формования	Характеристика способа, области применения
Механическое формование	Возможность выполнения вручную; незначительная четкость контура деталей; толстое днище и неконтролируемое утонение стенок
Вакуум-формование	Ограничивается толщиной стенок детали 2 мм; для окончательного формования используется только вакуум; применяются негативные и позитивные способы формования с механической или пневматической предварительной вытяжкой
Пневмоформование	Высокое давление формования; возможно формование деталей толщиной более 2 мм; четкость контура деталей; точность размеров; применимы негативные и позитивные методы с механической и пневматической предварительной вытяжкой
Негативное формование	Сильное уменьшение толщины днища; хорошее качество внешней поверхности деталей; незначительная конусность деталей, формующие гнезда могут быть расположены на близком расстоянии друг от друга
Позитивное формование	Значительное утонение стенки в местах зажима; лучшее качество внутренней поверхности; большая конусность стенок формы

Правильный выбор температуры нагрева листовой заготовки, соответствующей эластическому состоянию термопласта, позволяет (в определенных пределах) регулировать механические свойства и разнотолщинность формуемого изделия.

У многих термопластов область эластического состояния охватывает довольно широкий интервал температур, и процесс формования можно вести во всем этом интервале. Однако свойства детали изделия будут существенно зависеть от той конкретной температуры, до которой была нагрета заготовка. При температурах, близких к температуре перехода термопласта из стеклообразного состояния в эластическое, в углах детали часто появляются потенциальные очаги растрескивания, свидетельствующие о хрупкости материала. При слишком высоких температурах заготовка либо слишком размягчается и провисает под собственной массой, либо подвергается термодеструкции. Перегрев заготовки в конечном счете может привести к образованию на детали морщин, ухудшает ее механические свойства и внешний вид.

В табл. 2.2.7 приведены температуры нагрева заготовок из некоторых термопластов при их формовании на пневмо- и вакуумформовочных машинах с нагревателями открытого типа.

Современные термоформовочные машины высокого класса снабжены нагревательными панелями с регулируемой температурой нагревателей или с возможным частичным отключением нагревателей в определенных местах конструкции изделия.

Температура формующего инструмента (матриц, пуансонов и др.), определяющая формоустойчивость детали, должна быть ниже температуры стеклования перерабатываемого термопласта. Иначе достаточного охлаждения отформованной детали не произойдет, и после

2.2.6. Свойства листовых и пленочных материалов

Наименование материала	ТУ, ОСТ, ГОСТ	Геометрические размеры, мм	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м^2	Теплостойкость по Вика, °С
Пленка ПЭТ аморфная	ТУ 6-49-5761783-339–90	Толщина 50...1000, ширина 400...700	25,3...35,7	250...300	–	120
Пленка ПВХ	ГОСТ 28520	Толщина 0,1...0,6, ширина 800...1600	29,4...39,2	10...20	9,8	70...85
Листы из ПВХ (винипласт)		Толщина 1,0...20,0, ширина от 500	50...55	10...15	–	70...85
Листы из ударопрочного полистирола	ОСТ 6-19-510–96	Толщина 1,4...6,25, ширина 630...1520	17,6...19,6	30...36	35...42	85
Листы из АБС-пластика	ТУ 2246-038-00203536–97	Толщина 2,0...6,0, ширина 400...1000	30,6...32,6	3...7	Не разрушается	95
Листы из ПММА (оргстекло)	ТУ	Толщина 0,8...24,0, ширина 400...1400	67...85	2,5...3,3	Толщина: до 4 мм – 8...10 5 мм и более 15...20	90
Листы из ПК	ТУ 6-19-322–86	Толщина 1...12	51...55,8	70...90	Толщина до 2 мм – не разр. 3 мм – 78 4…5 мм – 7,8 4...12 мм – 4,9	125...150
Листы из ПЭНД Листы из ПЭВД Листы из ПП	ТУ 6-49-3–88	Толщина 1,0...5,0, ширина 850...1450	20...30 10...14 28...30	120...400 210...600 100...200	Не разрушается то же --"--	90 120 140

2.2.7. Температурные режимы переработки листовых и пленочных термопластов методами пневмо- и вакуумформования

Материал	Температура, °С		
	нагрева заготовки	формообразующей оснастки	вспомогательного инструмента
АБС-пластики	140...160	40...50	75...115
Поливинилхлорид жесткий	100...160	40...50	60...150
Поликарбонат	190...230	45...55	–
Полиметилметакрилат	120...200	40...60	170
Полипропилен	150...200	50...90	130...160
Полистирол ударопрочный	110...150	50...65	80...120
Полисульфон	220...270	140...165	–
Полиэтилен:			
высокой плотности	120...135	50...70	150
низкой плотности	90...135	50...70	150
Этрол ацетилцеллюлозный	130...170	110...120	–

снятия формующего давления деталь потеряет полученную им в процессе формования конфигурацию. Однако чрезмерное понижение температуры формы может привести к недоформовке и короблению деталей в процессе их эксплуатации.

Температура вспомогательного формующего инструмента (пуансонов для предварительной механической вытяжки и др.) подбирается так, чтобы получить деталь с минимальной разнотолщинностью и стойкостью к растрескиванию. Рекомендуемые температурные режимы для формообразующей оснастки и вспомогательного формующего инструмента приведены в табл. 2.2.7.

Чтобы поддерживать необходимую температуру, формующий инструмент снабжается каналами для циркуляции жидкого теплоагента; реже его температура поддерживается с помощью обдува воздушными вентиляторами. Перепад давления, необходимый для формования той или иной конкретной детали, определяется: толщиной и материалом заготовки; сложностью конфигурации детали; допустимыми пределами скорости вытяжки данного термопласта.

При производстве деталей простой формы (не имеющих сложных переходов, мелких тиснений и рельефов поверхности) при глубине вытяжки H/D (D – внутренний диаметр протяжного кольца) не более 0,5 и толщине исходной заготовки до 5 мм рекомендуется применять вакуумное формование с перепадом давления до 0,1 МПа. Для более толстых листов рекомендуется пневматическое формование с давлением до 1 МПа.

Для получения деталей с большой глубиной вытяжки и со сложными рельефами на поверхности требуются повышенные давления. При этом происходит чрезмерное утонение стенок в местах углублений и в углах детали.

Предельные рекомендуемые значения глубины вытяжки H/D, а также двухосной ориентации заготовки (выраженной как отношение площади S_2 поверхности готового изделия к площади S_1 поверхности заготовки) приведены в табл. 2.2.8.

Большое значение имеет направление вытяжки, которое определяет ориентацию цепей макромолекул полимера и тем самым механические свойства детали. Максимальную механическую прочность деталь имеет в направлении вытяжки и минимальную в перпендикулярном направлении. Поэтому при конструировании детали, изготавливаемой методами пневмо- и вакуумформования, необходимо стремиться к тому, чтобы разность степеней вытяжки в различных направлениях не превышала 50...60 %.

Основная сложность при штамповке – получение детали с максимально возможной равнотолщинностью.

2.2.8. Предельные значения глубины вытяжки и двухосной ориентации заготовки

Материал	H:D	S_2:S_1
АБС-пластики	2:1	4:1
Поливинилхлорид жесткий и пластифицированный	1:1	4:1
Поликарбонат	1:1,75	2:1
Полипропилен	1,5:1	3:1
Полистирол ударопрочный	2:1	5:1
Полиэтилен высокой прочности	1,5:1	2,5:1
Этрол ацетилцеллюлозный	1:1,5	2:1

Примечание Данные получены при вакуумформовании с предварительной механической вытяжкой на образцах толщиной 0,5 мм

Перспективы развития технологии формования деталей из ПМ. Одним из перспективных направлений в указанной технологии является применение систем автоматизированного проектирования технологических процессов производства полимерной продукции. Автоматизированное проектирование производства, например, литьевых деталей заключается в том, что до проектирования оснастки и отработки технологического процесса формования новой детали средствами вычислительной техники и методами вычислительной математики моделируют основные стадии процесса литья под давлением. На основании полученных данных устраняют недостатки в конструкции детали и оснастки и в технологическом процессе, что приводит к экономии временных и материальных ресурсов в серийном производстве.

В технологии формования деталей из ПМ следует отметить тенденцию дальнейшего роста производства многослойной продукции методами экструзии, литья и раздувного формования. В многослойных деталях (минимальное – 2, максимальное – 11) каждый из слоев придает определенные свойства, например, атмосферостойкость, липкость, декоративность, прочность и др.

Развивается направление литья под давленым микродеталей из ПМ (массой до менее одного миллиграмма), для чего разрабатываются специализированные литьевые комплексы. Производство таких деталей требует создания совершенно новой концепции в аппаратурном оформлении и технологии их производства, требующей ужесточения точностных показателей технологических параметров процесса и характеристик оборудования, а также полной автоматизации производства.

Общей тенденцией в технологии формования деталей из ПМ является замена ручного труда автоматизированным производством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** технологии переработки пластмасс / Под ред. В.Н. Кулезнева и В.К. Гусева. М.: Химия, 1995. 526 с.

2. **Переработка пластмасс:** Справочник / Под ред. В.А. Брагинского. Л.: Химия, 1985. 450 с.

3. **Переработка** термопластов методами механо-пневмоформования / Под ред. К.Н. Стрельцова. Л.: Химия, 1983. 231 с.

4. **Справочник** по технологии изделий из пластмасс / Под ред. Г.В. Сагалаева, В.В. Абрамова, В.Н. Кулезнева, С.В. Власова. М.: Химия, 2000. 424 с.

5. **Техника** переработки пластмасс / Под ред. Н.И. Басова и В. Броя. М.: Химия, 1985. 527 с.

6. **Kunststoff-Taschenbuch**. 27 Ausgabe von K. Oberbach. München-Wien: Carl Hanser Verlag, 1998.

Глава 2.3

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

2.3.1. ПОНЯТИЯ, МЕХАНИЗМЫ И КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ СВАРКИ

Сварка – один из методов образования неразъемных (сварных) соединений деталей из полимерных материалов (ПМ). Сварные соединения как частный случай слипания (адгезии) могут быть отнесены к группе адгезионных соединений, в которую включены также клеевые (см. гл. 2.4) и формованные соединения (см. гл. 1.13).

Сварка представляет собой процесс заполнения межконтактного зазора (полости) между соединяемыми поверхностями материалом свариваемых деталей путем изменения состояния последнего, иногда с применением расплава или раствора присадочного материала, в результате чего первоначальная граница раздела исчезает, превращаясь в переходный слой с однородной или разнородной химической структурой. Прочность связи между свариваемыми материалами обусловливается возникающими в зоне шва силами межатомного и межмолекулярного взаимодействия.

Сварку предпочитают другим методам образования соединений деталей в тех случаях, когда: соединяемые детали изготовлены из одинаковых или совместимых материалов; недопустимо присутствие чужеродных по отношению к соединяемым материалам крепежных элементов или клеевых прослоек; требуется обеспечить высокую производительность, механизацию и автоматизацию процесса сборки изделий. Важное преимущество сварки – возможность изготовления монолитных конструкций или изделий минимальной массы. Недостатки – неразъемность сварных узлов, трудности при соединении деталей из разнородных материалов и с большой толщиной стенки; низкая прочность при расслаивающем нагружении.

На сварку, как и вообще на сборку изделий, поступают детали из материалов с оптимальными структурой и эксплуатационными свойствами. Поэтому при выборе способа сварки учитывают требование минимального изменения структуры и свойств материалов в зоне шва.

На технологию сварки пластмасс влияет в первую очередь свариваемость основы этих материалов – полимеров, которая в свою очередь зависит от физической и химической структуры последних.

В общем случае с точки зрения существа физико-химических процессов, протекающих во время сварки, можно выделить следующие основные ее стадии: придание полимеру необходимых реологических свойств (активирование свариваемых поверхностей); формирование контакта соединяемых поверхностей; взаимодействие между соединяемыми поверхностями; возможное вытеснение дефектных слоев; фиксирование структуры полимера в зоне соединяемых поверхностей.

Сварку термопластов проводят в расплаве, нагревая материал в зоне соединяемых поверхностей до вязкотекучего состояния (тепловая сварка) или воздействуя на него растворителем (сварка растворителем). Обязательным условием сварки полимерных материалов является приложение давления, являющегося движущей силой процесса формирования вязкого контакта поверхностей, преодолевающей действие поверхностных сил.

В зависимости от очередности нагрева и приложения давления тепловую сварку можно вести по двум схемам: 1) давление – температура (приведение поверхностей в контакт под давлением и последующий их нагрев); 2) температура – давление (нагрев соединяемых поверхностей и последующее приведение их в контакт). При сварке по первой схеме (рис. 2.3.1) в момент приложения давления происходит увеличение числа контактных площадок в результате развития макро- и микронеровностей поверхностей упругих и эластических деформаций. Если контактные напряжения превышают предел текучести или рекристаллизации термопласта, происходит перетекание материала из зоны контактных площадок в соседние полости. В этом случае обеспечивается беспористый контакт поверхностей. При последующем нагреве ($T_{св} > T_т$, $T_т$ – температура текучести термопласта) под давлением $\left(p = \left(h_0^2 / h_i^2 - 1\right) \frac{\eta l^2}{t_{св} h_0^2} \right)$ происходит релаксация упругих и эластических деформаций, что способствует получению ненапряженного шва, возможному протеканию диффузии и дальнейшему взаимодействию материалов. Одной из причин сегментального взаимопроникновения макромолекул в зоне

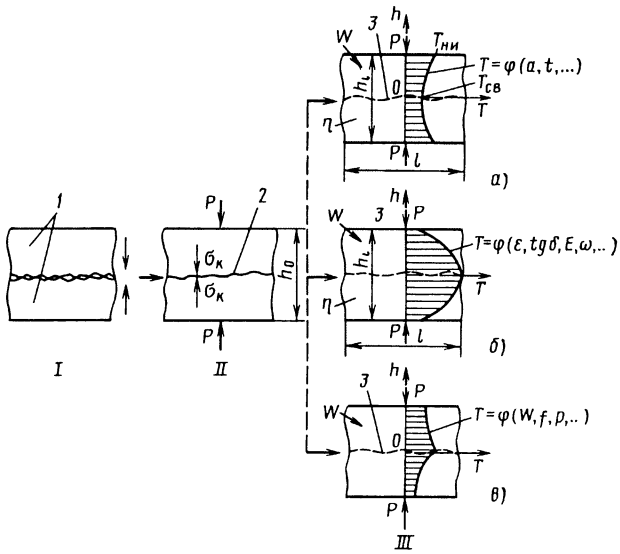


Рис. 2.3.1. Физические модели сварки в расплаве по схеме "давление *p* – температура *T*":
а – сварка при подводе теплоты извне от нагретого инструмента, *б* – сварка при генерировании теплоты в свариваемом материале (ВЧ-полем); *в* – сварка при генерировании теплоты на соединяемых поверхностях (ультразвуком); *1* – соединяемые материалы; *2* – граница раздела, *3* – сварной шов; $\sigma_к$ – контактное напряжение; $\sigma_{вэ}$ – предел вынужденной эластичности ПМ; $\sigma_т$ – предел текучести, h_0 – начальная толщина свариваемых деталей: h_t – толщина сварного шва; W – подводимая тепловая, электрическая или механическая энергия; η – вязкость расплава; l – длина шва; ε – диэлектрическая проницаемость; tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь, E – напряженность электрического поля, ω – частота; f – коэффициент трения на свариваемых поверхностях; $T_{ни}$ – температура нагревательного инструмента, $T_{св}$ – температура на свариваемых поверхностях; a – теплопроводность Текущее время, t_i: I – 0, II – t_0, III – $t_0 + t_н + t_{св}$, $t_н$ – продолжительность нагрева до $T_{св}$, $t_{св}$ – продолжительность выдержки при $T_{св}$

свариваемых поверхностей служит деформация сжатия-растяжения слоев сдавливаемого расплава. К этой же схеме может быть отнесена сварка растворителем, находящимся при нормальной температуре в твердом состоянии (рис. 2.3.2).

При сварке по второй схеме (рис. 2.3.3) после соприкосновения нагретых или активированных жидким растворителем поверхностей идет сглаживание полимерного материала в местах выступов, сопровождающееся разобщением и сфероидизацией воздушных включений между выступами. Чтобы удалить пузырьки воздуха, находящиеся в расплаве в условиях гидростатического сжатия, получить таким образом монолитный (бездефектный) шов и, как при сварке по первой схеме, создать условия для дальнейшего взаимодействия соединяемых материалов, необходимо обеспечить течение расплава вдоль соединяемых поверхностей, приводящее к утонению зоны вязкотекучего материала с h_0 до

$$h = \left[\frac{3}{2}\frac{\eta l^2}{p_c(1-e)^{\alpha t_c}}\right]^{1/2}.$$

Сварка в расплаве может считаться завершенной, как только по всей поверхности соединения будет достигнут молекулярный контакт. Для получения высокопрочного соединения достаточно диффузии макромолекул в зоне контакта поверхностей на глубину 1... 3 мкм. На длительный процесс диффузии приходится рассчитывать, если сварка термопласта протекает при температуре ниже температуры текучести $T_т$.

Повышению качества соединений, изготовляемых сваркой в расплаве, способствуют: создание условий, локализующих нагрев в зоне соединяемых поверхностей; термообра-

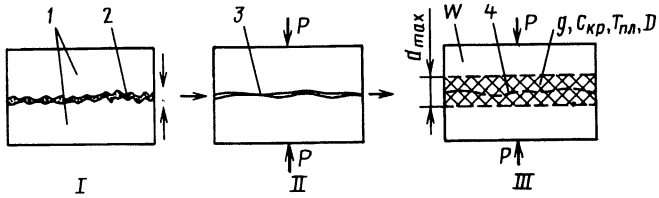


Рис. 2.3.2. Физическая модель сварки растворителем, у которого температура плавления $T_{пл} > 20°$ С:
1 – соединяемые детали, *2* – растворитель; *3* – граница контакта; *4* – шов; *g* – расход растворителя, $C_{кр}$ – критическая концентрация растворителя, соответствующая переходу смесей полимер + растворитель из расплавленного в твердое состояние, *D* – коэффициент диффузии растворителя в полимер; d_{max} – максимальная толщина размягченного слоя, $d_{max} = \beta g/C_{кр}$; t_i, $t_{св}$, *W*, I, II – см. подпись к рис. 2.3.1; III – $t_i = t_0 + t_{св}$; $t_{св} = g^2/\alpha C_{кр}^2 D$; α, β – постоянные

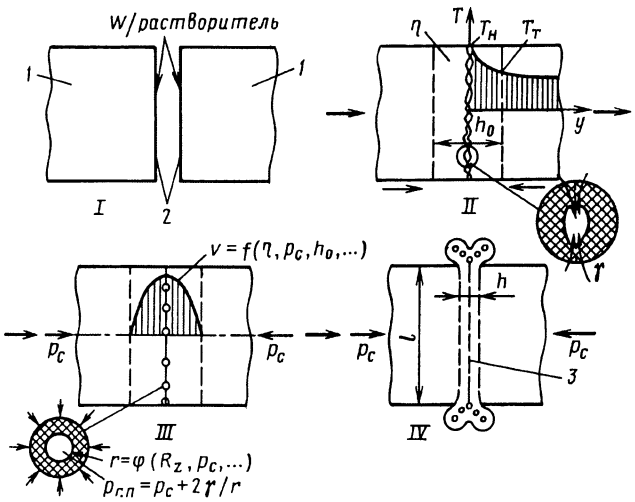


Рис. 2.3.3. Физическая модель сварки по схеме "температура–давление":
1 – соединяемые детали, *2* – свариваемые поверхности; *3* – сварной шов; t_i, $t_н$, *W* – см. подпись к рис. 2.3.1; p_c – давление во время фазы образования соединения; $p_{гп}$ – давление газового пузырька; γ – поверхностное натяжение расплава, $t_п$ – продолжительность паузы между фазами нагрева и формирования соединения, продолжительность последней – t_c; $T_н$ – температура на свариваемых поверхностях в конце фазы нагрева; v – скорость течения расплава, R_z – параметр шероховатости свариваемых поверхностей; I – $t_i = 0$; II – $t_i = t_н$; III – $t_i = t_н + t_п$; IV – $t_i = t_н + t_п + t_c$

ботка сварного шва при температуре, близкой к температуре стеклования, или отжиг; введение в зону шва усиливающих наполнителей и другие известные в полимерном материаловедении способы модифицирования полимеров. Для удаления влаги, поглощенной ПМ, детали перед сваркой подвергают сушке, например, детали из поликарбоната (ПК) при температуре 120 °С в течение 0,5; 4 и 14 ч при толщине стенки соответственно 0,8; 2,4 и 4,7 мм.

Сварка без особых затруднений возможна лишь по отношению немногих пар разнородных полимеров. Так, с помощью ультразвука сваривают полистирол (ПС) с сополимером стирола, сополимеры стирола с поливинилхлоридом (ПВХ) и полиметилметакрилатом (ПММА), ПВХ с полибутилентерефталатом (ПБТФ) и ПММА, полиамид (ПА) 6 с ПА 66. Многие из этих пар могут быть сварены трением. О способности разнородных пластмасс свариваться в расплаве наиболее точно можно судить по параметрам δ растворимости полимеров. Качественные соединения при сварке разнородных пластмасс получаются в

том случае, если указанные параметры близки друг к другу. Близкими значениями δ обладают ПВХ и ПММА, ПС и сополимеры стирола, полиэтилен (ПЭ) и полиизобутилен (ПИБ), полиизопрен и натуральный каучук, поливинилацетат (ПВА) и нитроцеллюлоза, полихлоропрен и полибутилметакрилат (ПБМА) и др. Для оценки свариваемости можно использовать и другие показатели их свойств. Так, прочность сварных соединений разнородных полимеров хорошо коррелирует с отношением α_1/α_2 их температурных коэффициентов линейного расширения и полярных составляющих γ_1^p/γ_2^p поверхностного натяжения. Прочность при растяжении стыкового соединения, выполненного нагретым инструментом прямым нагревом, выше 50 % прочности наиболее слабого из соединяемых ПМ можно получить, если $\alpha_1/\alpha_2 < 1{,}2$ и $\gamma_1^p/\gamma_2^p < 2{,}0$ (табл. 2.3.1).

Разнородные полимеры сваривают в расплаве, нагревая их до одинаковой вязкости, используя в зоне контакта поверхностей общий растворитель, укладывая между соединяемыми поверхностями промежуточные слои из смеси соединяемых полимеров или из сополимеров, содержащих в макромолекуле звенья, которые входят в состав макромолекул обоих соединяемых полимеров, или вводя прослойку из чужеродного полимера, совместимого с соединяемыми полимерами.

Сварка неплавких полимерных материалов на основе отвержденных реактопластов, вулканизатов, сшитых термопластов, полициклических полимеров осуществляется в условиях вынужденной пластичности в результате прохождения химических реакций по месту реакционноспособных групп полимера иногда с участием присадочного реагента в зоне контакта поверхностей, ведущих к возникновению химических связей (химическая сварка). Химической сварке нет альтернативы при выполнении соединения полимеров с пространственной структурой макромолекул, поскольку только в этом случае прочность связи на границе соединяемых поверхностей может быть не слабее прочности связи в объеме соединяемого ПМ. Принцип химической сварки с целью более полной реализуемости свойств ПМ в сварном соединении целесообразно применить для соединения некоторых ориентированных и/или кристаллизующихся термопластов в условиях ограниченной по объему шва

2.3.1. Влияние свойств разнородных полимеров на относительную прочность ν их сварных соединений

Соединяемые термопласты	α_1/α_2	γ_1^p/γ_2^p	ν, %	Соединяемые термопласты	α_1/α_2	γ_1^p/γ_2^p	ν, %
ПММА+ ПВХ	1,04	1,07	99	АБС+ ПП	1,59	2,03	0
ПВХ + АБС[1]	1,08	1,57	57	АБС+ ПС	1,30	1,12	63
ПММА+ АБС	1,13	1,67	85	ПВХ+ ПП	1,72	3,18	0
ПММА+ ПС	1,15	1,48	87	АБС+ ПЭВП	1,88	1,12	0
ПЭВП[2] + ПП[3]	1,18	2,29	59	ПП+ПС	2,07	2,29	0
ПВХ+ ПС	1,20	1,39	0	ПС+ ПЭВП	2,44	1,00	4

[1] Сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола
[2] Полиэтилен высокой плотности.
[3] Полипропилен

пластичности и в присутствии присадочных реагентов полифункциональной природы или типа инициаторов.

На свариваемости наполненных ПМ отражается изменение в первую очередь теплофизических свойств и вязкости материала при температуре сварки после введения в полимер наполнителей (см. гл. 1.11).

Для выполнения сварных соединений деталей из ПМ разработано большое число разновидностей сварки. По признаку "способ перевода термопласта в вязкотекучее состояние" различают сварку растворителем и сварку с помощью тепловой энергии. В зависимости от вида используемой при сварке энергии и способа ее передачи к соединяемым поверхностям методы сварки разделяют на классы, а в зависимости от вида источника энергии, непосредственно используемого для образования сварного соединения, на виды:

Класс сварки	Вид сварки
Термический	Сварка пламенем
	Сварка излучением
	Сварка плазмой
Термомеханический	Сварка нагретым газом
	Сварка нагретым инструментом
	Сварка закладным нагревательным элементом
	Сварка расплавом
	Лучевая прессовая сварка
Механический	Ультразвуковая сварка
	Сварка трением
Электромеханический	Высокочастотная сварка
	Сверхвысокочастотная сварка
	Электроконтактная сварка

Каждый вид сварки включает в себя несколько групп и/или методов сварки, отличающихся техническими или технологическими признаками.

Способ активирования свариваемых поверхностей отражается не только в названии вида сварки, но и определяет построение технологического процесса. Первой его операцией независимо от вида сварки может быть очистка свариваемых поверхностей (в случае их загрязнения) и/или механическая обработка с целью удаления состарившихся или дефектных слоев ПМ или придания оптимальной формы свариваемым кромкам.

Хотя не все виды сварки имеют одинаковое распространение, нельзя сказать, что какие-то из них не важны.

2.3.2. СВАРКА НАГРЕТЫМ ГАЗОМ

При такой сварке соединяемые поверхности сначала нагревают струей разогретого газа (обычно – воздуха), а затем приводят в контакт с нагретым той же струей присадочным материалом или друг с другом. Различают сварку нагретым газом с присадочным материалом и без него. Специфика вида заключается в подводе теплоты непосредственно к соединяемым поверхностям практически любой формы и преимущественно последовательно от одного участка шва к другому. Такой сваркой можно соединять детали практически любых размеров и конфигураций.

Сварка с присадочным материалом (рис. 2.3.4) используется для соединения деталей главным образом из ПВХ, ПЭ, ПП (табл. 2.3.2).

Качество получаемых соединений зависит от свойств основного и присадочного материалов, формы сварного шва, подготовки соединяемых кромок деталей и точного соблюдения технологических приемов и параметров режима сварки. Присадочный материал аналогичен ПМ деталям и имеет форму прутка круглого (диаметром 2...6 мм, для толстостенных деталей – 10...20 мм), прямоугольного или треугольного сечений. Метод пригоден для выполнения стыковых (всех видов), угловых, тавровых, торцевых и нахлесточных соединений. Сущность сварки заключается в

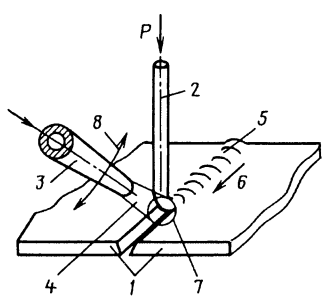


Рис. 2.3.4. Схема сварки нагретым газом с присадочным материалом:
1 – свариваемые детали, *2* – присадочный пруток, *3* – наконечник сварочного аппарата; *4* – струя нагретого газа; *5* – сварной шов; *6* – направление сварки; *7* – зона нагрева, *8* – направление колебания сварочного аппарата

2.3.2. Свариваемость некоторых термопластов различными методами

Метод сварки	ПЭ	ПП	ПВХ	ПС	АБС	ПА	ПК
Нагретым газом	У*	Х*	Ох*	У	Х	Х	Х
Нагретым инструментом	Х	Х	Х	Х	Х	П*	Х
Ультразвуком	П	У	Х	Ох	Ох	П	Ох
Трением	У	У	Х	Х	Х	Х	Х
Закладным нагревательным элементом	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х

* Условные обозначения: У – удовлетворительная, Х – хорошая; Ох – очень хорошая; П – плохая.

заполнении полости между кромками (участками) деталей размягченным присадочным материалом в последовательности, обеспечивающей равномерность нагрева материала в зоне шва. Основными параметрами технологического процесса являются: температура $T_{нг}$ нагретого газа, расход газа, скорость сварки $v_{св}$ и давление p на присадочный материал. Для компенсации потерь теплоты газовой струей $T_{нг}$ на выходе из сопла сварочного устройства должна быть на 50... 100 °С выше температуры $T_т$ текучести термопласта (табл. 2.3.3). Давление газовой струи изменятся в пределах 0,035...0,1 МПа, а расход нагретого газа составляет 40...100 л/мин. С увеличением диаметра прутка от 2 до 6 мм усилие на него повышают от 5 до 20 Н при сварке ПЭ, ПП и ПА и от 15 до 40 Н при сварке жесткого ПВХ. При использовании ленточной накладки на стыкуемые кромки или мягких прутков усилие прижима прикаточного ролика составляет 10...30 Н. Скорость укладки прутка $v_{св}$ (обычно 0,1...0,2 м/мин), зависящая от $T_{нг}$, с увеличением диаметра прутка уменьшается. Скорость $v_{св}$ повышается в 3...5 раз при использовании подогрева (с помощью специальных наконечников в составе сварочного аппарата) основного и присадочного материалов. Пруток, приваренный к деталям, втягивается в канал насадки. Тем самым обеспечивается стабильный прижим прутка к кромкам деталей.

2.3.3. Рекомендуемая температура на свариваемых поверхностях $T_{св}$ и $T_{нг}$ при сварке нагретым газом с присадочным материалом различных термопластов

Температура, °С	ПВХ жесткий	ПВХ пластифицированный	ПЭНП	ПЭВП	ПП	ПА	ПММА	ПИБ	Поливинилиденхлорид ПВДХ
$T_{св}$*	160	150	120	150	175	210	180	150	185
$T_{нг}$	300... 350	250... 300	200... 250	240... 280	240... 280	300	250... 300	250... 300	280... 315

* Минимальная температура

Зачистка валика шва, выступающего над поверхностью изделия, не требуется.

Бесприсадочная сварка нагретым газом, при которой теплота подводится непосредственно к соединяемым поверхностям, применяется для изготовления крупногабаритных полотнищ из листовых термопластов.

2.3.3. СВАРКА НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Сварка нагретым инструментом – вид сварки термомеханического класса, объединяющий способы, при которых для нагрева соединяемых поверхностей деталей используют нагревательный инструмент. Благодаря доступности и низкой стоимости инструментов и приспособлений, универсальности по отношению к различным пластмассам (табл. 2.3.2), легкости контроля параметров режима этот вид сварки наиболее широко распространен в промышленности. Сварку нагретым инструментом косвенным нагревом, при котором теплота к свариваемым поверхностям передается от внешней стороны деталей (см. рис. 2.3.1, *а*), применяют преимущественно для соединения пленочных термопластов, а ту же сварку прямым нагревом, при котором теплота передается непосредственно свариваемым поверхностям (см. рис. 2.3.3), – для соединения как пленок, так и труб, профилей, листов, плит, фасонных деталей.

Основными параметрами режима сварки нагретым инструментом косвенным нагревом служат температура $T_{ни}$ инструмента, давление p и продолжительность t выдержки при $T_{ни}$. Односторонним нагревом соединяют пленки толщиной до 150 мкм, более толстые пленки рекомендуют соединять при двухстороннем нагреве. При экспериментальных и ремонтных работах этот способ можно использовать для соединения и листовых материалов (табл. 2.3.4). Технологический процесс, обеспечивающий высокое качество соединения, включает следующие этапы: нагрев до заданной температуры, приложение давления, выдержку, охлаждение, снятие давления (распрессовку). Охлаждение под давлением позволяет избежать коробления материала шва. Снижает температуру сварки и, таким образом, расширяет диапазон толщины свариваемых деталей применение более легкоплавкого, чем основной, присадочного материала. Таким же образом решается проблема сварки по большим поверхностям.

2.3.4. Режимы сварки нагретым инструментом прессованием листовых термопластов

Вид соединения	Материал	$T_{ни}$, °С	p, МПа	t, мин
На ус	ПММА пластифицированный	140...160	0,5...1,0	15
	ПММА	160...180	0,5...1,0	15
	ПВХ	180...190	0,3...0,8	10...15
Внахлестку	ПММА пластифицированный	140...160	0,5...1,0	15
	ПММА	160...180	0,5...1,0	15
	ПВХ	180...200	0,3...0,6	15
	ПС	120...130	0,3...0,6	15
Встык	ПММА пластифицированный	180...190	24	10...15
	ПММА	200...210	24	10...15
	ПВХ	180...200	24	15
	ПС	120	1...2	15
	ПЭ	120...140	1...2	5...10

Протяженные швы у пленочных изделий удобно изготовлять с помощью ленточных устройств, которые перемещают свариваемые детали мимо узлов установки, осуществляющих последовательно нагрев, сдавливание и охлаждение. При разновидности сварки нагретым инструментом косвенным нагревом – термоимпульсной сварке – осуществляют импульсную подачу теплоты от малоинерционного резистивного нагревательного инструмента, по которому пропускают электрический ток. После отключения электроэнергии сварной шов быстро охлаждается. Проплавляя пленочный пакет по всей толщине нагревателем в виде проволоки, можно одновременно получать два шва, разделяя сваренные изделия, или отделять от изделия припуск материала.

Оптимальную температуру термоимпульсной сварки устанавливают эмпирически путем изменения величины и продолжительности электрического тока, пропускаемого по нагревателю. В зависимости от типа материала и его толщины продолжительность нагрева составляет от десятых долей секунды до нескольких секунд, давление – от 0,01 до 0,3 МПа.

Основным недостатком сварки косвенным нагревом является перегрев внешних, контактирующих с инструментом поверхностей свариваемых деталей.

Сварка нагретым инструментом прямым нагревом выполняется путем одновременного или последовательного нагрева материала в зоне шва. Сварка при одновременном нагреве всей поверхности шва широко применяется при стыковке труб, профилей, плит и фасонных деталей из термопластов, а поэтому часто встречается под названием сварка нагретым инструментом встык. Она относится к наиболее важным способам тепловой сварки пластмасс и включает в себя следующие основные стадии: оплавление и нагрев соединяемых поверхностей в результате их контакта с нагретым инструментом и образование соединения, которые во времени разделены (технологической) паузой (рис. 2.3.5). Стадия образования соединения включает в свою очередь три последовательных процесса: течение расплава, во время которого происходит наибольшее изменение длины детали и формирование сварочного наплыва; собственно процесс сварки, при котором детали благодаря деформации и релаксации так плотно подгоняются друг к другу, что в результате действия сил притяжения сохраняется прочное соединение; процесс охлаждения, сопровождаемый усадкой материала.

Основные параметры стадий технологического процесса:

оплавление и нагрев: $T_{ни}$, продолжительность $t_{опл}$ оплавления и нагрева (без давления) $t_н$, давление $p_{опл}$ при оплавлении и $p_н$ при нагреве;

пауза $t_п$;

образование соединения: $p_с$, $t_с$.

На выбор $T_{ни}$ влияют не только тип материала и другие параметры процесса, но и геометрические параметры деталей.

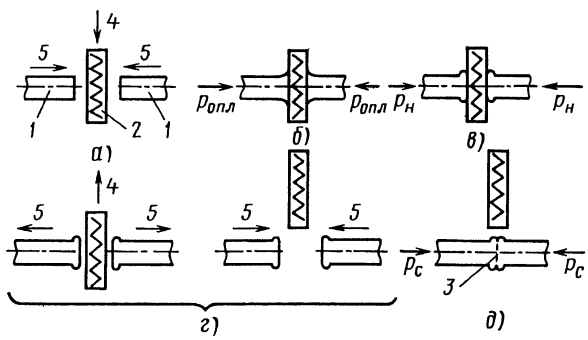


Рис. 2.3.5. Основные стадии сварки нагретым инструментом встык:
а – исходное состояние; *б* – оплавление; *в* – нагрев; *г* – пауза; *д* – образование соединения;
1 – соединяемые детали; *2* – нагретый инструмент, *3* – сварной шов, *4* – перемещение нагретого инструмента, *5* – перемещение деталей

Для кристаллизующихся термопластов [полиоксиметилен (ПОМ), ПП, ПА] $T_{ни} - T_{пл} = 70...80$ °С. Для аморфных термопластов: $T_{ни} - T_т = 135...155$ °С. Рекомендуется выбирать следующее отношение глубины расплавленной зоны L_0 к толщине d детали:

Термопласт	ПОМ	ПА	ПП	Полифениленоксид (ПФО)	АБС
L_0/d	0,4	0,2	0,3	1,0	1,2

Понижение $T_{ни}$ может привести к уменьшению прочности соединения, которая в свою очередь не снижается при превышении $T_{ни}$ Более низкие значения $T_{ни}$ могут быть компенсированы более длительным нагревом.

Параметры стадии оплавления и нагрева для крупнотоннажных термопластов приведены в табл. 2.3.5. Давление прижима деталей к инструменту в начале нагрева (при оплавлении) составляет 0,1...0,15 МПа, а затем снижается до уровня около 0,01 МПа, достаточного для сохранения контакта.

Одним из способов обеспечения требуемого качества соединения при сварке в зимних условиях является увеличение интенсивности нагрева. Параметры процесса меняются также в зависимости от требований к готовому изделию. Если главное требование к шву – герметичность, а высокой прочности не требуется, то продолжительность сварочного цикла может быть сокращена.

Стадия образования соединения регламентируется единственным параметром – p_c, которое для полиолефинов составляет 0,15...0,20 МПа, а при сварке ПВХ – 0,4 МПа. Величина p_c после соприкосновения соединяемых поверхностей должна быстро достичь своего максимального значения. Время охлаждения при сварке труб составляет наибольшую часть продолжительности технологического цикла. Для определения t_c существует эмпирическая зависимость: $t_c = t_н d$, здесь d – толщина трубы, мм. При сварке труб из ПЭВП p_c поддерживается в течение времени, достаточного для охлаждения материала шва до 60 °С.

Если при сварке встык труб и профилей используется преимущественно инструмент с плоской рабочей поверхностью, то при сварке фасонных деталей необходимо обеспечить подгонку нагревательного инструмента к контуру шва.

Применительно к фасонным деталям длительность процесса рассчитывают с учетом того, что время нагрева составляет обычно 10 с/мм толщины стенки детали, а время охлаждения равно около 5 с/мм той же толщины. Давление выше определенного предела мало влияет на образование соединения.

К недостаткам сварки встык нагретым инструментом по сравнению с другими видами и способами сварки в серийном производстве изделий из термопластов, кроме большой продолжительности цикла, относят прилипание расплавов к поверхности инструментов и образование значительных по размеру сварочных наплывов. Прилипание предотвращают, нанося фторопластовое покрытие на рабочую поверхность инструмента. От покрытия можно

2.3.5. Технологические параметры при сварке нагретым инструментом встык некоторых термопластов

Термопласт	$T_{ни}$*, °С	$t_н$*, с
ПЭВП	190...220	30...80
ПП	190...240	30...120
ПВХ**	210...235	20...70
ПВХ жесткий	230...250	40...60
ПВХ пластифицированный***	180...200	20...60
ПОМ	210...230	10...40

* Зависят от толщины деталей

** Модифицирован хлорированным ПЭ.

*** Преимущественно наполненный.

отказаться, применив принцип "высокотемпературной сварки", при которой за счет высокой $T_{ни}$ (для ПП 350 °С, для ПЭ 420 °С, для ПММА 410 °С) прилипший к инструменту расплав деструктирует за короткое время (менее 12 с), превращаясь в газообразные продукты, и таким образом происходит самоочищение. Когда к внешнему виду фасонных изделий предъявляются повышенные требования, то в зоне расположения шва предусматривают элементы, маскирующие сварочные наплывы (рис. 2.3.6, *а*), или оформляют полости в торцовой части детали, в которые затекают наплывы (рис. 2.3.6, *б – г*).

Продвижению сварки нагретым инструментом в серийное производство фасонных изделий из термопластов способствует разработка технологии, при которой обеспечивается точное регулирование давления, благодаря чему управляют вытеканием расплава и образованием сварочного наплыва. При сварке ПП можно исключить прилипание расплава к нагретому инструменту, если детали после нагрева очень быстро (резко) (с ускорением не менее 10 м/с^2) отводить от его поверхности. В этом случае силы когезии расплава значительно превышают силы адгезии его к инструменту.

Расширению возможностей метода благоприятствует создание материаловедами термопластов, которые во время литья под давлением, характеризующегося высокими скоростями $v_{сдв}$ сдвига, показывают низкую вязкость и позволяют таким образом формовать тонкостенные детали сложной формы, а во время сварки, характеризующейся низкими скоростями $v_{сдв}$, демонстрируют высокую вязкость, что дает возможность уменьшить размеры сварочного наплыва.

Сваркой нагретым инструментом при последовательном нагреве материала в зоне шва соединяют мягкие материалы типа поролона или пленки соответственно встык или внахлестку. Поскольку рабочая часть нагревательного инструмента имеет форму клина, способ известен как сварка нагретым клином.

Инструмент, контактирующий с соединяемыми поверхностями, может перемещаться вручную вдоль направления прямолинейного шва, а давление создаваться прикаточным роликом, следующим вслед за инструментом. Швы различной конфигурации могут быть сварены при механизированном перемещении пленочных или тонколистовых материалов относительно неподвижного нагретого клина с помощью пары роликов.

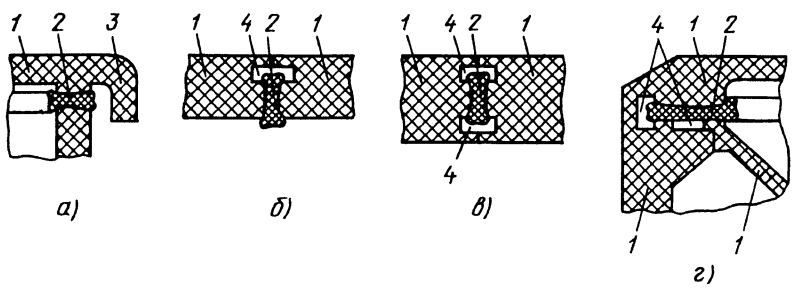


Рис. 2.3.6. Способы маскировки наплывов при сварке встык нагретым инструментом прямым нагревом:

а, г – соединение типа корпус – крышка; *б, в* – соединение листовых деталей; *1* – соединяемые детали, *2* – сварной шов, *3* – маскирующий буртик; *4* – полость для размещения наплыва

2.3.4. СВАРКА ЗАКЛАДНЫМ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Сварка закладным нагревательным элементом – вид сварки термомеханического класса, объединяющий способы сварки, при которых нагрев соединяемых поверхностей осуществляется элементом, помещаемым между свариваемыми поверхностями и остающимся в сварном шве. По способу нагрева ее разделяют на терморезисторную и индукционную (электромагнитную) сварку.

Процесс сварки с закладным нагревательным элементом (ЗНЭ), согласно представлений В.А. Гончаренко и Р.Б. Палыги (МАТИ РГТУ им. К.Э. Циолковского, г. Москва), включает три основных этапа, начиная с момента плавления матрицы:

начальный нестационарный этап проплавления свариваемых поверхностей со скоростью, большей скорости осадки свариваемых деталей;

квазистационарный этап, во время которого толщина y_0 расплавленного слоя постоянна; и, наконец,

нестационарный этап охлаждения.

Математический анализ реологической модели процесса сварки с учетом традиционных допущений позволил В.А. Гончаренко получить в общем виде следующие формулы для первого этапа, описывающие зависимость безразмерной толщины расплавленного слоя и глубины проплавления от безразмерного времени:

$$py_0^2 t/\eta b^2 = \ln\left\{\left[(y/y_0)^2 + y/y_0 + 1\right]/(1-y/y_0)^2\right\} + 1/3^{1/2}\,\mathrm{arctg}\left(1+2y/y_0\right)/3^{1/2} - 0{,}836;$$

$$l/y_0 = py_0^2 t/\eta b^2\,, \qquad (2.3.1)$$

где y – текущая толщина расплава; t – время; p – давление; η – вязкость расплава; b – ширина свариваемого участка, значительно меньше его длины; l – глубина проплавления.

На втором этапе $y/y_0 = 1$ и

$$y_0 = \left(\mathrm{v}_{y_0}\eta b^2/p\right)^{1/3}, \qquad (2.3.2)$$

где v_{y_0} – скорость проплавления, определенная предварительным термометрированием образцов. Безразмерная осадка S на втором этапе рассчитывается по формуле:

$$S/y_0 = py_0^2 t/\eta b^2\,. \qquad (2.3.3)$$

Величину осадки на первом этапе предложено находить графически вычитанием кривой, изображающей зависимость (2.3.1), из кривой, изображающей зависимость (2.3.2). Осадка же на третьем этапе заметно меньше, чем на первом и втором.

Приведенные зависимости дают возможность решать различные технологические задачи, в том числе определять осадку, продолжительность и давление сварки.

При *терморезисторной сварке* деталей из пластмасс между соединяемыми поверхностями помещают резистивный ЗНЭ (преимущественно в виде проволоки, ленты или сетки из коррозионно-стойкой или углеродистой стали или другого металла) и пропускают по нему электрический ток в течение заданного времени, после чего осуществляют охлаждение, не снимая давления прижима соединяемых поверхностей.

Наибольшее распространение, в частности при строительстве полиэтиленовых трубопроводов диаметром до 630 мм, получила разновидность сварки с применением литых соединительных деталей в виде муфт, на внутренней поверхности которых размещен закладной металлический элемент в виде спирали. Подготовка труб и муфты к сварке предусматривает очистку свариваемых поверхностей, а также подгонку наружного диаметра трубы к внутреннему диаметру муфты, что исключает большие зазоры между соединяемыми поверхностями. Основными параметрами режима сварки являются электрическое напряжение U, подаваемое на спираль, и длительность t пропускания тока по спирали при заданном ПМ и известных параметрах ЗНЭ – удельном электрическом сопротивлении ρ проволоки, числе n витков спирали, диаметре D и длине L спирали.

В тепловых расчетах режимов терморезисторной сварки необходимо знать удельный тепловой поток q, создаваемый одной из сторон (внешней или внутренней) спирали и который с некоторым приближением можно вычислить по формуле:

$$q = N/2S = U^2/2RS = 0{,}04U^2d^2/\rho nDL\,, \qquad (2.3.4)$$

где R – электрическое сопротивление ЗНЭ; N – мощность, выделяемая ЗНЭ; S – площадь сварного соединения.

В современных источниках питания типа "Протва" перед началом терморезисторной сварки контролируется фактическое значение R ЗНЭ, которое с минимальным отклонением должно быть равно заданному, после чего устанавливается требуемое напряжение U питания ЗНЭ, равное $U = (NR)^{1/2}$. После включения источника питания дополнительный контроль режима сварки проводится по силе тока I в ЗНЭ, которая должна быть равна $I = (N/R)^{1/2}$.

Как правило, время пропускания тока составляет несколько десятков секунд, а требуе-

мое значение q в зависимости от типа ПМ, толщины стенок трубы и муфты, а также условий теплообмена – 10...30 кВт/м^2. Давление в зоне соединяемых поверхностей обеспечивается за счет термического расширения материала трубы и усадки муфты.

Способ отличается простотой аппаратурного оформления и его освоения персоналом, позволяет поддерживать и воспроизводить условия сварки при переходе от одного стыка трубопровода к другому, обеспечивать повышенный уровень механизации, увеличивать производительность труда, уменьшать расход электроэнергии по сравнению со сваркой встык нагретым инструментом.

При *индукционной сварке* между соединяемыми поверхностями укладывают элемент, нагреваемый в высокочастотном электромагнитном поле индуктора (рис. 2.3.7). Технологический процесс состоит из трех переходов: 1) подготовка свариваемы деталей; 2) укладка ЗНЭ в зону соединения и монтаж деталей в сварочном приспособлении; 3) нагрев места соединения и охлаждение. Соединяемые детали с ЗНЭ помещают в элекромагнитное поле целиком (индукционная сварка одновременным нагревом) или индуктор перемещают относительно закладного элемента (индукционная сварка непрерывно-последовательным нагревом). В качестве ЗНЭ применяют не только металлические (преимущественно стальные) вкладыши в виде спирали, ленты или порошка, но и тонкоизмельченный оксид железа до размера частиц 20 мкм, в том числе в сочетании с ПМ. Частота колебаний электрического поля преимущественно от единиц кГц до единиц МГц. Метод, при котором используются СВЧ-колебания (частота 2,45 ГГц), получил название микроволновая сварка.

Удельный тепловой поток q, создаваемый поверхностью ЗНЭ при индукционной сварке, приближенно определяется по формуле

$$q = (In/L)^2 (\pi \rho \mu_a f)^{1/2},$$

где I и f – сила и линейная частота тока в индукторе; n и L – число витков и длина индуктора; ρ и μ_a – удельное электрическое сопротивление и абсолютная магнитная проницаемость индукционно нагреваемого материала.

Мощность индуктора подбирают так, чтобы материал в зоне шва довести до температуры сварки. Частоту тока в индукторе, необходимую для эффективного нагрева металла, выбирают из соотношения $d/\delta \approx 2$, где d – диаметр (или меньшая сторона поперечного сечения) металлического вкладыша; δ – глубина проникновения тока в металл, равная

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_a f}}.$$

Основным преимуществом индукционной сварки является возможность быстрого соединения деталей в труднодоступных местах; продолжительность нагрева может быть меньше 1 с.

На преимущества метода конструкторы и технологи обращают внимание не только при решении проблем сборки, но и ремонта изделий из ПМ.

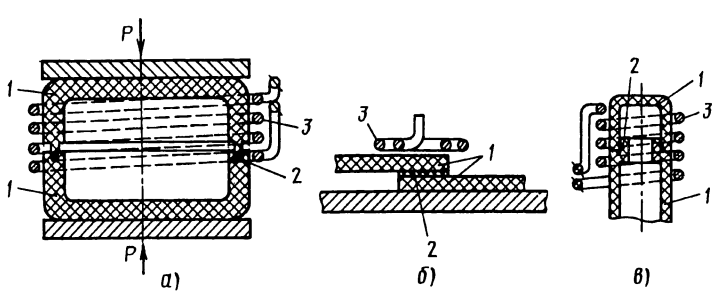


Рис. 2.3.7. Схема индукционной сварки стыкового (*а*), нахлесточного (*б*) и кольцевого шва (*в*):
1 – соединяемые детали; *2* – закладной элемент, *3* – индуктор

2.3.5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвуковая (УЗ) сварка – вид сварки механического класса, объединяющий способы, при которых посредством инструмента к соединяемым поверхностям подводятся механические колебания УЗ-частоты, преобразуемые в свариваемом материале в теплоту.

По скорости соединения, экономичности, чистоте производства, локальности нагрева, качеству соединения с этим видом не может конкурировать никакой другой вид сварки. УЗ-сварка наиболее эффективна в крупносерийном производстве.

Известно большое число разновидностей УЗ-сварки, различающихся схемой подведения механических колебаний (УЗ-сварка с подведением нормальных колебаний, УЗ-сварка с подведением касательных колебаний), схемой передачи механических колебаний (ближняя УЗ-сварка, дальняя УЗ-сварка), способом концентрации энергии (УЗ-сварка инструментом с наконечником-концентратором, УЗ-сварка с концентратором энергии на опоре, УЗ-сварка с концентратором энергии на соединяемой поверхности, УЗ-сварка с введением вставки-концентратора энергии из полимерного материала, УЗ-сварка после набухания в растворителе, УЗ-сварка после подогрева соединяемых участков), по способу дозирования подводимой энергии (УЗ-сварка при ограничении продолжительности воздействия механических колебаний, УЗ-сварка при фиксировании степени размягчения материала шва, УЗ-сварка при ограничении деформации материала шва) и т.д. Многие из них нашли применение в машиностроении. УЗ-сварку выполняют преимущественно с подведением нормальных к соединяемым поверхностям колебаний, с направлением которых совпадает направление приложения давления (рис. 2.3.8).

На свариваемость полимерных материалов УЗ влияют их физические свойства (модуль упругости, плотность, коэффициент трения, теплопроводность, теплоемкость, температура текучести, тангенс угла механических потерь, стойкость к удару), параметры процесса, конструкция соединяемых деталей. Ни при каком другом методе сварки последняя так не влияет на процесс соединения, как при УЗ-сварке. По способности свариваться УЗ-термопласты разделены на три группы:

хорошо сваривающиеся – ПС, ПММА, сополимер АБС, жесткий ПВХ, полисульфон, ПК, ПОМ;

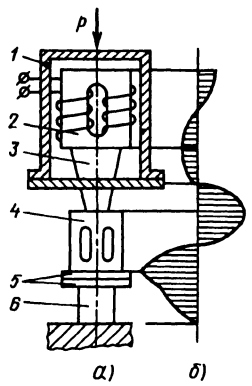


Рис. 2.3.8. Схема ультразвуковой сварки с подведением нормальных механических колебаний (*а*) и эпюра амплитуды колебаний по длине системы "акустическая головка – детали – опора" (*б*):
1 – корпус; *2* – преобразователь; *3* – трансформатор, *4* – волновод (инструмент), *5* – свариваемые детали; *6* – опора, *7* – направление колебаний; *P* – статическое давление

условно сваривающиеся – ПА 11, ПА 12, ПА 66, ацетат целлюлозы, пластифицированный ПВХ;

несваривающиеся – политетрафторэтилен (ПТФЭ), фторсополимеры.

Хотя ПТФЭ не сваривается УЗ ни по одной из схем, тем не менее при его сварке нагретым инструментом при подведении к зоне соединения УЗ-колебаний удается интенсифицировать процесс и сократить время нагрева на 30...40 %. ПЭ и ПП сваривают лишь по схеме ближней (контактной) УЗ-сварки, при которой инструмент находится на незначительном удалении (до 6 мм) от соединяемых поверхностей. Для дальней (передаточной, или дистанционной, или в дальнем поле) УЗ-сварки соединяемые детали из этих термопластов необходимо охладить до стеклообразного состояния.

УЗ сваривают не только однородные, но и разнородные термопласты: ПММА + ударопрочный ПС, ПВХ + ударопрочный ПС, ПБТФ + ПВХ.

В УЗ-сварке выделяют следующие субпроцессы: 1) механическое нагружение и колебание деталей; 2) нагрев ПМ в условиях вязкоупругости; 3) передача теплоты; 4) течение и смачивание; 5) межмолекулярная диффузия. Не исключена возможность механической деструкции полимера, способствующей его течению при более низких, чем $T_т$, темпе-

ратурах и образованию химических связей между появляющимися макрорадикалами.

Теплота при УЗ-сварке выделяется в результате соударения деталей при продольном смещении инструмента, а также в результате трения на границе контакта поверхностей при тангенциальных колебаниях от поперечных волн и внутреннего трения. Основной причиной нагрева является трение между поверхностями. Решающим для механизма теплообразования является величина статического давления. При высоком давлении теплота может выделиться только благодаря внутреннему трению, а при низком давлении – благодаря внутреннему трению и трению на границе контакта. Чтобы не препятствовать перемещению соединяемых участков деталей, необходимо обеспечить их свободную посадку.

Способность ПМ превращать подводимую к соединяемым поверхностям энергию УЗ-колебаний в теплоту можно оценить с помощью безразмерного параметра Ф, характеризующего энергетический баланс за время до достижения вязкотекучего состояния аморфного термопласта или температуры плавления частично кристаллического термопласта:

$$\Phi = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\rho c}{E'\left\{\delta/2 + (0{,}25/\pi)\left[1-(p/p_k)^{0,7}\right]f\right\}} dt . \qquad (2.3.5)$$

Здесь T_1 – начальная температура ПМ; T_2 – температура текучести или плавления ПМ; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; E' – динамический модуль упругости; δ – фактор механических потерь, $\delta = E''/E'$, E'' – модуль потерь; p – статическое давление; p_k – минимальное давление, при котором не происходит трения на границе контакта (для ПВХ и ПММА p_k равно 6...7, для ПС – 5...6, для ПП – 3, для ПА – 3,5 МПа); f – коэффициент трения; T – температура.

Числитель интеграла (2.3.5) показывает количество теплоты, которое необходимо для нагрева материала на 1 °С, а знаменатель описывает его способность превращать механическую энергию в теплоту. Для случая, когда $(p/p_k) < 1$, превращение энергии происходит в результате внутреннего трения и трения на границе контакта соединяемых поверхностей; для случая $(p/p_k) \geq 1$ – лишь в результате внутреннего трения.

Чтобы оценить, может ли материал свариваться только контактным методом (в ближнем поле) или также дистанционным методом (в дальнем поле), необходимо учесть еще один параметр – логарифмический декремент затухания: $\Lambda = \pi\delta$.

При значениях Ф от низкого до среднего и низких значениях Λ ПМ хорошо свариваются контактным и дистанционным методами. ПМ со средним и высоким значениями Ф и с большой величиной Λ могут свариваться только контактным методом. ПМ с малым значением Ф и средним Λ могут хорошо свариваться дистанционным методом, если на соединяемых поверхностях оформлены концентраторы энергии, по возможности, меньших размеров. Низкое значение Ф означает быстрый нагрев не только соединяемых поверхностей, но и объема верхней детали. Для сварки ПМ с большим Ф и малым Λ требуется больший расход энергии, что указывает на большую длительность процесса сварки. Детали из таких ПМ для дистанционной сварки должны иметь высокую жесткость. Параметры Ф и Λ (рис 2.3.9) позволяют судить исключительно о поведении ПМ. Для оценки же способности деталей свариваться необходимо дополнительно обращать внимание на их геометрические соотношения.

При введении в полимер наполнителей, стабилизаторов, красителей, смазок требуется корректировка параметров сварки и конструкции соединяемой детали.

Если наполнение ведет к повышению модуля упругости ПМ при сохранении способности поверхностного слоя хорошо размягчаться и течь, то свариваемость в результате такого модифицирования улучшается, поскольку жесткие ПМ лучше передают энергию

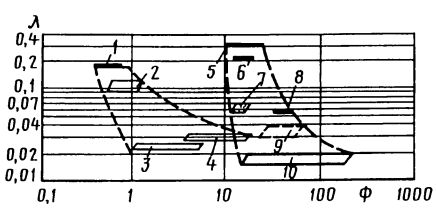


Рис. 2.3.9. Параметры Ф и Λ для ПВХ(1), ПММА(2), ПС(3), ПК(4), ПЭНП(5), ПП(6), ПЭВП(7), ПОМ(8), ПА(9) и ПЭТ(10)

механических колебаний к месту соединения. При большом содержании наполнителя требуется изменение и усложнение конструкции УЗ-головки в связи с интенсивным износом инструмента в процессе сварки. На качество сварки могут оказывать влияние коробление деталей, недопустимые отклонения размеров, наличие неоднородностей, дефекты и загрязнения поверхности, наличие большого количества вторичных ПМ, повышенное содержание влаги, неправильное хранение деталей перед сваркой.

Технологический процесс УЗ-сварки может протекать с получением воспроизводимых свойств соединения только при правильной конструкции соединяемых участков, которая зависит от типа ПМ, формы и размеров деталей, требований к свойствам и внешнему виду изделий и др.

Если сварку выполнять по плоским гладким поверхностям, то процесс соединения начинается с размягчения микроскопически малых неровностей во многих местах соединяемых поверхностей. Такой процесс соединения характеризуется большой продолжительностью, не воспроизводим во времени, так как у любой пары деталей нет одинаковых вариантов поверхностей.

При сварке деталей из аморфных термопластов на соединяемых поверхностях оформляют выступы треугольного сечения – концентраторы энергии (рис. 2.3.10) с углом при вершине 60...90° и высотой 0,15...0,6 мм. Процесс сварки при использовании концентраторов энергии состоит из четырех фаз (рис. 2.3.11). Механическое моделирование и расчеты с привлечением метода конечных элементов показали, что плавление, в отличие от ожидаемого, в первую очередь захватывает область концентратора энергии на расстоянии 1/4 от его вершины.

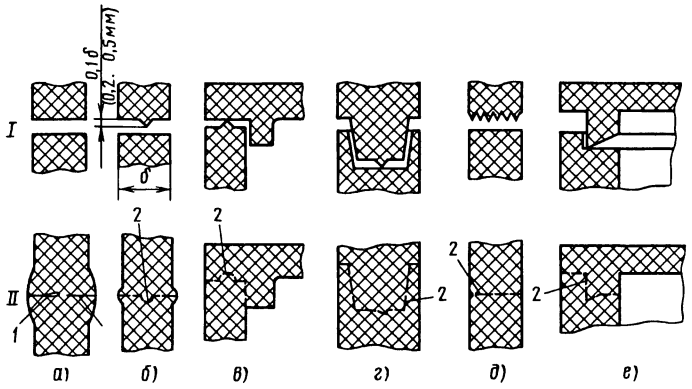


Рис. 2.3.10. Варианты подготовки стыкуемых кромок при УЗ-сварке:
а – плоские поверхности; *б, в, г* – оформление V-образного прямолинейного или криволинейного концентраторов энергии; *д* – кромка верхней детали с коническими выступами; *е* – асимметричный выступ; *I* – перед сваркой; *II* – после сварки; *1* – дефект; *2* – сварной шов

При изготовлении прессово-сварного соединения (сваркой с запрессовкой с подведением касательных колебаний) деталей типа корпус-крышка из кристаллизующихся термопластов процесс также протекает более стабильно и воспроизводимо после оформления концентраторов энергии (рис. 2.3.12).

При УЗ-сварке инструментом с наконечником-концентратором последний проходит сквозь верхнюю листовую деталь и на 1/2 толщины входит в нижнюю, а размягченный материал перетекает в радиальном направлении в зазор между поверхностями.

На стадии подготовки к УЗ-сварке приходится решать и проблему выбора способа фиксирования положения деталей относительно инструмента. При соединении фасонных деталей возможны различные варианты центрирования деталей (рис. 2.3.13). В случае использования фиксирующих приспособлений следят за тем, чтобы поверхность опоры и рабочая поверхность инструмента были параллельны.

УЗ-сварку можно вести одновременно по всему контуру шва (контурная сварка), а также при шаговом или непрерывном перемещении

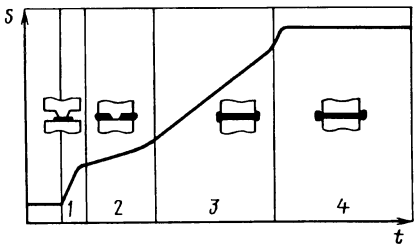


Рис. 2.3.11. Изменение осадки *S* деталей в процессе УЗ-сварки с использованием концентраторов энергии. Фазы:
1 – начало размягчения, *2* – заполнение зазора между верхней и нижней деталями, *3* – стационарное течение, *4* – выдержка для охлаждения и восстановления межмолекулярного взаимодействия

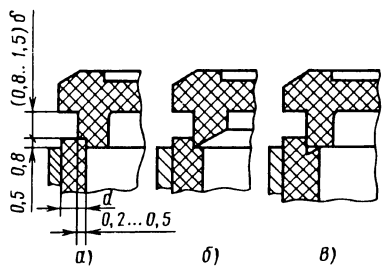


Рис. 2.3.12. Схема сварки с запрессовкой:
без оформления концентратора энергии (*а*) и с оформлением концентраторов энергии на верхней (*б*) и нижней (*в*) деталях

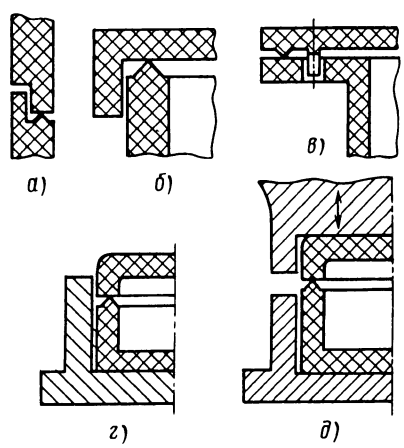


Рис. 2.3.13. Возможные методы центрирования деталей, подлежащих УЗ-сварке, с помощью:
элементов конструкции деталей (*а*, *б*), штифтов и отверстий деталей (*в*); фиксирующей опоры (*г*), инструмента и фиксирующей опоры (*д*)

материала или инструмента. При контурной сварке одним инструментом можно изготовить шов по форме прямоугольника в плане с периметром 200...240 мм или кольцевой шов с диаметром окружности до 120 мм. При толщине детали более 2 мм, габаритные размеры которой превышают 12×12×12 см, для контурной сварки применяют несколько инструментов или процесс выполняют шаговым методом. Причем можно сваривать одновременно, например кольцевым швом, три и более деталей.

Контурную сварку УЗ касательными колебаниями можно выполнять методом, при котором пакет из листовых заготовок укладывается на плоскую прямоугольную пластину, являющуюся наконечником УЗ-волновода и совершающую колебания в своей плоскости, и прижимаются штампом к пластине. Конфигурация сварного шва определяется формой рабочей поверхности штампа. Поскольку максимальная акустическая нагрузка пропорциональна произведению скорости вибрации (колебаний) и статического давления, распределение максимальной нагрузки можно сделать равномерным, настраивая давление обратно пропорционально распределению скорости колебаний в плоскости наконечника. Давление можно регулировать, изменяя площадь контакта поверхности штампа. Если для работы инструмента одного преобразователя недостаточно, то можно присоединить дополнительные преобразователи.

Непрерывную сварку преимущественно пленок неподвижным продольно колеблющимся инструментом осуществляют на опоре – вращающемся ролике. Для такой же сварки можно использовать волновод в виде вращающегося колеса с радиальным вибратором или тороидальный вибратор.

При непрерывной сварке скользящим инструментом тонких (2...5 мкм) пленок, например из ПЭТ, их помещают между накладками из неразмягчающегося материала, например, бумаги, защищающими свариваемый материал от разрезания.

УЗ-сварка крутильными колебаниями деталей круглого сечения с подведением к месту стыка колебаний от двух продольно колеблющихся инструментов, которые касаются своими профилированными боковыми поверхностями с двух противоположных сторон цилиндрических поверхностей одной из деталей, прижатой осевым усилием к другой детали своей торцевой поверхностью, видимых пре-

имуществ перед сваркой другими методами не имеет, а оборудования требует достаточно сложного.

При сварке, как и при других способах обработки ПМ ультразвуком, наиболее часто используют частоту 20...25 кГц. При переходе на частоту 36...40 кГц полностью исключается звуковое воздействие на ухо человека. При этом для достижения требуемого теплового эффекта можно подавать механические колебания с меньшей амплитудой. Применение в некоторых сварочных установках частоты 10 кГц продиктовано желанием повысить их мощность по сравнению с мощностью оборудования, работающего на частоте 20 кГц, и увеличить размеры рабочей части инструмента.

При сварке на установках, не оснащенных микропроцессорной аппаратурой, оптимальный режим определяют экспериментально, изменяя амплитуду A колебаний рабочего конца инструмента на холостом ходу (инструмент не контактирует с деталями), продолжительность t включения УЗ и давление p прижима инструмента к детали. Комбинация пар параметров во всех случаях влияет на качество соединения в большей мере, чем отдельный параметр. Оптимальная их комбинация обеспечивает передачу от инструмента к соединяемым участкам деталей необходимой для осуществления сварки энергии в течение экономически оправданного времени. Сложность расчетного определения потребной энергии связана с влиянием на ход процесса большого числа факторов: типа ПМ, формы и размера деталей, объема размягчаемого ПМ, указанных параметров режима. Амплитуда является основным параметром, определяющим мощность колебаний. Она должна быть такой, чтобы не соответствовать участку резкого подъема кривой $t = f(A)$ (рис. 2.3.14), так как иначе процесс сварки будет протекать очень медленно. В результате теплоотвода из зоны шва в случае сварки при малых A качественного соединения может вообще не произойти. При высоких же A нужно строго следить за t, так как слишком длительное включение УЗ приводит к разрушению ПМ. УЗ-сварка кристаллизующихся термопластов требует более высоких значений A и t, чем при УЗ-сварке аморфных термопластов (см. рис. 2.3.14). Современной тенденцией особенно в крупносерийном производстве изделий автомобильной, электротехнической и других отраслей машиностроения является

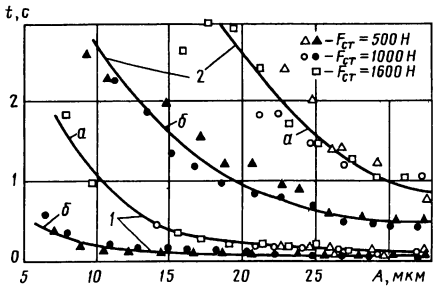


Рис. 2.3.14. Зависимость продолжительности t подачи УЗ до размягчения аморфной фазы (*1*) или до плавления кристаллической фазы (*2*) частично кристаллических термопластов ПА 66 (*а*) и ПП (*б*) от амплитуды A колебаний при различном статическом усилии $F_{ст}$ прижима

использование оборудования с высококачественными и надежными УЗ-генераторами, которые обеспечивают постоянство A независимо от нагрузки на акустическую головку.

Продолжительность сварки не является точной функцией параметров УЗ-установки, а зависит еще от толщины свариваемых деталей. Детали с большим разбросом толщины требуют длительной сварки, чтобы обеспечить течение расплава из зоны более толстого участка к более тонкому.

Чтобы сделать выбор оптимальных параметров, пользуются также так называемыми полями рабочих параметров. Рабочее поле всегда изображается с помощью двух диаграмм, на которых отражены зависимости t и p от A.

Об окончании процесса сварки можно судить по изменению мощности, поглощенной материалом и фиксируемой специальным прибором, которым оснащена сварочная установка. Руководствуясь полученной на образцах кривой "мощность – время", отдельные параметры так корректируют, пока эта кривая для изделий не будет соответствовать ее оптимальному характеру.

Параметры, гарантирующие наивысшие значения прочности соединения цилиндрических деталей из термопласта, сильно зависят от типа последнего (табл. 2.3.6).

УЗ успешно применяется в родственной сварке технологии – технологии резки пленок, синтетических тканей, нетканых материалов и др. Роботизированная технология позволяет добиться точности резания несколько десятых долей мм. УЗ-резка (частота колебаний 20...

2.3.6. Параметры режимов УЗ-сварки* цилиндрических образцов (внутренний диаметр 25 мм, высота 30 мм), обеспечивающие максимальную прочность $F_р$ соединения при растяжении

Термопласт	Схема сварки	A, мкм	t, с	P, Н	$F_р$, Н
ПА 6	В ближнем поле	36	1	1000	3000
ПП ЭПК**		46	0,6	200	1250
ПА 6	В дальнем поле	31	0,2	600	1000

* Соединение по торцам с концентратором энергии на верхнем образце.
**ПП, модифицированный этиленпропиленовым каучуком.

40 кГц) совершенно безопасна для роботов, так как частота собственных колебаний руки робота равна всего несколько Гц.

Возможности УЗ-сварки ПМ ограничивают недостаточная мощность сварочных установок для сборки по большим поверхностям, а также сложность устройства и высокая стоимость сварочных установок с несколькими акустическими узлами, которые позволяют выполнять соединения крупногабаритных деталей.

2.3.6. СВАРКА ТРЕНИЕМ

Сварка трением – вид сварки механического класса, объединяющий способы, при которых преобразование механической энергии в теплоту осуществляется благодаря работе сил трения, возникающих при взаимодействии перемещающихся относительно друг друга и прижатых деталей. Образующийся в зоне контакта расплав термопласта заполняет зазор между поверхностями, а после охлаждения образует соединительный шов.

К преимуществам сварки трением относят: большие скорости образования соединения; простоту конструкции оборудования, воспроизводимость параметров процесса; возможность соединения поверхностей без предварительной их очистки; незначительную чувствительность к условиям окружающей среды (возможность осуществления сварки в жидкой среде); высокое качество швов вследствие локального нагрева, предотвращения оксидирования расплава и исключения перерыва между стадиями нагрева и образования соединения; возможность соединения разнородных полимеров; экономию энергии в условиях крупносерийного производства. Для многих случаев применения требуется лишь незначительная подготовка к сварке.

Разновидности сварки трением различаются характером трения (ротационная сварка трением, сварка вибротрением, сварка вибровращением), методом создания трения (сварка прямым методом, сварка косвенным методом), характером движения (прямолинейная сварка вибротрением, криволинейная сварка вибротрением), типом трущегося элемента при сварке косвенным методом (сварка вращающейся конической втулкой, сварка удаляемым диском, сварка с помощью остающейся полимерной вставки, сварка с помощью полимерной конической вставки) и др.

Ротационная сварка трением – сварка трением, при которой перемещение соединяемых деталей относительно друг друга осуществляется в результате вращения вокруг оси, совпадающей с направлением усилия прижима, одной или обеих соединяемых деталей или промежуточной вставки между ними. Наиболее распространен способ, при котором в контакт приводят соосно закрепленные детали, одна из которых неподвижна, а другая вращается (прямой метод). После достижения необходимой температуры неподвижную деталь освобождают, а шов охлаждают под давлением. Таким образом соединяют трубы, стержни, фасонные детали, имеющие форму тел вращения, небольшие детали круглой формы с крупногабаритными деталями.

Удельный тепловой поток q (кВт/м^2), поступающий в одну из свариваемых деталей, например, трубчатой формы, на начальном этапе ротационной сварки (этап сухого трения), определяется по формуле:

$$q = \pi f p n (R_н + R_в)/2,$$

где f – коэффициент трения; p – давление прижима, Н/м^2; n – частота вращения, 1/с; $R_н$ – наружный радиус трубы, м; $R_в$ – внутренний радиус трубы, м.

Площадь сварного шва увеличивают, придавая стыкуемым поверхностям V-образный профиль (рис. 2.3.15). Для улавливания расплава, выдавленного из зоны шва, предусматривают различной формы полости. Соединения, сваренные по оптимальным режимам (табл. 2.3.7), имеют прочность, близкую к прочности целого ПМ.

Разновидностью ротационной сварки трением является инерционная сварка, при которой кинетическая энергия аккумулируется в ускоренной до соответствующей частоты вращения массе, которую совместно с одной из полимерных деталей составляет удерживающее (приемное) приспособление. Затем раскрученная деталь при высоком давлении приводится в контакт с неподвижной деталью, и кинетическая энергия в результате трения превращается в теплоту. Масса удерживающего приспособления равна 1...2 кг на 1 $см^2$ поверхности шва. Длительность нагрева (торможения) – менее 2 с. Суммарное сокращение размеров (осадка) соединяемых деталей составляет десятые доли миллиметра. Инерционной сваркой изготовляют сферические изделия диаметром до 500 мм из ПОМ и ПА.

Для сварки длинных массивных деталей применяют вращающиеся промежуточные элементы – полимерные (остающиеся в соединении) или металлические (удаляемые после стадии нагрева). Такая сварка получила название "ротационная сварка трением косвенным методом". При ее выполнении частота вращения в 3–4 раза выше, а давление ниже (табл. 2.3.8), чем при сварке прямым методом.

Возможности сварки трением деталей различной формы были значительно расширены с разработкой ее разновидности – сварки вибротрением.

Сварка вибротрением – сварка трением, при которой перемещение соединяемых деталей относительно друг друга осуществляется в результате колебаний в плоскости, перпендикулярной к направлению усилия прижима, одной из них (рис. 2.3.16) или промежуточной вставки между ними. Частота n колебаний составляет обычно 100...250 Гц. Колебания могут

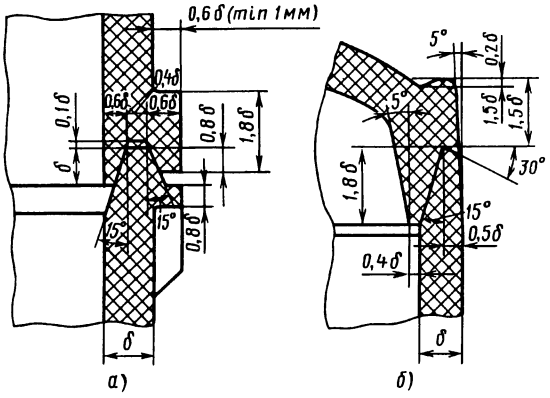


Рис. 2.3.15. Сечение соединяемых кромок при ротационной сварке трением деталей с одинаковым внутренним диаметром (*а*) и деталей типа корпус-крышка (*б*)

2.3.7. Оптимальные режимы ротационной сварки трением прямым методом

Свариваемый термопласт	Скорость вращения, м/мин	Давление прижима, МПа
ПЭНП	90...188	0,2...0,5
ПП	90...180	0,2...0,5
ПВХ	100...150	0,3...0,8
ПОМ	10...25	0,6...1,0
ПФО	30...50	1,0...1,5
ПК	12...15	0,5...0,8

2.3.8. Оптимальные параметры режима ротационной сварки трением косвенным методом с использованием алюминиевого промежуточного элемента

Свариваемый термопласт	Линейная скорость V^*, м/с	Давление, МПа	
		во время прижима инструмента	во время образования соединения
ПВХ	9,67	0,12	0,18
ПЭ	8,67	0,1	0,15
ПП	8,67	0,1	0,12
ПА	9,17	0,08	0,1
АБС-пластик	8,33	0,05	0,08

* Частота вращения рассчитывается как $n = V/\pi(R_н + R_в)$

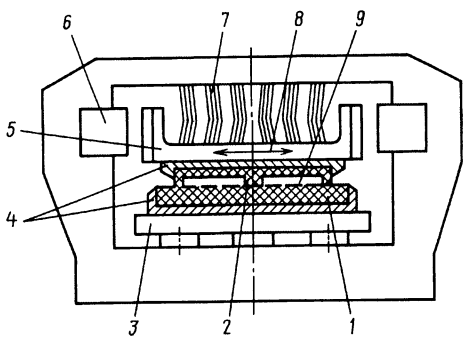


Рис. 2.3.16. Схема сварки вибротрением прямым методом:
1 – неподвижная деталь; *2* – подвижная деталь; *3* – рабочий стол, *4* – зажимное устройство; *5* – колеблющаяся плита, *6* – электромагнит, *7* – пружины узла подвески, *8* – направление колебаний, *9* – сварной шов

быть прямолинейными (прямолинейная сварка вибротрением) с максимальной амплитудой A = 1...4 мм или криволинейными (криволинейная сварка вибротрением) с максимальной амплитудой в несколько градусов. Детали сжимают под давлением 1,25...2,5 МПа. Продолжительность сварки не зависит от толщины соединяемых деталей и составляет несколько секунд.

Удельный тепловой поток q, поступающий при сварке вибротрением в одну из свариваемых деталей на начальном этапе сухого трения, определяют по формуле

$$q = 2fnpA,$$

где f – коэффициент трения.

Чтобы образовывался сварной шов с высокими механическими свойствами, средняя скорость осадки должна быть не выше 5 мм/с. В противном случае в сварном шве возникают структурные неоднородности, и прочность соединения, например ПП, составляет всего 65 % прочности материала. Для улавливания наплывов в зоне стыкуемых кромок оформляют полости подобно тому, как это осуществляют при сварке другими методами. Сваркой вибротрением соединяют детали любой формы, если свариваемые поверхности находятся в одной плоскости. Хорошо соединяются термопласты с содержанием наполнителя до 45 %.

Сварка вибровращением – сварка трением, при которой одна из соединяемых деталей или промежуточная вставка между ними совершает круговое плоскопараллельное движение в плоскости, перпендикулярной к направлению усилия прижима. Она называется также орбитальной сваркой трением. Такое движение создается, например, с помощью трех электромагнитов, расположенных по отношению друг к другу под углом 120°. Вибрационное движение постоянное, и ни в одном из направлений не создаются слишком высокие напряжения сдвига. Машина с шестью катушками, расположенными под углом 60°, позволяет создавать биаксиальные и линейные колебания. На маленьких установках можно сваривать изделия площадью сварного шва до 10 см^2, которые не свариваются ультразвуком.

2.3.7. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА

Высокочастотная (ВЧ) сварка – вид сварки электромеханического класса, которая ос-

нована на диэлектрическом нагреве с использованием электромагнитной энергии ВЧ-диапазона.

Преимущества метода связаны с особенностями диэлектрического нагрева – высокой скоростью, равномерностью, возможностью избирательного подвода теплоты. Сварка осуществляется между металлическими электродами – обкладками конденсатора, включенного в колебательный контур ВЧ-лампового генератора. Электроды не только подводят энергию к зоне шва, но и выполняют функцию элементов, передающих давление на материал и охлаждающих его поверхности. Электродами, повторяющими конфигурацию шва, можно сварить его целиком за одну операцию (так называемый прессовый способ). Последовательным соединением при помощи прямоугольного в плане электрода изготовляют протяженные швы.

ВЧ-сварке подвергают ПМ, коэффициент диэлектрических потерь которых $\varepsilon'' \geq 0{,}01$: ПВХ, ПВДХ, ПА, сополимеры фторолефинов, эфиры целлюлозы, полиакрилаты, полиуретаны, неполностью отвержденные реактопласты, вулканизаты. Применение электродов с подогревом позволяет соединять ВЧ-сваркой ПМ, у которых ε'' при нормальной температуре ниже 0,01.

Выпускаемые промышленностью ВЧ сварочные установки работают на постоянных частотах: 27,12 МГц ± 1 % или 40,68 МГц ± 1 %. Напряженность электрического поля регулируют так, чтобы достичь необходимой степени нагрева по возможности за короткое время. Продолжительность сварки составляет: доли секунды для пленок из ПВХ, несколько секунд для синтетических тканей, пленок из фторсополимеров (Ф-26, Ф-42) и полиамидных пленок (Р-27, АР-27Т), от десятков секунд до нескольких минут для неполностью отвержденных реактопластов и вулканизатов.

Давление сварки рассчитывают по формуле

$$p = \left[\left(h_0/h_t\right)^2 - 1\right]\eta l^2 / t h_0^2,$$

где h_0, h_t – толщина соответственно деталей перед сваркой и шва, м; η – динамическая вязкость ПМ, Па·с; t – продолжительность сварки, с; l – длина электрода, м.

Традиционными областями применения ВЧ-сварки остаются производство изделий полиграфии, канцелярских товаров, упаковки, тентов и укрытий из пленок и армированных тканями ПМ.

2.3.8. СВАРКА РАСПЛАВОМ

Сварка расплавом – вид сварки термомеханического класса, при которой нагрев соединяемых поверхностей деталей осуществляется расплавленным присадочным материалом.

К преимуществам сварки расплавом относят возможность соединения толстостенных деталей, высокую производительность процесса, возможность выполнения соединения в труднодоступных местах и в условиях стройплощадки.

Разновидности сварки расплавом различаются способом получения расплава (экструзионная сварка, сварка литьем под давлением, сварка расплавленным прутком), наличием подогрева свариваемого материала (сварка без подогрева, сварка с предварительным подогревом), способом подогрева (экструзионно-газовая, контактно-экструзионная, экструзионно-световая). Экструзионную сварку и сварку расплавленным прутком относят к непрерывным способам сварки расплавом.

При *экструзионной сварке* расплавленный присадочный материал подается к свариваемым поверхностям от (сварочного) экструдера. Присадочный материал, подаваемый в экструдер, перед плавлением имеет вид гранул или порошка. Этим методом соединяют ПМ, обладающие относительно низкой температурой размягчения и способные выдерживать значительный перегрев без заметной деструкции. Для ускорения процесса и повышения качества соединения сварку проводят преимущественно с предварительным подогревом соединяемого материала. При контактно-экструзионной сварке наконечник экструдера, желательно с рифлениями в направлении шва и подсоединенный непосредственно к мундштуку экструдера, касается кромок соединяемых деталей. Такой подогрев имеет преимущества перед газовым подогревом. Профилированный наконечник формирует волнистую поверхность на свариваемых кромках, что исключает выдавливание присадочного материала на поверхность деталей, способствует увеличению площади контакта нагретого наконечника с соединяемой поверхностью, а следовательно, и количества передаваемой им

теплоты, а также обеспечивает течение низковязкого присадочного материала параллельно направлению сварки.

Качество сварных швов зависит от многих факторов: состава, температуры, скорости подачи и формы присадочного материала, давления, оказываемого на него, а также состава и температуры свариваемого ПМ и способа подготовки его кромок.

Соединения, изготовленные экструзионной сваркой, по прочности превосходят соединения, изготовленные сваркой нагретым газом (табл. 2.3.9).

Экструзионной сваркой заменяют сварку нагретым газом с присадочным материалом, когда необходимо значительно повысить скорость процесса, особенно при сборке толстостенных изделий. Экструзионная сварка наплавкой, при которой расплав присадочного материала подается по кромке детали, уложенной сверху на другую деталь с перекрытием, применяется при сборке крупногабаритных полотнищ из листовых эластичных ПМ типа геомембран.

Для выполнения экструзионной сварки разработаны ручные и стационарные сварочные установки.

При *сварке литьем под давлением* нагретый присадочный материал периодически поступает в зазор между деталями, установленными в форму или зажатыми в приспособлении. Ее применяют для соединения деталей в труднодоступных местах (например, в производстве полых изделий), изоляции концов кабелей, тонкостенных труб враструб.

2.3.9. Влияние способа сварки на относительную прочность ν при растяжении соединений некоторых термопластов

Способ сварки	Термопласт	ν, %			
		При кратковременном нагружении при		При длительном нагружении при	
		20 °С	60 °С	20 °С	60 °С
Сварка нагретым газом с присадочным материалом	ПВХ	60	40	40	–
	ПЭВП	60			40
	ПП	60			40
Сварка нагретым инструментом встык прямым нагревом	ПВХ	80	–	60	–
	ПЭВП	80...100	–	80	80
	ПП	80...100	–	80	80
Экструзионно-газовая сварка	ПВХ	80	–	60	80
	ПЭВП		–		
	ПП		–		

2.3.9. ЛУЧЕВАЯ ПРЕССОВАЯ СВАРКА

Лучевая прессовая сварка — вид сварки термомеханического класса, объединяющий способы сварки, при которых для передачи энергии в форме теплоты к соединяемым поверхностям используют излучение, а образование сварного соединения осуществляют с приложением давления. В литературе этот вид сварки обычно называют сваркой излучением.

Основное преимущество метода – отсутствие контакта с нагревательным элементом.

Разновидности метода различаются видом источника излучения [инфракрасная (прессовая) сварка, световая (прессовая) сварка, лазерная (прессовая) сварка], применением присадочного материала, схемой подведения излучения (сварка прямым нагревом, сварка косвенным нагревом), организацией процесса во времени (непрерывная сварка, прерывистая сварка).

При *инфракрасной сварке* труб и профилей встык не нужно решать проблему прилипания расплава к источнику теплоты, как это имеет место при сварке нагретым инструментом прямым нагревом. При температуре металлического излучателя 500...600 °С соединяемые поверхности во время нагрева находятся на расстоянии около 0,5 мм от излучателя. При увеличении расстояния температуру излучателя необходимо повысить.

При *световой сварке* используется излучение длиной волны 0,2...1,0 мкм, поэтому она принципиально мало чем отличается от инфракрасной сварки. Ее проводят с присадочным материалом или без него по схемам прямого или косвенного нагрева. Световая сварка с присадочным материалов внешне очень похожа на сварку нагретым газом с присадочным материалом (см. рис. 2.3.4), только вместо аппарата-источника нагретого газа используется, например, галогено-кварцевая лампа с фокусирующим излучение отражателем. Благодаря высокой степени концентрации энергии при прямом методе сварки пленок из ПЭ можно достичь скоростей процесса до 30 м/мин.

При *лазерной сварке* используется когерентный световой луч в видимом или инфракрасном диапазоне длин волн. Лазерное излучение позволяет достигать высоких концентраций энергии в зоне сварки и благодаря этому вести процесс соединения с высокими скоростями, в том числе контурного шва. Луч лазера с помощью сканирующих зеркал может перемещаться вдоль контура шва со скоростью до 10 м/с. Лазерная сварка пригодна прежде всего для соединения мелких деталей, например, микросистемной техники, медицинского и электронного назначения, которые повреждаются при УЗ- и сварке вибротрением. При сварке с помощью CO_2- лазеров прозрачных термопластов необходимо создавать условия для поглощения материалом излучения. Для этого в зоне сварки размещают полимерные прокладки, содержащие пигмент и которые после поглощения энергии лазерного луча передают теплоту соединяемым деталям. Потребность в таких прокладках отпадает, если сваривают прозрачную деталь, сквозь которую проходит лазерный луч, с непрозрачной деталью. Максимальное тепловыделение происходит на границе их контакта, и зона термического влияния может составлять всего 0,2 мм. В связи с этим при межконтактном зазоре между деталями более 0,5 мм поверхность прозрачной детали может не расплавиться, прочность соединения будет низкой, а шов – негерметичным. И в лазерной сварке наблюдается тенденция создания ПМ, расширяющих возможности метода. Так, фирма BASF AG, Ludwigshafen (Германия) создала для производства изделий автомобильной электроники ПА 6 марки Ultramid B3WG6 LT, обладающий более высокой лазерной прозрачностью в ближней ИК-области (лазер ND-YAG, длина волны 1064 нм) по сравнению с ПА 66 марки Ultramid A3WG6 LT и таким образом способный быстрее пропускать излучение к границе контакта с окрашенной деталью. Диодные лазеры, создающие поглощаемое всей толщиной детали излучение (длина волны 2 мкм), позволяют производить сварку встык, а также толстых и тонких деталей из прозрачных ПМ между собой. Прикрывая маской участки, не подлежащие сварке, можно получать очень узкие швы (шириной 0,1 мм и менее). При этом существенно сокращается продолжительность сварки и можно применить более дешевые диодные лазеры. Сварку по контуру выполняют с помощью роботизированных систем. Применяя установки со сканирующим диодным лазером, например, типа Dio Scan фирмы Laserline GmbH, Muelheim – Kaerlich (Германия) можно сваривать швы, имеющие три измерения. Подобную сварочную технику поставляют фирмы Leister, Kaegiswil (Швейцария), Bielomatik Leuze, Neuffen (Германия), Branson Ultraschall, Dietzenbach (Германия).

Лазеры успешно применяются в технологии резки ПМ.

Альтернативной тепловым методам сварки может быть сварка растворителем.

2.3.10. СВАРКА РАСТВОРИТЕЛЕМ

Сварка растворителем – вид сварки термомеханического класса, объединяющий спо-

собы, при которых активация свариваемых поверхностей происходит при временном присутствии растворителя (см. рис. 2.3.2).

Метод применяют в тех случаях, когда тепловые виды сварки могут нарушить форму и изменить размеры деталей, а также в мелкосерийном производстве и при необходимости соединения прозрачных термопластов (полиакрилатов, ПК, ПС), сварные швы которых должны иметь не только достаточно высокую прочность, но и хороший внешний вид. При выборе растворителя исходят из того, чтобы разность между параметрами растворимости полимера и растворителя не превышала 2,5 МДж/м^2. В технологии сварки применяют как индивидуальные растворители, так и их смеси. Использование смеси растворителей позволяет регулировать скорость размягчения полимера и предупреждать испарение растворителя с поверхности детали во время набухания. Основными операциями и переходами технологического процесса сварки растворителем являются: подготовка соединяемых поверхностей; нанесение на соединяемые поверхности растворителя или состава, содержащего растворитель (при соединении встык составом заполняют полость между кромками деталей); открытая выдержка; приведение соединяемых поверхностей в контакт; выдержка под давлением до момента затвердевания материала шва. Подготовка соединяемых поверхностей заключается в их очистке. При сварке органических стекол в качестве подготовительной операции может фигурировать термообработка при температуре, близкой к температуре стеклования полимера, в течение 30...60 мин в зависимости от его толщины. Нанесение растворителя осуществляют погружением, напылением, кистью, шпателем, шприцем и другими методами. В случае соединения органических стекол по большим поверхностям присадочный материал распределяют так, чтобы при последующем их контактировании обеспечить его равномерное течение в плоскости шва во все стороны без образования перемычек между потоками, которые ведут к возникновению воздушных включений. Процесс сварки ускоряется и облегчается при использовании лаковой (высыхающей) композиции – раствора полимера в инертном растворителе или полимеризующейся композиции – раствора полимера в мономере, обеспечивающей наилучшее качество соединения.

Ограничивают применение сварки растворителем плохая растворимость ряда термопластов, повешенная токсичность некоторых растворителей, трудности при изготовлении не горизонтально расположенных швов, в некоторых случаях – большая длительность затвердевания материала в зоне шва. Для ускорения процесса применяют дополнительный нагрев; в некоторых случаях растворяющая способность присадочного материала по отношению к пластмассе проявляется только при нагреве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров Г.В.** Способы соединения деталей из пластических масс. М.: Химия, 1979.

2. **Кораб Г.Н. , Шестопал А.Н., Комаров Г.В.** и др. Словарь-справочник по сварке и склеиванию пластмасс / Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1988. 160 с.

Глава 2.4

ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Склеивание – способ получения неразъемного соединения, заключающийся в заполнении клеем межконтактного зазора между соединяемыми поверхностями и формировании из него клеевой прослойки, имеющей иные, чем соединяемые материалы, свойства. В результате склеивания между соединяемыми поверхностями и клеевой прослойкой образуется прочная адгезионная связь, и создается клеевое соединение.

По своей сущности склеивание аналогично пайке металлов. По внешним признакам на склеивание похожа сварка растворителем термопластов (см. гл. 2.3). Однако по механизму процесса и по структуре шва, образующегося в результате его, этот способ образования соединения не может быть отнесен к склеиванию. Если после завершения процесса соединения граница раздела между клеевой прослойкой и соединяемыми поверхностями стала размытой, например, в результате диффузии компонентов клея в материал детали, образуется плавный переход от одного соединяемого материала к другому и фазу клеевой прослойки термодинамически трудно обнаружить, то такое соединение правильнее относить к сварному, а не к клеевому.

Склеивание при сборке изделий полимерных материалов (ПМ) начали использовать в то же время, когда началось промышленное освоение этих материалов.

В настоящее время склеивание наряду со сваркой – один из наиболее распространенных способов образования соединения деталей из металлических и неметаллических, в том числе полимерных материалов в различных отраслях техники: самолетостроении, электронике, машиностроении, судостроении, аппаратостроении, сборке велосипедов и инвалидных колясок, производстве изделий из стекла и керамики, а также в строительстве.

Распространению клеевых соединений способствуют следующие их преимущества:

сохранность структуры и свойств соединяемых материалов в зоне соединительного шва;

возможность соединения разнородных материалов;

возможность соединения не сваривающихся или трудно сваривающихся материалов;

возможность соединения как по большим, так и по малым поверхностям, в том числе сложной формы;

более равномерная передача клеевым слоем усилия от одной детали к другой по сравнению с заклепками, винтами или сварными швами, что обеспечивает большую долговечность соединения, более полную реализацию свойств соединяемого материала в соединении или возможность снижения толщины соединяемых деталей;

получение гладких внешних поверхностей изделий;

малое потребление тепловой энергии и возможность получения соединения при низких или нормальной температурах, что исключает опасность перегрева деталей;

возможность соединения тонкостенных деталей;

отсутствие потребности в тщательной подгонке соединяемых поверхностей;

выполнение клеевым слоем функции не только соединяющего элемента, но и стопорящего, пропитывающего, демпфирующего, изолирующего или электропроводящего, а также уплотняющего против проникновения газов и жидкостей материала;

возможность поглощения шума клеевым слоем;

уменьшение массы и габаритных размеров изделия по сравнению с соединениями, выполненными механическим креплением;

способность клея "залечивать" дефекты на соединяемых поверхностях;

применимость как в единичном, так и в крупносерийном производствах;

способность клеевого слоя препятствовать распространению сквозной трещины по месту соединения.

Однако клеевые соединения не заменяют, а дополняют другие соединения, хотя и являются часто единственно возможными.

Поскольку затраты на подготовку склеиваемых поверхностей мало зависят от их размеров, экономически более выгодными, чем, например, заклепочные соединения, клеевые соединения могут быть, если они выполняются по большим поверхностям.

Из основных недостатков клеевых соединений и процесса их изготовления можно выделить следующие.

Клеевые соединения характеризуются, как правило, более низкой прочностью по сравнению с прочностью конструкционных материалов.

Клеевые прослойки на полимерной основе имеют ограниченную теплостойкость (30... 270 °С) и в результате длительного теплового старения могут снижать свою прочность.

Клеевые соединения плохо работают при расслаивающем нагружении; возможности автоматизации процесса склеивания ограничены из-за длительной и трудоемкой подготовки поверхностей и длительного отверждения реактивных клеев.

Повышение требований к качеству соединений влечет рост технологических затрат.

Часто необходимо фиксировать положение деталей до момента достижения клеевым слоем определенной прочности, наступающего в зависимости от вида клея и способа склеивания после выдержки в течение нескольких минут, часов или дней.

С помощью неразрушающих методов контроля трудно оценить прочность клеевых соединений.

В некоторых случаях возникают проблемы по защите окружающей среды и обеспечению безопасных условий труда.

К трудностям, возникающим при склеивании деталей из ПМ, относят незаинтересованность их изготовителей в проведении на стадии формования деталей мероприятий, об-

легчающих соединение, а также наличие большого числа методов подготовки одного и того же материала. Отмечают также предубеждение некоторых работников против клеевых соединений, обусловленное их неинформированностью и отсутствием специальных знаний.

Качество клеевых соединений и ход технологического процесса склеивания в значительной мере зависят от выбранного клея.

2.4.1. ВЫБОР КЛЕЯ

При выборе клея учитывают прежде всего химическую природу соединяемых материалов, которая влияет на полярность, растворимость, реакционную способность и структуру поверхности. Не меньшую роль играют условия работы соединения, температурный коэффициент линейного расширения соединяемых материалов, конструктивные особенности изделия и требования к технологическим свойствам клея: вязкости, скорости отверждения, липкости (способности клея сцепляться с поверхностью при нормальной температуре), сохранности, или жизнеспособности (времени, в течение которого клей пригоден к применению). Существуют универсальные клеи, которыми можно склеивать материалы любой химической природы. Это – эпоксидные клеи, полиуретановые и клеи, содержащие изоцианат, акрилатные клеи и др. Как правило, рекомендуется использовать клеи, одинаковые или близкие по химической природе к полимерной основе материала (табл. 2.4.1). В этом случае физические и химические свойства клеевой прослойки (водо- и термостойкость, диэлектрические показатели, коррозионная стойкость и др.) будут близки к соответствующим свойствам соединяемого материала, а условия образования соединения будут мало отличаться от условий формования деталей и не будут сильно влиять на свойства ПМ.

По способности склеиваться термопласты могут быть разделены на: легко склеиваемые (без специальной подготовки поверхностей), условно легко склеиваемые (требующие несложной подготовки соединяемых поверхностей) и трудно склеиваемые (требующие сложной подготовки соединяемых поверхностей). Для соединения термопластов применяют как реактивные, в том числе на основе эластомеров, так и термопластичные клеи (табл. 2.4.2).

2.4.1. Клеи для соединения отвержденных реактопластов

Соединяемые ПМ	Клеи
Фенопласты:	
изделия с рабочими температурами:	
60…120 °С	Фенолоацетальный, эпоксидно-тиоколовый, эпоксидно-полиамидный, полиуретановый
200…300 °С	Фенолоацетальный + алкоксисилан, фенолокаучуковый, эпоксиднофенольный, кремнийорганический
Эпоксидные пластики	Эпоксидный, фенолоацетальный, фенолокаучуковый, полиуретановый, акрилатный, кремнийорганический
Полиэфирные пластики	Полиэфирный, полиэфирно-изоцианатный, эпоксидный
Кремнийорганические пластики	Кремнийорганический, эпоксидно-кремнийорганический, эпоксидно-фенольный
Полиимидные пластики	Полиимидный, полибензимидазольный, эпоксидно-кремнийорганический, фенолокаучуковый

2.4.2. Клеи для соединения термопластов

Термопласты	Клеи*
Легко склеиваемые:	
полиакрилаты	1, 2, 3, 4, 5
поливинилхлорид (ПВХ) непластифицированный	3, 6, 7, 8, 9, 10, 11
полистирол и сополимеры стирола	1, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 12
поликарбонат	1, 8, 11, 13
Условно легко склеиваемые:	
поливинилхлорид пластифицированный	1, 3, 14, 15, 16, 17
полиэтилентерефталат	1, 3, 6, 11, 18
полиамиды	1, 3, 4, 10, 19
пентапласт	1, 3, 8, 20
полифениленоксид	1, 11
полисульфон	1, 11, 13, 23
Трудно склеиваемые:	
полиэтилен (ПЭ)	1, 3, 7, 15, 21, 22
полипропилен (ПП)	1, 2, 3, 11, 15
фторопласты	1, 6, 10, 11, 13, 23
полиацетали	1, 8, 13, 20

* 1 – полиуретановый; 2 – эпоксидно-полиамидный; 3 – полихлоропреновый; 4 – фенольный; 5 – цианакрилатный; 6 – полиакрилатный, 7 – поливинилацетатный; 8 – полиэфирный, 9 – перхлорвиниловый; 10 – нитрильный; 11 – эпоксидный; 12 – полисульфидный; 13 – фенолокаучуковый; 14 – полиэфирно-изоцианатный; 15 – полиизоцианатный; 16 – на основе сополимера винилацетата и винилхлорида; 17 – на основе сополимера винилиденхлорида и акрилонитрила; 18 – на основе насыщенных полиэфиров; 19 – метилолполиамидный; 20 – эпоксидно-полисульфидный; 21 – на основе каучука и изоцианата; 22 – на основе сополимера этилена и винилацетата; 23 – кремнийорганический

2.4.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС СКЛЕИВАНИЯ

Технологический процесс склеивания (ТПС) относится как правило к типовым технологическим процессам, реже к групповым, ибо большинство технологических операций и переходов независимо от выбранного клея, типа соединяемых материалов, конструкции изделия, масштабов производства одинаковы. Как групповой ТПС можно рассматривать клеевую сборку трехслойных сотовых конструкций на одном рабочем месте. Но вместе с тем некоторые ТПС могут быть отнесены к единичным технологическим процессам из-за оригинального сочетания операций переходов.

ТПС деталей из ПМ, а также из других материалов независимо от их природы состоит из следующих операций и/или переходов: хранение клеев или их компонентов, грунтов и вспомогательных материалов; приготовление клея; подготовка соединяемых поверхностей; нанесение клея; открытая выдержка; монтаж склеиваемых деталей; формирование клеевого слоя; контроль качества клеевого соединения.

Хранение клеев или их компонентов. Тара или упаковка, в которых хранятся готовые клеи или их компоненты, и условия хранения должны обеспечить сохранность их технологических свойств и воспроизводство основных показателей эксплуатационных свойств клеевого соединения. Жидкие клеи или их компоненты хранятся в плотно закрывающихся металлических, стеклянных или полимерных сосудах (канистрах, банках, бочках и т.п.) в условиях, исключающих их загрязнение, увлажнение, нагрев, облучение, удаление летучих компонентов (растворителей, пластификаторов, отвердителей и др). Удобной формой хранения готовых к употреблению клеев является затаривание их в тубы из мягкой жести, а перед нанесением шприцеванием – затаривание в полимерные, картонные и прочие стаканы (патроны). В общем случае

помещение, где хранятся клеи, должно соответствовать условиям хранения связующих, препрегов и других химических веществ, используемых при формовании деталей из ПМ и ПКМ. Температура в помещении должна быть в пределах 15...25 °С, относительная влажность 60...70 %. Соблюдение правильности хранения контролируется входным контролем материалов на соответствие паспортным данным (вязкость, содержание летучих или сухой остаток, активность отвердителей, однородность смеси и др.).

Приготовление клея заключается в смешивании его отдельных компонентов в соотношении и последовательности, определяемых рецептурой. В современных производствах клеи поступают к потребителю в виде двух, реже трех, упаковок. Основное правило при смешивании компонентов клея или упаковок непосредственно на месте его использования – введение отвердителя или ускорителя отверждения непосредственно перед нанесением клея. Важным вопросом является установление допустимого отклонения соотношения компонентов от оптимального значения. Нарушение соотношения компонентов на ±0,03 %, например, двухупаковочных полиуретановых клеев, может существенно повлиять на качество клеевого соединения. Точность дозирования компонентов клея можно повысить путем использования более коротких и эластичных транспортирующих шлангов и снижения гидравлического сопротивления дозирующих вентилей. Желательно также, чтобы оба компонента клея имели одинаковую или близкую вязкость.

Большое значение имеет также и равномерность смешения компонентов, которая улучшается при использовании автоматизированных установок для дозирования и смешения компонентов. На точность и стабильность смешивания компонентов влияют многие факторы, среди которых геометрия смесителей, статический или динамический характер смешивания, температура, которая влияет на вязкость компонентов и собственно клея, гидравлические сопротивления в системах транспортировки компонентов и др. Так, например, при длине гибкого шланга 4 м и его диаметре 6 мм в течение первых 1...10 с подачи компонентов клея может наблюдаться их передозировка в количестве до 20...27 % требуемого расхода. Повысить точность дозирования и смешивания компонентов позволяет специальное конструктивное исполнение узлов автоматизированных установок. Равномерность смешения разноокрашенных компонентов удобно контролировать визуально по появлению равномерной смешанной окраски.

Простым и производительным методом оценки равномерности смешения компонентов клеев специалисты из Technische Hochschule Aachen (Германия) считают измерение электропроводности навески клея в пяти различных направлениях. Осуществлять технологический контроль соотношения компонентов клея измерением его электропроводности рекомендуется специалистами фирмы Ciba-Geigy AG (Basel, Швейцария). Поскольку электропроводности компонентов клея значительно различаются, разброс результатов измерений однозначно характеризует равномерность смешения. О достижении последней судят также по моменту выхода кривой зависимости количества экстрагируемых в отвержденном клеевом слое от продолжительности смешения на горизонтальный участок.

Проблема удаления воздушных включений из клея после смешения его компонентов стоит не так остро, как, например, при приготовлении заливочных компаундов, ибо толщина формирующегося клеевого слоя невелика и пузырьки воздуха могут быть легко уделены из зазора во время монтажа склеиваемого изделия. Поэтому вакуумирования клеев в отличие от компаундов не требуется. Вместе с тем предварительная обработка клея механическими ультразвуковыми колебаниями в течение до 10 с способствует лучшему диспергированию отвердителя, снижает вязкость композиции, ускоряет процесс последующего отверждения, повышает прочность соединения.

Современной тенденцией в технологии склеивания при сборке изделий машиностроения является применение готовых клеев. В этом случае необходимость в операции приготовления клея отпадает.

Клеи в виде растворов и водных дисперсий приготовляют по периодической схеме в реакторах с мешалками различной конструкции. Непрерывная схема производства позволяет повысить производительность процесса с 100...300 до 1000...2000 кг/ч. Однако непрерывные методы целесообразно использовать при получении клеев в крупном масштабе.

Клеи-расплавы периодическим способом получают в реакторах с *Z*-образными лопастями и разгрузочным шнеком, в плавильных

котлах, в системах, состоящих из плавильного резервуара, насоса и конечного смесителя для смешения расплавов, а также валковым способом при изготовлении клеев без специального подогрева на двух- или трехвалковых установках. При непрерывной схеме используются двухшнековые экструдеры с одновременной пропорциональной дозировкой твердых и жидких компонентов, их плавлением, гомогенизацией и последующей выгрузкой и формованием. В одношнековых экструдерах применяется специальная конструкция шнека.

Реактивные пленочные клеи изготовляют из расплавов или из растворов. Расплавы получают одним из указанных выше способов с дальнейшей гомогенизацией клеевой массы в одношнековых экструдерах и подачей клеевой массы на каландры или на вращающийся охлаждаемый барабан. Пленку из раствора формуют поливом на бесконечную ленту с последующим выпариванием растворителя.

Подготовка соединяемых поверхностей является одной из важнейших операций в технологическом процессе склеивания. Склеивание по неподготовленным поверхностям проводят редко. Даже лучший клей не обеспечит высокого качества соединения, если склеиваемые поверхности покрыты веществами с низкой поверхностной энергией и/или с низкой когезионной прочностью (жирами, пластификаторами, низкомолекулярными продуктами полимеризации или поликонденсации и др.). Чужеродные тела (всевозможная пыль, стружка, опилки и т.п.) препятствуют достижению полного контакта клея с поверхностью, имеющей уже гетерогенный характер. У толстостенных деталей из отвержденных при нагреве реактопластов поверхностный слой может иметь более высокую степень отверждения, чем материал в объеме, что отрицательно отражается на активности ПМ по отношению к клею. Кроме того, поверхностный слой ПКМ обогащен полимерной фазой, постепенное накопление дефектов в котором может служить причиной разрушения клееной конструкции.

Подготовка поверхностей к склеиванию заключается в подгонке их друг к другу и обработке с целью очистки и/или модифицирования. Хорошая подгонка и ровный характер соединяемых поверхностей необходимы для формирования преимущественно тонкой и равномерной по толщине клеевой прослойки. Особенно тщательная подгонка поверхностей должна быть при использовании клеев, которые в момент выполнения монтажных работ обладают большой текучестью. Контроль качества прилегания соединяемых поверхностей проводят с помощью щупов. О качестве прилегания сотового заполнителя к обшивкам трехслойных конструкций судят по отпечаткам сот на поверхности, например, полиэтиленовой пленки, уложенной между заполнителем и обшивкой. Формование отпечатка производят при температуре ниже $T_{пл}$ полиэтилена в течение 10...15 мин и давлении около 0,1 МПа. При клеевой сборке трехслойных сотовых панелей зазор между соединяемыми поверхностями полок деталей каркаса и сотовым заполнителем с одной стороны и прижатыми к ним обшивками с другой стороны должен быть не более 0,1 мм, чтобы исключить изгиб обшивок и появляющиеся в результате этого отслаивающие напряжения,

Способ обработки поверхностей зависит от типа пластика, предыстории соединяемых деталей, природы клея и требований к качеству соединения. Полимерная матрица в составе пластика может относиться к хорошо склеивающимся материалам. Однако вспомогательные материалы, которые применили при формовании полимерных деталей, например, смазки, могут ухудшить способность склеиваться. Предвидеть такую возможность необходимо до изготовления деталей.

Преимущественным способом подготовки пластиков, в том числе и композиционных материалов (КМ), на основе реактопластов к склеиванию служит механическая обработка, например, струйная обработка (опескоструивание), механизированное (например, с помощью устройств типа полотера или дрели со специальными насадками) или ручное шлифование наждачной бумагой средней зернистости (120...140) (стеклопластики) или с зернистостью не менее 280 (карбопластики). Абразивная обработка струйными методами используется для деталей толщиной не менее 3 мм. В качестве абразива при струйной обработке служат корунд, песок, чугунная крошка. Критерием качества обработки следует считать удаление глянца с поверхности и отсутствие ворсистости. Повышению долговечности клеевого соединения способствует обработка частицами корунда, на поверхность которых нанесен силикат. При ударе частиц с силикатным покрытием о поверхность оно растрескивается, и его осколки под влиянием выделяющейся

при ударе теплоты закрепляются на обрабатываемой детали. Параметры режима обработки следующие: давление сжатого газа (воздуха, азота) 0,4 МПа, расход абразива 350 г/мин, расстояние от сопла аппарата до поверхности 15...65 мм, угол наклона струи к поверхности 90°, скорость перемещения вдоль поверхности 50 мм/с. Рабочий участок, где производится струйная обработка деталей, требуется изолировать от соседних помещений.

Карбопластики зачищают также влажным порошком карбида кремния. Образовавшиеся при обработке пыль и стружку отсасывают с помощью пылесоса, удаляют обдувкой воздухом или щетками. Перед нанесением клея обработанные поверхности промывают растворителем (кетоны, спирты, хлорпроизводные углеводороды, бензин) с антистатическими добавками или протирают тампоном, смоченным в растворителе, и сушат при 20... 65 °С не более 30 мин. Пожаробезопасность очистки обеспечивает использование эмульсии растворителей в воде или водный раствор поверхностно-активного вещества, например, типа "электрин".

Если условия хранения деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) перед склеиванием трудно проконтролировать или сделать их воспроизводимыми, то эффективным методом подготовки поверхностей может стать удаление с соединяемых участков технологических слоев, представляющих собой преимущественно полиэтилентерефталатные (например, лавсановая фильтровальная ткань, артикул 56208) или полиамидные ткани. Эти слои, называемые "жертвенными" или сдираемыми, приформовываются к деталям в процессе их изготовления таким образом, чтобы не было сквозной пропитки реактивным связующим. Сдираемый слой на поверхности ПКМ принимает на себя избыток (до 25 %) связующего на ней, содержащего много воздушных включений, защищает ПКМ от повреждений и загрязнений во время производственных операций после формования детали, способствует созданию шероховатого рельефа. При формовании деталей с применением намотки сдираемый слой может выполнять функции создающего давление элемента за счет термической усадки. Прочность клеевого соединения повышается, иногда на 30 %, после дополнительной струйной обработки эпоксидного углепластика, с соединяемых участков которого была снята полиамидная ткань.

Поверхность контакта клеевого слоя с обшивкой в сотовых конструкциях больше поверхности контакта сотового заполнителя с клеевым слоем даже при натекании клея на стенки сот. Реализовать прочность заполнителя в клееных трехслойных конструкциях удается без использования сложных методов подготовки поверхностей. Требования к подготовке поверхности листовых ПКМ перед клеевой сборкой сотовых конструкций могут быть удовлетворены ручной или механизированной обработкой наждачной бумагой с последующим отсосом пыли и очисткой растворителем. Ограничиться одной лишь очисткой недостаточно. Такой же подготовкой поверхности ПКМ можно воспользоваться при изготовлении трехслойных панелей с пенопластовым заполнителем. Подготовка сотового заполнителя, раскроенного на заготовки и подогнанного к элементам панели, заключается в удалении пыли с помощью пылесоса.

Для обеспечения высокого качества клеевого соединения важно не только удалить с поверхности инородные тела, но и исключить повторное ее загрязнение. Однако даже будучи завернутыми в бумагу детали из стеклопластиков с подготовленными поверхностями могут храниться перед выполнением следующей операции ограниченное время (до двух недель при 20 °С и относительной влажности 50 %). Сохранению активности поверхности способствует нанесение грунтов. В качестве грунта можно использовать сильно разбавленный клей, с помощью которого производится сборка изделия, или специально созданные композиции, содержащие кремнийорганические соединения типа γ-аминопропилтриэтоксисилан или глицидоксипропилтриметоксисилан.

Обработку поверхностей термопластов так же, как и обработку поверхностей деталей из реактопластов, осуществляют механическим, химическим, физическим или комбинированным способом. Обработкой наждачной бумагой и обезжириванием можно ограничиться при склеивании аморфных термопластов: полиакрилатов, жесткого поливинилхлорида, полистирола. Чтобы исключить образование рисок в результате действия остаточных напряжений, детали из полиакрилатов и полистирола в некоторых случаях перед склеиванием подвергают термообработке при температуре, близкой к температуре стеклования термопласта. Растворитель для обезжиривания не

должен вызывать набухание термопласта. Для ускорения очистки на растворитель оказывают воздействие ультразвуковыми механическими колебаниями в течение нескольких минут.

Однако придание шероховатости путем механической обработки не во всех случаях приводит к повышению прочности соединения. Она возрастает с увеличением истинной площади контакта между клеевым слоем и поверхностью, если клей полностью заполняет образовавшиеся после обработки поры. Если пузырьки воздуха останутся на поверхности, то они не только снизят истинную площадь контакта, но и послужат концентраторами напряжений в шве. Увеличение степени шероховатости поверхности, краевой угол Θ смачивания которой клеем > 90°, не дает желаемого результата, так как в этом случае клей не заполняет имеющиеся на поверхности углубления.

Поверхность деталей из поликарбоната перед склеиванием обезжиривают керосином, гептаном, изопропиловым спиртом, метанолом или водой с моющим средством. Для удаления влаги детали термообрабатывают при 120 °С. Прочность соединения повышается после шлифования или струйной обработки поверхности.

Много различных методов предложено для обработки перед склеиванием фторопластов, полиолефинов, полиамидов и других кристаллизующихся термопластов, а также термопластичных КМ нового поколения. Один из них – дублирование со стеклотканью или с другими армирующими материалами, выполняемое на прессах с нагретыми плитами или на каландрах. Покрытие полиамидов тканями осуществляют, например, с помощью раствора полиамида в смеси резорцина и спирта таким образом, чтобы ткань не имела сквозной пропитки. В те участки деталей из фторопласта-4, которые подлежат склеиванию, вводят наполнители – оксиды железа и хрома, кварцевую муку, цемент, порошки металлов, металлические сетки. На поверхность полиэтиленовой пленки экструзией наносят слой полимера (поливиниловый спирт, сополимеры этилена), обладающие более высокой, чем у полиэтилена, поверхностной энергией. На поверхности полиамидов прочно удерживается подслой из отвержденного феноло(резорцино)-формальдегидного связующего или фурилового лака.

Составы ванн и режимы химической обработки термопластов перед склеиванием зависят от типа материала (табл. 2.4.3). Вместе с тем продолжаются работы материаловедов по созданию клеев, которые не требовали бы сложной и дорогостоящей подготовки поверхностей. Такой двухупаковочный акрилатный клей под маркой 3M Scotch-Weld DP 8005 для соединения полиэтилена и полипропилена без какой-либо подготовки их поверхностей предлагает фирма 3 M Deutschland, Neuss (Германия). Достигаемая прочность соединения находится на уровне прочности соединяемых материалов.

Поскольку поверхностное натяжение ПЭЭК (40 мН/м) ниже поверхностного натяжения, например, эпоксидных клеев (42... 55 мН/м), то одной лишь очистки или легкой абразивной обработки поверхности углепластика типа АРС-2 на основе ПЭЭК недостаточно для получения прочного соединения указанными клеями. По данным фирмы Lockheed California Co (США), хромово-серное травление материала АРС-2 при нормальной температуре в течение 30 мин по своему эффекту незначительно уступает плазменной обработке в атмосфере O_2 (прочность соединения при сдвиге соответственно 27,8 и 30,3 МПа), а по данным фирмы One Space Park (США), наоборот, плазменное травление в смеси CF_4 + O_2 обеспечивает повышение прочности соединения до 41,6 МПа по сравнению с 19,2 МПа после травления углепластика в хромовой кислоте.

Прочность клеевого соединения КМ на основе полифениленсульфида после струйной обработки и очистки повышается в два раза по сравнению с одной лишь очисткой. Но еще большее повышение получают после струйной обработки очистки растворителем и обработки пламенем. По критерию "прочность" соединения, выполненные после такой подготовки поверхностей, можно отнести к конструкционным. Получаемый эффект от обработки пламенем объясняют дальнейшей очисткой шероховатой поверхности и увеличением площади поверхности, созданной струйной обработкой.

К преимуществам плазменного травления относят прежде всего более длительное, чем после других методов обработки, сохранение активности поверхности и способность рабочей среды во время травления проникать даже в узкие щели с раскрытием всего в несколько мкм. Но оно имеет и недостатки, к важнейшим из которых относят высокую

2.4.3. Химическая обработка термопластов перед склеиванием

Термопласт	Состав ванны	Режим обработки		Примечание
		Температура, °С	Продолжительность, с	
Фторопласт-4	Натрий – 46 г, нафталин – 128 г, тетрагидрофуран – 1 л	20	60...120	Перед обработкой поверхность промывают ацетоном, а после обработки – изопропиловым спиртом и водой
Полиэтилен, полипропилен	Дихромат калия – 5 г, концентрированная серная кислота – 100 г, вода – 8 г	70	120	Перед обработкой поверхность очищают метиленхлоридом или ацетоном. После обработки промывают в воде в течение 5 мин, а затем сушат теплым воздухом
Ударопрочный полистирол		20	300	После обработки промывка проточной водой и сушка теплым воздухом при температуре не выше 60 °С
Полиацетали	Концентрированная хромовая кислота Фосфорная кислота (85 %-ная)	20 50	10 5...10	После обработки промывка проточной водой и сушка при температуре 100 ± 5 °С в течение 20 мин
Полиэтилентерефталат	20 %-ный раствор гидроксида натрия	80	300	После обработки поверхность промывают водой и погружают в 1 %-ный раствор хлорида цинка

стоимость оборудования, ограниченность размеров деталей размерами рабочей камеры, неравномерность действия плазмы и невозможность непрерывного ведения процесса. Некоторых недостатков плазменной обработки в вакуумной камере лишена обработка плазменным пистолетом. Она особенно пригодна для улучшения адгезионных свойств поверхности фасонных деталей и профилей, в том числе в непрерывном процессе.

Работами в научной организации Fraunhofer – Institut für Lasertechnik (Aachen, Германия) показана более высокая эффективность лазерной обработки ПКМ по сравнению с традиционными методами. Толщина удаляемого слоя материала мало влияет на прочность клеевого соединения и определяется длиной волны лазерного излучения, мощностью импульса, длительностью обработки и может составлять менее 1...30 мкм при длительности от 10 нс до 30 мкс. Преимущества лазерной обработки поверхности ПКМ заключаются в экологической чистоте способа, качественной очистке и минимальной повреждаемости поверхностного слоя. Исходная прочность при сдвиге нахлесточных соединений углепластика, изготовленных после лазерной обработки склеиваемых поверхностей, составила 26 МПа, а после выдержки в воде при температуре 70 °С в течение 40 сут – 19 МПа, после механической обработки – соответственно 19 и 16, после обработки коронным разрядом – 20 и 15, при использовании сдираемых слоев – 18 и 12 МПа соответственно.

При **нанесении клея** должны быть решены три задачи: дозировка клея, равномерное его распределение, обеспечение контакта клея с соединяемыми поверхностями. Выбор способа нанесения и дозировки и обеспечение контакта клея с подложкой зависят от состояния клея (жидкое, пастообразное, твердое – пленочное или порошкообразное), а также от характера деталей (с большой площадью склеиваемых поверхностей, крупногабаритные конструкции с ограниченной площадью соединяемых поверхностей, перемещение которых затруднено, или малогабаритные легко транспортируемые детали). Жидкие клеи наносят размазыванием кистями и шпателями, напылением, выдавливанием из пистолетов, шприцев и экструдеров, техникой печати с помощью штемпелей и валков, окунанием, поливом. Пастообразные клеи наносят шпателем. Пленочные клеи вырезают по размеру склеиваемых участков, укладывают на нанесенный точками жидкий клей или подогретую поверхность и прикатывают валками. Липкие пленки можно прикатать холодным валком. При нанесении пленочного клея на торцы сот после укладки пленки можно произвести ИК-нагрев и обдув подогретым воздухом. Механическое воздействие на клей при нанесении обеспечивают его контакт с подложкой и выравнивание его толщины.

Акрилатные клеи можно наносить так называемым методом "А+Б", при котором на одну из соединяемых поверхностей наносят компонент, содержащий отвердитель (инициатор), а на другую – компонент, содержащий ускоритель отверждения. Одним из основных при этом правилом является нанесение жидкого клея на обе соединяемые поверхности. При двухстороннем нанесении эпоксидного клея интервал времени между смешением его компонентов или нанесением и приведением поверхностей в контакт может составлять до 60 мин (в пределах периода сохранности клея), не сказываясь на прочности соединения. При одностороннем же нанесении клея прочность при сдвиге, например образцов из алюминия, снизилась с 27 до 7 МПа при адгезионном характере разрушения, если указанный интервал составлял всего 30 мин.

Даже конструкция тюбика может быть достаточно сложной, чтобы обеспечить дозированное выдавливание из него клея. Емкости для хранения клея в форме тюбика снабжаются специальным колпачком, при вращении которого происходит точное дозирование содержимого. При завинчивании же колпачка осуществляется одновременная очистка транспортирующих каналов и герметизация содержимого тюбика.

В связи с расширением применения клеев-расплавов многие фирмы различных стран предлагают устройства для нанесения этих клеев.

Учитывая невысокую термостабильность расплавов термоплавких клеев, более рациональной по сравнению со шнековой является поршневая конструкция материального цилиндра для плавления и подачи клея, в котором плавление клея происходит лишь в тонком слое, прижатом холодным поршнем к нагретой фильере. При этом время до начала плавления клея составляет всего 2...3 мин. В настоящее время в промышленности имеются устройства, наносящие клеи-расплавы не только в виде

точек или валиков, но и его распылением по соединяемой поверхности с образованием тонкого равномерного слоя с поверхностной плотностью 40...60 г/м^2, а иногда и до 4... 8 г/м^2. Выпускаются аппараты, с помощью которых распыление расплавленного клея осуществляется струей горячего воздуха (температура воздуха может составлять в зависимости от модели 200 °С или 100...230 °С). Схемы нанесения регулируются в широких пределах: от точечного (при массе наносимого клея около 0,1 г) до полосы длиной от 100 мм при ширине 2...200 мм как очень тонким слоем, так и слоем толщиной, измеряемой миллиметрами. Необходимость очистки сопла распылителя после окончания работы отсутствует, так как при повторном включении оставшийся в нем клей вновь плавится и используется по назначению. Масса аппарата, например, марки TR – 60.2 фирмы Reka (Германия) – 1200 г. В устройствах для нанесения вспененных клеев осуществляется предварительное смешивание их расплавов с инертным газом.

Элементы устройств, предназначенных для нанесения клеев, отверждаемых под влиянием влаги, должны быть предварительно просушены нагретыми азотом или воздухом.

В установках для нанесения клеев скорость перемещения клееносящего устройства не должна превышать скорость дозирования клеевого валика с целью сохранения его непрерывности.

Удовлетворить требованиям строго контролируемого нанесения клеев в автомобилестроении могут полностью автоматизированные, в том числе роботизированные устройства. К этим требованиям относят: время цикла до 10 с, скорость нанесения до 500 мм/с, большую производительность подачи клея (диаметр клеевого валика до 10 мм).

Современные роботизированные системы, состоящие из блока управления и робота, для нанесения клеев и герметиков отличаются высокой скоростью перемещения, быстродействием и точностью позиционирования рабочей руки даже при движении по сильно искривленной траектории. Расход экструдируемого клея может быть постоянным или регулироваться по специальной программе. Общая масса дозирующей системы может составлять всего 5 кг при объеме 500 см. Такие системы уже используются в автомобилестроении.

Нанесение клеев-расплавов на склеиваемые поверхности методами экструзии или распыления сопряжено с большими трудностями ввиду их высокой вязкости в расплавленном состоянии. Для того чтобы не происходило преждевременного затвердевания нанесенного расплава клея на подложке, последние подогревают. Температура подогрева зависит от природы подложки, температуры стеклования или плавления клея, температуры окружающей среды. Так, при использовании клея-расплава на основе смеси сополимера этилена с винилацетатом (СЭВА) и битума, наносимого при температуре 220 °С, подогрев деталей из стали и алюминия осуществляют до температуры 90 °С, из чугуна, ПП и ПЭ – 80 °С, из ПВХ – 65 °С.

Имеются устройства для непрерывного автоматизированного нанесения клеев-расплавов с достаточно высокой вязкостью на гибкие подложки, на однородные по толщине подложки, какими являются, например, бумаги и различные пленки. При прохождении таких пленок сквозь ванну с расплавом клея и калибрирующую фильеру на их поверхность наносится равномерный слой клея с точностью до ±1 г/м^2. Для занесения низковязких клеев на подложки с неоднородной толщиной предназначено устройство, в котором клей с задаваемым расходом выдавливается или непосредственно на поверхность движущейся подложки, или переносится на нее с помощью промежуточного вращающегося барабана, смачиваемого выдавливаемым клеем. Оба устройства, выпускаемые, например, фирмой BemaTec (Швейцария), отличаются компактностью и малой энергоемкостью, удобством при очистке их узлов от остатков клея. Они позволяют наносить клеи на подложки шириной от 500 до 4280 мм со скоростью до 420 м/мин. Некоторые узлы – сменные и быстросъемные для переналадки устройств при переходе на подложки другого типа и размеров.

В электронике часто требуется наносить клей в виде точек. Оптимальным отношением диаметра капли нанесенного клея к ее высоте считается от 1,0 до 1,5. Такое условие выполняется не только подбором клея, но и применением соответствующих клееносящих устройств. Установки, выпускаемые западными фирмами, позволяют наносить капли объемом от 0,01 до 30 мм^3 в течение 0,005...30 с. Например, установка марки HS-180 К может наносить до 18 000 клеевых точек в один час.

Строго дозированное нанесение требуется не только из-за требований миниатюриза-

ции, но и при использовании дорогих клеев, к каковым относят цианакрилатные клеи. Величина наносимой дозы клея регулируется длительностью операции и давлением сжатого воздуха в клеенаносящем сопле.

Контроль количества наносимого клея можно осуществлять различными методами. Одним из таких методов может быть измерение интенсивности отраженного светового потока, если в клее имеется определенное количество равномерно распределенного флуоресцирующего вещества. В оптоэлектронной сенсорной системе отслеживания качества наносимой полосы клея кольцевой датчик, смонтированный на сопле, наносящем клей, контролирует независимо от направления правильность укладки полосы клея по надлежащей траектории и точность заданной ширины полосы. Система также проверяет отсутствие наплывов клея и поврежденной подложки.

Открытая выдержка осуществляется для вытеснения воздуха из пор и неровностей поверхности и обеспечения дальнейшего заполнения их клеем и для выравнивания толщины клеевого слоя. Продолжительность открытой выдержки определяется свойствами клея и состоянием поверхности. Ускорению испарения растворителя способствует нагрев поверхности. Точку перегиба на кривой испарения можно считать соответствующей оптимальной продолжительности открытой выдержки.

Монтаж склеиваемых деталей преследует цель зафиксировать их положение, достигнуть более полного контакта между клеем и склеиваемыми поверхностями и создать клеевую прослойку оптимальной толщины. При использовании капсулированных клеев давление разрушает стенки капсул, обеспечивая таким образом контакт компонентов клея. Величина давления во время монтажа зависит от вязкости клея, точности подгонки поверхностей, жесткости склеиваемых участков. Его оптимальное значение подбирают преимущественно эмпирически для каждого клея отдельно. При избыточном нанесении клея, принимаемого за ньютоновскую жидкость, между толщиной d клеевого слоя, его реологическими свойствами, размерами склеиваемых поверхностей (при прямоугольной форме перекрытия в нахлесточном соединении и отношении $b/l_н \geq 1$, где b – ширина перекрытия, $l_н$ – его длина) и приложенной нагрузкой выведена зависимость:

$$d = \left(3\eta l_н^2 / 2pt\right)^{1/2}.$$

При изменении вязкости $\eta = \eta_0 e^{\alpha t}$:

$$d = \left[3\alpha\eta_0 l_н^2 \Big/ 2p\left(1 - e^{-\alpha t}\right)\right]^{1/2}.$$

Здесь η_0 – начальная вязкость клея; t – продолжительность соединения; p – давление запрессовки; α – коэффициент увеличения вязкости.

Если воспользоваться расчетом, то время $t_д$ достижения толщины d = 0,13 мм эпоксидного клеевого слоя (соотношение эпоксидная смола /аминный отвердитель/ наполнитель – 100/11/20, η_0 = 0,6 Па·с), нанесенного с избытком толщиной 1 мм, при приложении давления 0,127 МПа от длины перекрытия зависит следующим образом:

$l_н$, мм	28	140	420	1120	1680
$t_д$, мин	0,0	0,1	1,5	12,1	31,6

Заданную толщину клеевого слоя позволяют достичь так называемые дистанционные элементы. Дистанционными элементами могут служить тонкая проволока, укладываемая по краям клеевого слоя, частички наполнителя (в количестве 1 % при величине порошинок не менее 50 мкм), стеклоткань. Влияние размера δ частичек наполнителя на толщину d эпоксидноаминного клеевого слоя, в который введено 1 % порошка корунда, показано ниже:

δ, мкм	63...80	80...100	100...125
Давление, МПа	0,05	0,05	0,05 0,1
d, мкм	79	93	122 103

Для фиксирования положения деталей можно применить нагрев клеевой пленки, подводя к ней механические колебания с помощью ультразукового пистолета.

Давление при склеивании создают различными способами, зависящими от конструкции изделия, формы и размеров соединяемых участков, типа клея, серийности производства: с помощью грузов, пневматических или гидравлических прессов, прессов с винтовыми или эксцентриковыми зажимами в автоклавах,

с помощью вакуумного мешка, стягивающими лентами, в сборочных стапелях, оборудованных различными зажимными устройствами.

Формирование клеевого слоя наряду с подготовкой соединяемых поверхностей является наиболее важной операцией технологического процесса склеивания. При использовании реактивного клея эта операция по сути своей представляет собой отверждение клеевого слоя, сформированного во время выполнения монтажных работ. Правильный температурно-временной режим отверждения является необходимой предпосылкой достижения высокой прочности клеевого соединения.

Режим отверждения зависит от природы и рецептуры клея, природы соединяемого материала, конструкции склеиваемого изделия, условий производства, требований к производительности процесса, оснащения предприятия и других факторов. При склеивании термопластов температура отверждения определяется теплостойкостью материала. Качественно различают четыре уровня прочности клеевого соединения: "ручная" прочность, составляющая около 0,1...0,2 конечной прочности $\tau_{кп}$ и предотвращающая смещение склеиваемых деталей друг относительно друга при минимальных нагрузках; "функциональная" прочность, равная 0,3...0,5 $\tau_{кп}$ и обеспечивающая транспортабельность склеиваемого изделия; "монтажная" прочность, составляющая около 0,8...0,9 $\tau_{кп}$ и, наконец, конечная прочность. Температура отверждения реактивных клеев обычно находится в интервале 20...200 °С. Ниже нормальной температура отверждения может быть при выполнении ремонтных работ на воздухе или в неотапливаемом помещении, а более высокие, чем 200 °С, температуры требуются для отверждения полиароматических клеев, при использовании некоторых видов неорганических клеев.

Клеевые соединения на основе эпоксидных, полиуретановых и акрилатных клеев имеют высокую прочность даже после отверждения при нормальной температуре.

Повышение температуры отверждения реактивных клеев способствует увеличению жесткости, теплоустойчивости и водостойкости клеевой прослойки и ускорению достижения $\tau_{кп}$. Однако менее отвержденные клеевые прослойки могут увеличить свою жесткость в процессе старения.

Нагрев склеиваемых участков проводят в термошкафу, в автоклаве, контактными нагревателями, высокочастотным способом или с помощью ультразвука.

Давление во время отверждения необходимо увеличить по сравнению с давлением при монтаже изделия, если повышается противодавление летучих продуктов в клеевом слое.

Если давление создается локально, то желательно при использовании клеев горячего отверждения схемой зажима деталей исключать смещения в клеевом слое, вызванные тепловым удлинением соединяемых деталей. Чем больше смещение клеевого слоя, тем ниже прочность соединения и деформативность клеевого слоя. Величина смещения зависит от распределения температуры в соединяемых деталях, температурного коэффициента линейного расширения материалов, геометрии соединяемых деталей и зоны соединения, а также деформационных свойств клеевого слоя. Размещая зажимное приспособление непосредственно в зоне соединяемых участков, можно уменьшить указанное смещение.

Продолжительность выдержки под давлением и при температуре склеивания зависит от скорости нагрева зоны соединения до заданной температуры и скорости отверждения. ВЧ- и СВЧ-нагрев, часто называемый микроволновым, обеспечивает повышенную скорость подъема и равномерность распределения температуры. Теплота во всем объеме клеевого слоя выделяется в результате внутреннего трения его элементарных частиц, возникающего при взаимодействии внешнего переменного электромагнитного поля с полярными молекулами полимера и других компонентов клея. Данных об использовании этого способа нагрева на практике в крупносерийных производствах недостаточно, чтобы его рекомендовать к широкому применению. Возможна технология, при которой проводится локальный точечный нагрев с окончательным отверждением полиуретанового клеевого слоя в результате воздействия влаги окружающей среды. Благодаря высокой производительности процесса отверждения оборудование для ускоренного склеивания с применением микроволнового нагрева отличается быстрой окупаемостью, особенно в серийном и массовом производствах.

Для отверждения акрилатных клеев можно применить УФ-излучение с длиной волны 350...400 нм в сочетании с нагревом. Отвер-

ждение синим светом длиной волны 450... 500 нм имеет такие преимущества по сравнению с отверждением УФ-излучением, как более высокая интенсивность, лучшее пропускание наполнителями и многими ПМ, способность проходить через слои покрытий и/или клеевых слоев толщиной до 10 мм, пригодность при склеивании эпоксидного стеклопластика, деталей из ПВХ и поликарбоната, для которых УФ-излучение неприменимо, безопасность для здоровья оператора.

Затвердевание термопластичных клеев происходит в результате испарения растворителей или охлаждения соединяемых участков.

Контроль качества клеевого соединения проводят разрушающими и неразрушающими методами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комаров Г.В.** Соединения деталей из полимерных материалов: Учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2006. 592 с.

2. **Комаров Г.В.** Склеивание / Энциклопедия полимеров. Т. 3. М.: Советская энциклопедия, 1977. С. 410 – 417.

3. **Кораб Г.Н., Шестопал А.Н., Комаров Г.В.** и др. Словарь-справочник по сварке и склеиванию пластмасс / Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1988. 160 с.

4. **Петрова А.П.** Клеящие материалы. Справочник / Под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М.: ЗАО "Каучук и резина", 2002. 196 с.

Глава 2.5

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТМАСС

К техническому оснащению процессов переработки полимерных материалов (ПМ) относятся совокупность силового оборудования, приспособлений и технологической оснастки. Выбор технического оснащения зависит от типа ПМ и метода его переработки.

2.5.1. ОБОРУДОВАНИЕ

2.5.1.1. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Литье под давлением деталей из термо- и реактопластов осуществляется соответственно на термопластавтоматах или на реактопластавтоматах. Часто в литературе термопластавтоматы и реактопластавтоматы объединяются термином "литьевые машины". В качестве технологической оснастки при литье под давлением используются литьевые формы.

Все литьевые машины состоят из двух основных исполнительных механизмов – механизма пластикации и впрыска, служащего для дозирования материала, перевода в вязкотекучее состояние, а также впрыска расплава в форму, и механизма запирания формы, который предназначен для крепления формы, перемещения ее частей и удержания формы в сомкнутом состоянии при впрыске расплава и формовании детали. Эти механизмы и обеспечивающие их функционирование приводы устанавливаются на сварной станине, на которой закрепляются также электрооборудование и системы автоматического контроля.

В соответствии с конструкцией механизма пластикации и впрыска все литьевые машины подразделяют на машины с червячной и поршневой пластикацией расплава.

Наибольшее распространение получили машины с червячной пластикацией расплава (рис. 2.5.1). Червяк *6*, вращаясь от привода *3* (обычно в качестве движителя используется высокомоментный гидродвигатель), захватывает из бункера *1* перерабатываемый ПМ и перемещает его в переднюю часть материального цилиндра *7*, установленного на корпусе *5*. Продвигаясь по материальному цилиндру, ПМ нагревается, переходит в вязкотекучее состояние и пластицируется. По мере накопления расплава в передней части материального цилиндра создается давление, под действием которого червяк *6* вместе с гидравлическим поршнем *4* начинает отходить вправо. После того как в передней части материального цилиндра наберется необходимая доза материала, механизм запирания формы (например, гидроцилиндр *11* с поршнем *10*) перемещает вправо подвижную плиту *9* и смыкает полуформы *12*. Затем весь механизм пластикации и впрыска специальным устройством подводится к правой полуформе. В гидроцилиндре *2* создается давление рабочей жидкости и поршень *4* обеспечивает осевое перемещение червяка *6* влево. Доза расплава, накопившаяся при предварительной пластикации перед червяком, впрыскивается в литьевую форму. Затем осуществляется выдержка материала под давлением, а после ее окончания одновременно проводятся две технологические операции: охлаждение

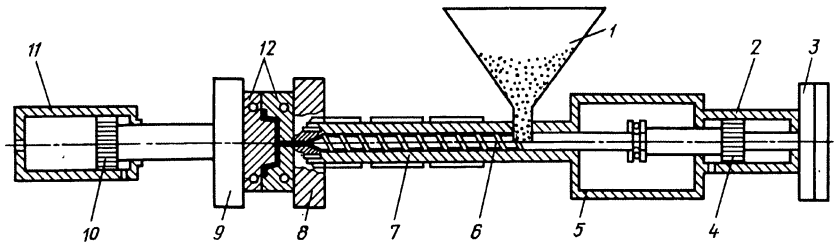


Рис. 2.5.1. Схема литьевой машины с червячной пластикацией расплава

детали в сомкнутой форме и подготовка следующей дозы расплава полимера в материальном цилиндре *7*. При этом механизм пластикации и впрыска обычно отводится от формы. После окончания процесса охлаждения детали механизм запирания формы отводит подвижную плиту *9*, неподвижная плита *8* остается на месте и полуформы *12* размыкаются, готовое изделие сбрасывается на специальный лоток или подхватывается манипулятором, которым все чаще комплектуются современные литьевые машины. После этого деталь направляется либо на упаковку, либо, если это требуется, на дополнительную механическую обработку. Цикл работы машины повторяется.

Литьевые машины с поршневой пластикацией расплава (рис. 2.5.2) применяются гораздо реже. Они используются, например, для производства деталей с большим содержанием абразивных наполнителей. Работа этих машин начинается со смыкания с помощью гидроцилиндра *11* и поршня *10* полуформ *12*. Далее дозатор *2* подает перерабатываемый полимер из бункера *1* в загрузочное отверстие *14*. После этого создается давление рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра *4*, поршень *5* сдвигается влево и вовлекает в движение литьевой поршень *6*. При этом полимерный материал проталкивается в материальный цилиндр, установленный на корпусе *3*. Продолжая двигаться, литьевой поршень перемещает материал через обогреваемое пространство между стенками цилиндра *7* и торпеды-рассекателя *13*. Движение поршня *6* заканчивается лишь после заполнения формующей полости, образованной сомкнутыми полуформами *12*. После выдержки формуемой детали под давлением рабочая жидкость подается в штоковую полость гидроцилиндра *4*, поршень *6* отходит в исходное положение. После окончания процесса охлаждения детали цикл работы машины заканчивается размыканием полуформ *12*, установленных на подвижной *9* и неподвижной *8* плитах, и выталкиванием готовой детали из формы.

По расположению механизмов пластикации и впрыска и запирания формы литьевые машины разделяют на горизонтальные, вертикальные, угловые и комбинированные. Наиболее распространены машины горизонтального типа, у которых оси механизмов пластикации и впрыска и запирания формы расположены горизонтально. Это объясняется в первую очередь удобством их обслуживания. При производстве сложных армированных деталей предпочтение отдается машинам вертикального типа, на которых благодаря горизонтальной плоскости разъема формы существенно упро-

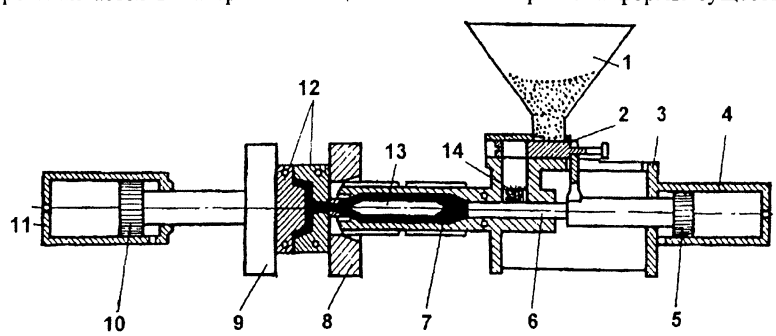


Рис 2.5.2. Схема литьевой машины с поршневой пластикацией расплава

щается установка армирующих элементов. Однако для съема деталей с вертикальных машин приходится применять дополнительные устройства для съема готовых деталей. Угловые литьевые машины выпускаются как с горизонтальной, так и с вертикальной компоновкой механизмов пластикации и впрыска и запирания формы под прямым углом. Угловые машины часто используются, если при изготовлении крупногабаритных деталей требуется осуществить впрыск расплава не в центральную, а в периферийную часть детали.

Наиболее важными техническими характеристиками литьевых машин являются: усилие запирания формы, максимальный объем впрыскиваемого за один цикл материала, пластикационная производительность, ход подвижной плиты, максимальные размеры устанавливаемых форм, максимальное давление литья и удельные энергозатраты на единицу готовой продукции.

Все литьевые машины принято подразделять по виду привода на механические, гидравлические и гидромеханические.

Так как для получения оптимальной производительности при переработке различных видов полимерных материалов требуется бесступенчатое регулирование частоты вращения червяка механизма пластикации и впрыска, то для привода его во вращение обычно используются гидравлические двигатели. В приводе машин, рассчитанных на большой объем впрыскиваемого материала, ряд фирм использует электродвигатели постоянного тока, оснащенные схемами регулирования и стабилизации частоты вращения, а также коллекторные двигатели переменного тока с бесступенчатым изменением частоты вращения.

Ступенчатое регулирование частоты вращения червяка используется очень редко – только в специализированных машинах, рассчитанных на обработку определенного вида полимерного сырья.

В большинстве литьевых машин применяется гидравлический привод осевого перемещения червяка или литьевого поршня (см. рис. 2.5.1 и 2.5.2). Исключение могут составлять машины, рассчитанные на малые объемы впрыска материала. В этих машинах часто используется электромеханический привод осевого перемещения червяка или литьевого поршня.

Механизм пластикации и впрыска часто выполняется подвижным для возможности его перемещения в технологическом цикле, для смены сопла, очистки литниковой втулки и т.д. Для перемещения узла в этом случае используются специальные гидроцилиндры. Если узел пластикации и впрыска выполняется неподвижным, то для отрыва литника используется подпружиненная неподвижная плита механизма запирания формы (в этом случае она называется "условно неподвижная").

В термопластавтоматах с механизмами пластикации и впрыска червячного типа может быть использовано несколько видов червяков. Они условно делятся на следующие группы:

группа I. Червяки для материалов с широким температурным интервалом вязкотекучего состояния. Их длина L составляет 11...15 диаметров D. Степень сжатия этих червяков составляют 2,5...3;

группа II. Червяки для материалов с низкой термостабильностью с широким температурным интервалом вязкотекучего состояния. Отношение их длины к диаметру обычно составляет L/D = 15...18. Степень сжатия у этих червяков от 1,5 до 2;

группа III. Червяки для высококристаллических материалов. У них отношение длины к диаметру такое же, как и у предыдущей группы, а степень сжатия от 2,5 до 3.

В реактопластавтоматах с механизмами пластикации и впрыска червячного типа используются червяки с малой степенью сжатия (0,8...1,0), т.е. нарезка червяков выполняется с постоянной или даже возрастающей к концу червяка глубиной. Конец червяка выполняется в виде конуса, который часто оснащается ножевыми лопастями, почти касающимися сопловой части цилиндра и предотвращающими застой способного к отверждению реактопласта. Отношение длины этих червяков к диаметру находится пределах L/D = 12...16.

Наконечники червяков литьевых машин выполняются как съемными, так и стационарными, и их конструкция зависит от абсолютного размера червяка, технологических свойств перерабатываемого материала, наличия или отсутствия системы термостатирования червяка.

Чтобы предотвратить обратные потоки расплава при использовании червяков в качестве поршня для впрыска, на конце червяков термопластавтоматов устанавливаются специальные клапанные устройства. Наибольшее распространение получили клапанные устройства в виде колец, располагаемых между нако-

нечником червяка и окончанием его зоны дозирования. При впрыске этот клапан перемещается в сторону нарезки червяка и перекрывает пространство канала нарезки для обратного потока расплава. Несколько менее распространены клапаны шарового типа. В момент впрыска шарик клапана прижимается к его седлу и предотвращает обратный поток расплава. В некоторых случаях, при обработке термопластов средней вязкости, клапанное устройство отсутствует. В этом случае используется специальный наконечник червяка с уменьшенным в 2 раза шагом нарезки. Поток утечки при впрыске в этом случае отсутствует из-за большого гидравлического сопротивления, оказываемого нарезкой на наконечнике червяка.

В реактопластавтоматах клапанные устройства не применяются, так как в них термореактивный ПМ может застаиваться и преждевременно отверждаться.

Сопла всех литьевых машин принципиально делятся на два вида. Сопла открытого типа, применяемые для литья ПМ с высокой вязкостью, и сопла закрытого типа, предназначаемые для литья низковязких материалов. Последние снабжаются клапанными устройствами, обеспечивающими закрытие сопла в процессе пластикации ПМ и набора дозы и открытия сопла во время впрыска и выдержки отливки под давлением. При литье реактопластов применяются сопла открытого типа.

Механизм запирания форм обеспечивает открытие и закрытие литьевой формы, а также ее удержание в сомкнутом состоянии при впрыске расплава ПМ и формовании детали. Основной характеристикой этих узлов является усилие смыкания и жесткость конструкции, обеспечивающие получение деталей с требуемыми размерными характеристиками.

Кинематика и конструктивные размеры механизма смыкания формы литьевой машины не зависят от направления разъема плиты – вертикального или горизонтального, а определяются требуемой быстроходностью машины, технологическими параметрами процесса и геометрическими характеристиками детали. Для увеличения быстроходности машины скорость смыкания и размыкания плит должна быть максимальной, причем с целью предотвращения повреждения плиты при закрытии формы скорость смыкания в конце хода должна снижаться.

В мировой практике разработано и применяется большое число различных механизмов запирания, которые можно разделить на две группы: простые и комбинированные. В простых конструкциях механизмы перемещения плит и запирания формы совмещены, в комбинированных перемещение плиты осуществляется одним механизмом, а другой создает необходимое усилие запирания формы.

По виду привода простые и комбинированные конструкции подразделяются на гидравлические, гидромеханические и механические.

Пневматические и пневмомеханические в настоящее время встречаются очень редко из-за низкой величины развиваемых усилий. В литьевых машинах с малым объемом впрыска иногда используются механические узлы запирания ввиду их высокой быстроходности и малой энергоемкости. Наиболее широкое распространение получили гидравлические и гидромеханические конструкции.

Гидравлические и пневматические конструкции относятся к механизмам силового запирания, в которых усилие запирания является внешним по отношению к самому механизму. Гидромеханические, пневмомеханические и механические устройства являются механизмами кинематического запирания. В механизмах этого типа усилие запирания развивается за счет упругой деформации звеньев, создаваемой приводом. После прекращения действия силы, развиваемой ведущим звеном механизма, необходимое усилие запирания сохраняется в виде внутренней силы, являющейся результатом упругой деформации.

Наиболее распространены среди гидромеханических механизмов запирания формы конструкции с симметричным или сдвоенным коленчато-рычажным узлом, конструкции с коленчато-рычажным механизмом и неподвижным гидроцилиндром смыкания, а также с коленчато-рычажным механизмом и подвижным гидроцилиндром смыкания.

Для коленчато-рычажных механизмов с неподвижным гидроцилиндром смыкания характерна возможность реализации минимального хода раскрытия литьевых форм. Важными показателями для них являются: отношение максимальной скорости $v_р$ размыкания к максимальной скорости $v_с$ смыкания $(v_р/v_с \approx 2)$ и отношение минимального усилия $F_р$ размыкания к минимализму усилию $F_с$ смыкания $(F_р/F_с \approx 0{,}5)$.

Механизмы смыкания с коленчато-рычажным узлом и подвижным гидроцилиндром смыкания обладают тем преимуществом, что для реализации того же пути запирания может быть использован меньший гидравлический цилиндр, чем в механизмах с неподвижным гидроцилиндром.

Для системы запирания с симметричным или сдвоенным коленчато-рычажным узлом необходимо гидравлический цилиндр запирания располагать в направлении оси машины. Путь смыкания в этом случае не ограничивается высотой машины. Такие системы обычно используются в больших литьевых машинах. Отношение скоростей смыкания и размыкания при использовании рычажной системы с симметричным или сдвоенным коленчато-рычажным узлом по сравнению с применением простого коленчато-рычажного механизма в направлении раскрытия формы является величиной переменной. Оно проходит через максимум и в конце раскрытия формы достигает минимума. Так как изменение отношения усилий размыкания и смыкания носит обратный характер, то к началу процесса смыкания наблюдаются большие ускорения.

Коленчато-рычажные механизмы смыкания потребляют на 15...20 % меньше энергии и рабочей жидкости по сравнению с гидравлическими механизмами. Их недостатком является интенсивная изнашиваемость шарнирных соединений и плохая воспроизводимость усилий смыкания. Первый из указанных недостатков может быть частично устранен путем применения централизованной смазки; для улучшения же воспроизводимости установленных усилий смыкания используют регулирование давления жидкости в гидроцилиндре механизма смыкания.

Гидравлический механизм смыкания создает наиболее благоприятные предпосылки для регулирования усилий смыкания. В этих механизмах обеспечивается исключение перегрузки или деформации колонн в процессе впрыска. Недостатком гидравлических механизмов запирания является большой расход рабочей жидкости при смыкании и размыкании фор.

В отличие от гидромеханических механизмов смыкания при использовании гидравлических механизмов требуются более высокие затраты на системы гидравлического и электрического управления.

Все современные литьевые машины снабжены системами управления на базе микропроцессоров.

Современной тенденцией в развитии литьевых машин является установка на них роботов-манипуляторов. Этими манипуляторами комплектуются машины, предназначенные для производства больших серий деталей. Манипуляторы обеспечивают, например, закладку в форму арматуры, нанесение на них рисунков и надписей, съем готовых деталей, их упаковку и тому подобные вспомогательные операции.

Устройство манипуляторов рассчитано на обработку какой-либо одной детали. Обычно это детали автомобилей, детали электротехнического назначения, элементы тары и упаковки и др., то есть деталей, выпускаемых в таком количестве, которое позволяет окупить затраты на изготовление и эксплуатацию соответствующего манипулятора. Система управления манипулятором интегрируется в систему управления литьевой машиной.

2.5.1.2. ПРЕССОВАНИЕ

Прессование деталей из реактопластов осуществляется на прессах различных типов. По виду привода прессы для ПМ делят на механические, гидромеханические и гидравлические. По расположению рабочих органов прессы могут быть вертикальными, горизонтальными и угловыми.

Основным параметром характеристики пресса является его номинальное усилие.

Механические прессы бывают винтовые, коленчато-рычажные, эксцентриковые, ротационные и др. Эти прессы целесообразно применять для изготовления мелких деталей при высоких скоростях прессования, коротких выдержках и небольших усилиях прессования. При передаче больших усилий рабочие органы механических прессов становятся более громоздкими и металлоемкими, чем у гидравлических прессов. В промышленности производства деталей из ПМ механические прессы нашли наибольшее применение для таблетирования пресс-материалов, а также в некоторых конструкциях пресс-автоматов.

Гидромеханические прессы обладают определенными преимуществами в сравнении с гидравлическими, так как кинематика механизма обеспечивает уменьшение скорости движения плит при смыкании форм. Кроме

этого они дают возможность получать большие усилия смыкания при небольших усилиях, создаваемых на поршне гидроцилиндра.

Гидравлические прессы имеют ряд преимуществ по сравнению с механическими и гидромеханическими прессами: возможность определять и в широких пределах регулировать усилие прессования, возможность регулирования величины и скорости рабочего и холостого ходов, легкость осуществления выдержек под давлением и простота их регулирования, независимость усилия прессования от хода пресса. В настоящее время гидравлические прессы наиболее часто применяют при производстве деталей из реактопластов.

Основными частями гидравлического пресса являются: станина, рабочие, возвратные и выталкивающие цилиндры и плунжеры, подвижные и неподвижные плиты, гидропривод и система автоматического управления.

По типу станины прессы делят на колонные, рамные и челюстные. Колонные прессы бывают двух-, четырех- и многоколонными. Рамные и челюстные прессы также могут быть двух- и многостоечными, при этом каждая из стоек вырезается из листового стального проката.

На рис. 2.5.3 приведена схема гидравлического рамного пресса-полуавтомата с верхним расположением главного цилиндра. Он состоит из станины *3*, в верхнюю поперечину которой встроен главный цилиндр *4*. На днище главного цилиндра установлены бак *6* и клапан наполнения *5*. Обратный ход рабочей плиты *2* осуществляется при помощи двух возвратных цилиндров, расположенных в левой и правой нишах станины. Неподвижная нижняя плита *1* закреплена на раме пресса.

Такая конструкция наиболее целесообразна с точки зрения техники безопасности, так как даже при отрыве рабочей плиты от плунжера она не падает, а лежит своими приливами на возвратных плунжерах.

В нижней поперечине монтируется выталкивающий цилиндр *9* с механизмом конечных выключателей. Вся электроаппаратура пресса размещается в шкафу *7*. Гидроагрегат *8* приводится в действие электродвигателем. Ход подвижной плиты *2* регулируется при помощи механизма конечных выключателей.

Челюстные прессы применяются тогда, когда необходим доступ к пресс-форме с трех сторон.

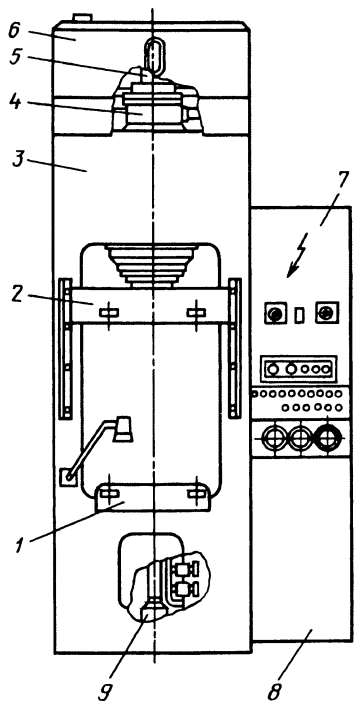


Рис. 2.5.3. Схема гидравлического пресса

В зависимости от расположения рабочих цилиндров гидравлические прессы делят на прессы с верхним рабочим цилиндром, которые нашли преимущественное применение для обработки термореактивных ПМ, и прессы с нижним рабочим цилиндром, которые применяют в основном для прессования слоистых ПМ (этажные прессы).

В соответствии с ГОСТ 8200 гидравлические прессы, предназначенные для прессования деталей из ПМ, выпускают с номинальным усилием, кН: 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000, 6300. Для каждого из этих типоразмеров ГОСТом регламентируются следующие параметры: ход подвижной плиты; наибольшее расстояние между неподвижной и подвижной плитами пресса; размеры стола; номинальное усилие и ход выталкивателя; скорость подвижной плиты при холостом, рабочем и возвратном ходах; скорость выталкивателя при движении вверх.

В конструкции прессов для прессования деталей из ПМ предусматриваются: автоматическая регулировка температуры нагрева пресс-форм, автоматическое уменьшение скорости холостого хода ползуна перед рабочим

ходом, устройства, обеспечивающие безопасность работы.

Станина воспринимает полное рабочее усилие пресса, а на фундамент передается масса пресса, а также вибрации и динамические нагрузки. Станина колонного пресса состоит из нижней и верхней неподвижных поперечин, связанных между собой колоннами. Станины рамных и челюстных прессов изготовляют сварными из стального листа и проката.

Для обеспечения строгой перпендикулярности направления хода рабочего и выталкивающих плунжеров к поверхности неподвижного стола, при обработке сварной станины пресс устанавливается в горизонтальное положение на столе двухшпиндельного фрезерного станка. В качестве базовой поверхности принимается неподвижная плита пресса. Посадочные поверхности для установки главного и выталкивающих цилиндров обрабатываются одновременно.

Гидроцилиндры являются одними из наиболее ответственных узлов прессов. В качестве главных гидроцилиндров в прессах для обработки ПМ используются цилиндры как плунжерного, так и поршневого типа. Однако в последнее время предпочтение отдается плунжерным гидроцилиндрам. В качестве цилиндров выталкивания используются в основном поршневые конструкции. Цилиндры подъема верхней подвижной плиты, как правило, плунжерного типа. Цилиндр работает в сложных условиях нагружения, характер которого зависит не только от условий работы и конструкции самого цилиндра, но и от конструкции сопряженных деталей. Конструкцию цилиндра выбирают в зависимости от требуемого усилия, создаваемого прессом, условий его работы, давления рабочей жидкости, технологических возможностей завода-изготовителя, свойств используемого материала.

Литые стальные цилиндры применяют при давлениях рабочей жидкости не более 32 МПа. Кованые цилиндры изготовляют из углеродистых или низколегированных сталей. Цилиндры могут быть глухими или сквозными. Днище сквозного цилиндра изготовляют отдельно; его крепят на резьбе, кольцевой шпонкой или на болтах, сваркой или запрессовкой.

Подвижные и неподвижные плиты изготовляют литыми из стали или чугуна или сварными из стального листа. Плунжер или шток поршня главного гидроцилиндра жестко скрепляется с подвижной плитой болтами, фланцами на резьбе, кольцевыми шпонками с накидными фланцами. На строганой рабочей поверхности верхнего и нижнего стола изготовляют пазы для крепления пресс-форм.

Для изготовления деталей из реактопластов, выпускаемых крупными партиями, используются прессовые автоматические линии различных конструкций, которые можно классифицировать по следующим признакам:

по виду привода: механические, гидромеханические, гидравлические;

по числу позиций: одно-, двух-, трех-, четырех- и многопозиционные;

по числу выполняемых операций: однооперационные – прессование; двухоперационные – таблетирование и прессование либо подогрев и прессование; трехоперационные – таблетирование, подогрев, прессование; четырехоперационные – таблетирование, подогрев, прессование, механическая обработка; многооперационные – те же операции, что и у четырехоперационных и дополнительные: сборка, контроль, упаковка и др.;

по конструктивным особенностям: прессы-автоматы с шиберной (кассетной) загрузкой; прессовые линии с выносными пресс-формами; прессы-автоматы с промышленными роботами (манипуляторами); прессы-автоматы с червячной пластикацией; прессы-автоматы револьверного типа; роторные линии; роторно-цепные линии и т.д.;

по методу предварительного нагрева и пластикации: без предварительного подогрева; с низкотемпературным нагревом; с предварительным нагревом ТВЧ; с червячной пластикацией.

Основой пресс-автомата шиберного типа является описанный выше гидравлический пресс-полуавтомат с верхним расположением рабочего цилиндра, оснащенный устройством для загрузки пресс-материала в пресс-форму и механизмом для съема отпрессованной детали. Эти прессы могут быть как рамного, так и колонного типа. Иногда их снабжают весовыми устройствами для контроля за полным удалением деталей из пресс-формы. Механизм загрузки состоит из неподвижного бункера, закрепленного на станине пресса, и дозировочной плиты, расположенной под бункером. Плита перемещается в направляющих при помощи гидро- или пневмоцилиндров. В плите

имеются цилиндрические гнезда, закрытые снизу шибером. При этом расположение в плите гнезд должно строго соответствовать расположению гнезд в пресс-форме.

При перемещении плиты в положение над пресс-формой шибер останавливается с помощью неподвижного упора и пресс-порошок просыпается в матрицу. При необходимости изменять навеску в плите устанавливаются сменные втулки, внутренний объем которых соответствует нужной дозе. Для предупреждения зависания пресс-порошка в гнездах плиту снабжают электромагнитным или механическим вибратором.

Если при прессовании детали остаются в матрице, то автомат производит их выталкивание при помощи нижнего выталкивающего цилиндра, при этом детали остаются на выталкивателях пресс-формы. Для удаления деталей из пространства между плитами пресса вилка механизма съема перемещается и останавливается под вытолкнутыми изделиями. Выталкиватели пресс-формы опускаются, и детали остаются на вилке. Вилка отходит и сбрасывает детали в емкость или на ленту транспортера.

При работе с пресс-формой, в которой деталь остается на пуансоне, съемное устройство должно иметь лоток, расположенный под гребенкой. По окончании разъема пресса лоток съемного устройства перемещается и устанавливается над матрицей. Выталкивающая система сбрасывает деталь на лоток. В тех случаях, когда детали остаются на выталкивающих стержнях, гребенка перемещается и встает между деталями и пуансоном. Выталкиватели поднимаются, и гребень сталкивает детали в лоток.

Обычно шиберные прессы-автоматы работают на неподогретом порошке (однопозиционные), но есть конструкции, в которых осуществляется низкотемпературный предварительный подогрев (двухоперационные). В этом случае между бункером и дозирующей плитой устанавливается приспособление для подогрева пресс-порошка с помощью инфракрасных ламп. Пресс-порошок подогревается до температуры 55...60 °С, что не вызывает его прилипания или преждевременного отверждения, но несколько ускоряет процесс нагрева в пресс-форме.

На автоматизированных линиях для прессования деталей из реактопластов обрабатывают фенопласты, аминопласты, волокнистые и стекловолокнистые пресс-материалы, поступающие на линию как в таблетированном, так и в нетаблетированном виде.

На линии можно изготовлять детали прямым или литьевым прессованием. Применение данных линий наиболее целесообразно при прессовании толстостенных деталей, когда требуется длительное время отверждения.

Линия состоит из горизонтального замкнутого шагового конвейера, по которому с определенным темпом перемещаются пресс-формы. На одной из ветвей конвейера установлены два гидравлических пресса. На одном из них происходит раскрытие пресс-формы, а второй пресс закрывает их. В зависимости от конфигурации детали и сложности их армирования могут использоваться челюстные прессы или обычные колонные или рамные. Кроме того, на линии, на участке между этими двумя гидравлическими прессами, установлены механизмы, служащие для автоматизации съема отпрессованных деталей, очистки пресс-формы, установки арматуры, загрузки пресс-материала. Для автоматизации этих операций используются манипуляторы. Пресс-формы, закрытые вторым прессом, совершают путь по шаговому конвейеру к первому прессу за время, необходимое для отверждения материала деталей.

Выдержка материала при заданной температуре и давлении осуществляется в пресс-формах, находящихся на конвейере вне рабочей зоны основного прессующего оборудования, что резко повышает производительность линии. Для запирания форм применяют рычажные, клиновые и байонетные замковые устройства. К недостаткам подобных линий можно отнести высокую стоимость изготовления пресс-форм с запирающим устройством.

Прессы-автоматы с промышленными роботами (манипуляторами) могут иметь различную конфигурацию и создаваться на базе одного, двух или нескольких прессов. Однопрессовая линия состоит из пресса, устройства для подогрева таблеток, манипулятора с двумя схватами, устройства для механической обработки и конвейера для транспортировки готовых деталей в тару. Один схват манипулятора служит для подачи нагретой таблетки в пресс, а второй – для передачи отпрессованной детали на обработку. После снятия заусенцев готовая деталь сбрасывается на конвейер.

Комплекс, состоящий из двух гидравлических прессов, включает в себя также промышленный робот, генератор ТВЧ, пневматический цилиндр для выдвижения лотка, лот-

ков для подачи таблеток, вертикального пневматического цилиндра для переноса таблеток с лотков на поддон, лотка для транспортировки готовых деталей в емкость или на транспортер. Комплекс рассчитан на прессование на обоих прессах одинаковых деталей или деталей одинаковой массы с одинаковым циклом прессования.

При установившемся процессе прессования, когда на первом из гидравлических прессов закончился цикл прессования, пресс размыкается, отпрессованная деталь выталкивается и остается на шпильках выталкивающей системы. "Рука" манипулятора входит в рабочее пространство первого пресса. Схваты сжимаются, обхватывая деталь. Колонна, несущая руку, поднимается вверх, при этом деталь снимается с выталкивающих шпилек. "Рука" поворачивается на 90° вокруг вертикальной оси. Колонна опускается. Схват разнимается, и деталь падает на лоток. Схват поворачивается вокруг своей оси на 180° (схват обеспечивает два усилия: мягкое – для таблеток и более жесткое – для отпрессованных деталей). "Рука" идет вперед к генератору ТВЧ. Схваты сжимаются, захватывая нагретые таблетки. Колонна поднимается вверх, снимая таблетки с поддона. "Рука" отводится назад и поворачивается на 90° по часовой стрелке. Затем она выдвигается вперед в рабочее пространство пресса. Захваты разжимаются, таблетки падают в пресс-форму, "рука" возвращается назад, поворачивается на 180° и останавливается около первого пресса.

По окончании прессования во втором прессе он размыкается и происходит его обслуживание, аналогичное описанному.

При использовании роботизированных комплексов, обрабатывающих полуфабрикаты в виде таблеток, необходимо предъявлять повышенные требования к точности массы, размерам и плотности таблеток. Допустимое отклонение массы таблетки – не более 3 %. Плотность таблетки должна соответствовать такой прочности, которая исключает ее разрушение при транспортировке и зажиме схватами.

Альтернативным вариантом создания пресса-автомата на базе прессов-полуавтоматов является использование червячных пластикаторов.

Червячные пластикационные приставки по конструкции аналогичны узлу впрыска литьевой машины. Приставку устанавливают на отдельном фундаменте за прессом и крепят к нему тягами. Пресс-порошок из бункера поступает в материальный цилиндр, в котором расположен однозаходный червяк, совершающий вращательное и возвратно-поступательное движения. Материал пластицируется и накапливается в головной части цилиндра; при этом червяк отходит назад. При помощи вспомогательного цилиндра узел впрыска подводится к замкнутой пресс-форме. Гидравлический цилиндр впрыска соединяется с магистралью высокого давления, плунжер перемещает червяк в осевом направлении, и в материальном цилиндре создается давление, необходимое для впрыска (до 150 МПа).

Револьверные прессы – это многопозиционные машины, состоящие из ряда прессующих элементов, расположенных по окружности на барабане. Барабан совершает циклическое вращательное движение, перемещая очередной прессующий элемент к неподвижным обслуживающим механизмам (загрузочным, съемным, установки арматуры). Как и на всех прессах для реактопластов, цикл прессования состоит из времени загрузки пресс-материала, смыкания пресс-формы, выдержки под давлением, размыкания, съема детали. Кроме того, могут быть операции подпрессовок и установки арматуры. За время выдержки материала в пресс-форме при заданной температуре и давлении должен пройти процесс отверждения. Это время, как правило, значительно больше, чем время, необходимое на загрузку материала в пресс-форму и на съем готовой детали. Поэтому целесообразно иметь многопозиционный пресс, обслуживаемый одним загрузочным и одним съемным устройствами. Многопозиционные прессы имеют высокую производительность и легче поддаются полной автоматизации, чем однопозиционные. Вращение ротора пульсирующее, при этом ротор поворачивается на угол $\alpha = 360^\circ/n$, где n – число позиций или пресс-элементов. Каждый из пресс-элементов может быть оборудован своим самостоятельным силовым цилиндром.

На револьверных прессах обычно устанавливают одногнездные или малогнездные пресс-формы. При применении таких пресс-форм снижается необходимое давление прессования, создается более равномерное температурное поле в пресс-форме, облегчается ее нагрев и контроль температуры. Многие кон-

струкции револьверных прессов позволяют прессовать детали с резьбой и свинчивать их в автоматическом режиме. В зависимости от конструкции питателя на револьверных прессах могут использоваться гранулированный пресс-материал, таблетки или заготовки, полученные на червячных пластикаторах.

Одним из средств комплексной автоматизации прессования ПМ являются роторные линии. Отличительная особенность роторной линии – наличие нескольких синхронно вращающихся роторов. Каждый ротор представляет собой многопозиционную машину, предназначенную для осуществления какой-либо одной технологической или транспортной операции. Роторы вращаются непрерывно. На каждой из позиций ротора установлен комплект рабочего инструмента, который вращается вместе с ротором и обрабатываемым материалом и одновременно с вращением выполняет необходимые рабочие операции. За один оборот ротора на каждой рабочей позиции осуществляется технологическая обработка одной детали.

Для операций, требующих большой продолжительности, применение роторных машин ограничивается ростом диаметральных размеров роторов. Неоправданно большие размеры ротора могут получаться также при увеличении производительности. С увеличением диаметра ротора возрастает его стоимость на единицу продукции, ухудшается использование площади ротора, так как рабочие органы расположены по периметру, а средняя его часть не используется.

В роторных машинах шаговое расстояние между позициями определяется не размерами пресс-форм в направлении потока, а габаритными размерами исполнительных органов (гидравлических цилиндров), сообщающих инструменту рабочее движение и создающих необходимое усилие прессования.

Для роторных машин характерна неполнота использования исполнительных органов и, следовательно, их завышенное число. Это обусловлено тем, что исполнительные органы, будучи постоянно связаны с инструментом, сопровождают их не только на тех участках пути, где они выполняют свои функции, но и там, где они бездействуют и, следовательно, могли бы отсутствовать.

Развитой формой роторных машин являются роторно-конвейерные линии, которые отличаются отделением инструмента от исполнительных органов. В этих машинах инструмент монтируется на гибких цепных конвейерах, огибающих в заданной последовательности рабочие роторы, на которых находятся исполнительные механизмы, например, силовые гидравлические цилиндры. Отделение инструмента от исполнительных органов обусловливает повышение производительности, возможность автоматизации функций обслуживания инструмента, сокращение числа и уменьшение размеров исполнительных органов, радиальных и осевых размеров роторов и величин рабочих ходов инструмента. Все это приводит к резкому сокращению стоимости оборудования на единицу выпускаемой продукции.

2.5.1.3. ТЕРМОФОРМОВАНИЕ

Изготовление объемных деталей из листовых и пленочных термопластичных заготовок осуществляется на термоформовочных машинах. Основным параметром этих машин принято считать максимальный размер их зажимных устройств и наибольшую глубину формования.

Все выпускаемые машины классифицируются: по методу формования; по виду управления; по назначению; по числу позиций; по траектории движения перерабатываемого материала; по комплектации; по виду заготовок или организации питания.

Метод формования определяет вид рабочего тела для создания давления, обеспечивающего формоизменение листового или пленочного материала. В соответствии с этим машины снабжаются либо вакуумной системой (вакуумформовочные машины), создающей разрежение в формующей камере, либо пневмосистемой (пневмоформовочные машины), обеспечивающей избыточное давление сжатого воздуха над формуемой заготовкой, либо системой для создания механического давления на заготовку. И, наконец, имеется большое разнообразие машин, снабженных одновременно несколькими видами приводов и обеспечивающих комбинированное воздействие на формуемую пленочную или листовую заготовку. Наиболее распространенными из них являются пневмовакуумформовочные машины, сочетающие пневмо- и вакуумные системы.

По виду управления термоформовочные машины подразделяют на машины с ручным

управлением – для изготовления единичных образцов и мелких серий деталей, машины с полуавтоматическим управлением – для мелких и средних серий деталей, для деталей больших габаритных размеров или сложной формы, требующих ручного съема, машины с автоматическим управлением – для крупных серий однотипных деталей.

По назначению машины классифицируются на универсальные – для производства широкого ассортимента деталей всевозможных габаритных размеров мелкими сериями, специализированные – для больших серий деталей узкой номенклатуры из определенного термопласта, комбинированные – для больших и средних серий деталей, изменение номенклатуры которых требует существенной переналадки машины.

По числу позиций термоформовочные машины делятся на однопозиционные, у которых все операции, связанные с производством детали, осуществляются на одной позиции; на многопозиционные машины с позициями разного назначения, у которых на каждой позиции происходят присущие только этой позиции операции (нагрев заготовки, формование, охлаждение детали, ее съем и т.д.); на многопозиционные машины с однородными позициями, у которых одни и те же операции производятся одновременно на нескольких позициях (обычно двух или трех).

В свою очередь многопозиционные машины с позициями разного назначения бывают карусельного типа, которые обычно предназначаются для производства крупногабаритных деталей из толстолистовых мерных заготовок, барабанного типа для обработки пленочных или тонколистовых рулонных материалов и ленточного типа для обработки тонколистовых рулонных материалов в детали небольших и средних размеров.

По виду заготовок или организации питания машины могут быть для формования заготовок определенного размера (мерных заготовок). Для применения этих машин требуется организация участка раскроя и резки заготовок, а для работы этих машин в автоматическом режиме требуются устройства для подачи и закрепления заготовок, а также съема готовых деталей. В случае применения машин для формования рулонных материалов не требуется раскрой и резка заготовок, но обязательной операцией является вырубка готовых деталей. Агрегаты для питания непосредственно от каландра или экструдера создаются на базе специализированных машин для производства крупных серий деталей.

В зависимости от комплектации термоформовочное оборудование может включать в себя в различных сочетаниях следующие устройства: вырубные, сварочные, для заполнения отформованной тары, для нанесения печати на детали для автоматической подачи и закрепления заготовок, для съема, ориентации и упаковки готовых деталей, для дробления отходов и т.д.

В машинах с ручным управлением сигналы на выполнение всех операций подаются оператором формовочной машины. Вручную осуществляют укладку заготовок и съем готовых деталей.

В полуавтоматических машинах вручную укладывают лист и извлекают отформованную деталь. Все остальные операции осуществляются автоматически по заранее заданному режиму. Система контроля и регулирования состоит из микровыключателей, терморегулятора нагревателя, электромагнитных клапанов, работающих совместно с реле времени, управляющими продолжительностью всего рабочего цикла: нагрева листа, формования детали и ее охлаждения. Цепи систем управления взаимно сблокированы так, что каждая последующая операция не может быть начата до окончания предшествующей.

На автоматических машинах все операции, включая установку заготовки и съем готовой детали, синхронизированы и производятся автоматически, без вмешательства формовщика.

Машины, предназначенные для питания отдельными заготовками, работают, как правило, в ручном или полуавтоматическом режиме. Машины, питающиеся рулонным материалом, обычно автоматические. Машины, питаемые с вальцов или экструдера, входят обычно в состав автоматической линии. Эта линия производит из гранулированного или порошкообразного материала лист или пленку, формует из них детали, а если это необходимо, то комплектует отформованные детали с другими деталями и упаковывает готовую продукцию.

Однопозиционными называют такие формовочные машины, на которых все технологические операции осуществляются на одном и том же участке агрегата. Обычно эти машины бывают универсальными с ручным или полуавтоматическим управлением.

Принципиальная схема однопозиционной вакуумформовочной машины с ручным управлением приведена на рис. 2.5.4. На станине *2* каркасного типа устанавливается матрица *1*. Над матрицей неподвижно смонтирована нижняя часть зажимной рамы *4*, на которой с помощью верхней подвижной рамы *3* укрепляется листовая заготовка *5*. Над заготовкой размещен нагреватель *6*, положение которого по высоте можно регулировать. Для удобства обслуживания при установке заготовки и съеме готовой детали нагреватель отводится в сторону.

Многие машины оснащаются часовыми механизмами, сигнализирующими об окончании времени нагрева.

У однопозиционных машин, предназначенных для вакуумного формования с предварительной механической вытяжкой верхним плунжером, а также у пневмоформовочных, механоформовочных и машин с комбинированными методами формования формующий инструмент точно центрируется и жестко закрепляется на столе формовочной камеры.

Однопозиционные машины питаются, как правило, листовыми мерными заготовками. Однако некоторые из этих машин оборудованы бабинодержателями, позволяющими закреплять в них рулонный материал. Протяжка рулонного материала осуществляется обычно вручную.

Однопозиционные машины могут быть оборудованы нагревателями различного типа: инфракрасными или конвекционными, односторонними или двухсторонними. При двухстороннем обогреве возможно два варианта взаимного перемещения заготовки и нагревателей: наиболее распространен вариант с подвижными нагревателями и неподвижной заготовкой, но встречаются конструкции, где неподвижным является нагреватель, а перемещается заготовка. Машины со вторым вариантом взаимного перемещения заготовки и нагревателя нельзя отнести к однопозиционным, так как в этом случае технологические операции происходят на двух позициях: на одной позиции – установка заготовки, формование, охлаждение и съем детали, на второй – нагрев заготовки. По приведенной выше классификации такие машины относят к многопозиционным с позициями различного назначения.

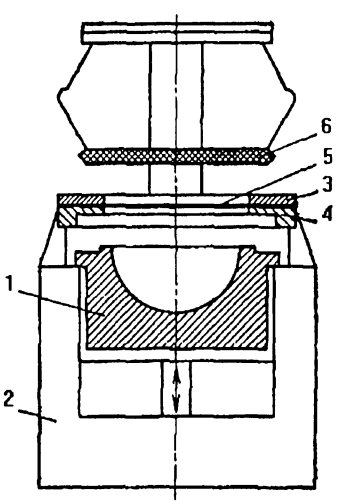


Рис. 2.5.4. Схема однопозиционной машины с ручным управлением

Встречаются однопозиционные машины, снабженные механизмом вырубки деталей.

Так как термопласты являются плохими проводниками теплоты, то время разогрева заготовок при формовании превышает иногда 75 % всего времени цикла. Для увеличения производительности оборудования выпускаются двухпозиционные пневмовакуумформовочные машины, снабженные двумя формующими устройствами и одним нагревателем. Нагреватель горизонтально перемещается от одного формующего устройства к другому, так что во время формования, охлаждения, съема изделия и закрепления заготовки можно осуществлять нагрев листа в другой позиции. Работа таких машин осуществляется, как правило, в полуавтоматическом режиме.

Одной из разновидностей двухпозиционных машин с однородными позициями являются так называемые сдвоенные машины. Эти машины имеют два нагревателя и две позиции формования. Однако вся машина обслуживается одной вакуум- или пневмосистемой, а также единой системой управления. Работа сдвоенных пневмо- или вакуумформовочных машин построена таким образом, чтобы цикл формования на отдельных позициях был сдвинут. Это позволяет экономичнее использовать привод машины и повышает производительность труда формовщика.

Многопозиционные машины с однородными позициями применяют только для обработки листового материала, так как тонкий рулонный материал нагревается сравнительно быстро и время его разогрева не перекрывает время закрепления заготовки, формования,

охлаждения и съема детали. Машины этого типа по назначению универсальны.

Многопозиционные машины с позициями различного назначения получили наибольшее распространение, что связано с высокой производительностью подобного рода машин и с возможностью осуществления на них полуавтоматического и автоматического циклов.

Для обработки толстолистовых материалов наибольшее распространение получили карусельные машины. Обрабатываемый листовой материал совершает круговое циклическое передвижение от позиции к позиции.

Простейшей машиной карусельного типа является двухпозиционная машина. На диаметрально противоположных сторонах вращающегося ротора закреплены две зажимные рамы. Пока на одной из ее позиций происходит формование детали, его охлаждение, съем и укладка новой заготовки, на второй позиции идет процесс нагрева листа.

Наибольшее распространение в промышленности получили трехпозиционные карусельные машины. Последние состоят из ротора с укрепленными на нем тремя зажимными рамами, формующей камеры, нагревателя и легкой станины. Заготовка закладывается в зажимную раму и зажимается. Через определенный момент времени ротор поворачивается на 120°, и заготовка попадает в следующую позицию, в которой происходит ее разогрев. Затем ротор поворачивается еще на 120°, и нагретая заготовка приходит на позицию, где происходит формование и охлаждение детали. При очередном повороте ротора отформованная заготовка попадает на первую позицию, где оператор снимает готовую деталь и закладывает новую заготовку.

Время между двумя поворотами ротора на 120° равно времени самого продолжительного процесса, происходящего на любой из позиций. Как показал опыт, разогрев заготовки идет примерно в 2 – 2,5 раза дольше, чем процессы, происходящие на остальных позициях. С учетом этого были созданы четырехпозиционные карусельные пневмовакуумформовочные машины. В этих машинах позиции нагрева разделены на две позиции – предварительного и окончательного нагрева.

Все машины карусельного типа работают в полуавтоматическом режиме и для работы с рулонными материалами не приспособлены. По назначению их можно отнести к машинам комбинированного типа – замена номенклатуры формуемых деталей этих машинах возможна в довольно широких пределах, но при переходе с одной детали на другую требуется существенная переналадка машины.

Многопозиционные машины ленточного типа предназначены либо для формования деталей из рулонированных материалов, либо для работы в линию с каландрами или экструзионными установками, производящими формуемый лист или пленку (рис. 2.5.5).

С механизма размотки лента термопласта попадает в зону двухстороннего нагрева, останавливается и находится там в течение определенного времени. Затем с помощью шагового или цепного механизма протяжки нагретый участок ленты попадает в узел формования, в котором происходит оформление деталей (обычно в многогнездной форме) и их охлаждение. Если при нагреве наблюдается излишнее провисание листа, то специально предусмотренное устройство, входящее в состав механизма протяжки, натягивает заготовку. После окончания процесса формовки матрица и пуансон разводятся с помощью пневмоцилиндров, а участок ленты вместе с отформованными в нем деталями попадает в механизм вырубки готовых деталей. После вырубки деталь попадает на ленту конвейера и оттуда в приемный бункер. Перфорированная лента термопласта либо сматывается в рулон механизмом намотки отводов, либо измельчается в специальном устройстве, как это показано на рис. 2.5.5.

Для получения малогабаритных деталей и рельефного рисунка на термопластичных пленках используются специальные ротационные машины барабанного типа. Схема такой машины приведена на рис. 2.5.6. Сматываемая с рулона пленка через систему направляющих валков попадает на формовочный барабан,

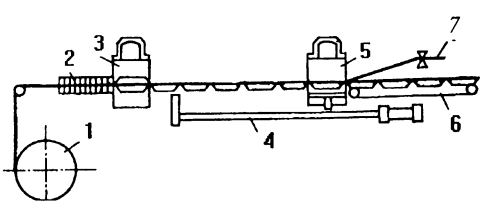


Рис. 2.5.5. Схема многопозиционной термоформовочной машины ленточного типа:
1 – рулонированный материал; *2* – нагреватель, *3* – позиция формования; *4* – механизм протяжки; *5* – позиция вырубки, *6* – конвейер для приема готовых изделий; *7* – позиция измельчения отходов

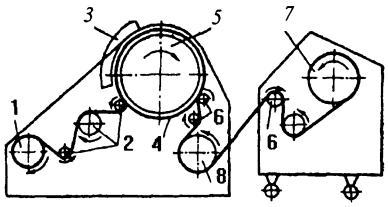


Рис. 2.5.6. Схема многопозиционной термоформовочной машины барабанного типа:
1 – рулонированный материал; *2*, *6* – направляющие ролики, *3* – нагреватель; *4* – формообразующее покрытие формовочного барабана, *5* – формовочный барабан, *7* – наматывающее устройство; *8* – охлаждающий барабан

проходит под нагревателем и формуется на формообразующем покрытии формовочного барабана. В качестве формообразующего покрытия используются для получения малогабаритных деталей тонкая медная лента с отформованными на ней гнездами, а для получения рельефного рисунка – тюль или полотно с соответствующим рельефным рисунком. Затем, пройдя систему направляющих роликов и охлаждающий барабан, отформованная деталь либо сматывается в рулон, как это показано на рис. 2.5.6, либо (при производстве малогабаритных деталей) попадает на вырубное устройство, после которого готовые детали попадают на конвейер и ссыпаются в тару, а отходы в виде перфорированной ленты измельчаются.

Машины ленточного и барабанного типа в своем большинстве специализированы по назначению и работают в автоматизированном цикле.

2.5.1.4. ЭКСТРУЗИЯ

Наиболее распространенные в машиностроении профили из термопластичных полимерных материалов получают методом экструзии на специализированных технологических линиях.

Экструзионная линия (рис. 2.5.7) для изготовления труб работает следующим образом. Гранулированный или порошкообразный ПМ с помощью пневмозагрузчика поступает в бункер экструдера, в котором может быть предусмотрены подсушка и подогрев ПМ. Затем материал захватывается рабочими органами экструдера, расплавляется, гомогенизируется, пластицируется и выдавливается из головки экструдера в виде непрерывной трубчатой заготовки. Последняя тянущим устройством протягивается через калибрующую насадку, где труба калибруется (по наружному или внутреннему диаметру) и частично охлаждается; затем труба поступает в охлаждающую ванну, в которой она окончательно охлаждается водой. После прохождения через маркирующее приспособление готовая труба либо разрезается на куски и укладывается в штабель, либо наматывается в бухту.

Экструзионные агрегаты для изготовления профилей состоят из тех же устройств и механизмов, что и агрегаты для изготовления труб. Отличие сводится к несколько иным конструкциям головки и калибрующего устройства, специфика которых определяется конфигурацией поперечного сечения экструдируемой детали.

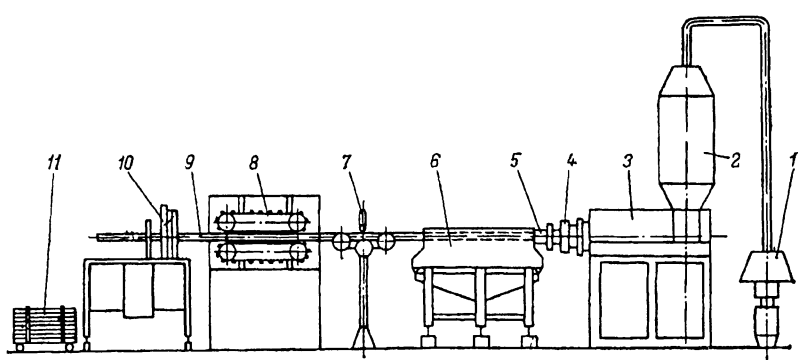


Рис. 2.5.7. Схема технологической экструзионной линии для производства труб:
1 – пневмозагрузчик; *2* – бункер; *3* – экструдер; *4* – формующая головка; *5* – калибрующая насадка; *6* – охлаждающая ванна; *7* – маркирующее приспособление; *8* – тянущее устройство; *9* – готовая труба; *10* – отрезное устройство; *11* – штабель

В промышленности используются различные модели экструдеров. Классификация экструдеров наиболее часто проводится по характеру рабочего органа, в качестве которого могут быть червяк, диск или их комбинации. Экструдеры, рабочим органом которых служит червяк, называют червячными прессами. В производствах по изготовлению профильных деталей для машиностроения применяют, в основном, одночервячные и двухчервячные прессы.

Наибольшее распространение получили одночервячные прессы. В зависимости от расположения цилиндра они могут быть горизонтальными и вертикальными. Одночервячный пресс с горизонтальным расположением цилиндра схематически изображен на рис. 2.5.8. Он состоит из червяка, вращающегося внутри цилиндрического материального цилиндра, на котором установлен бункер. Внутри материального цилиндра, как это показано на рисунке, может быть запрессована гильза с азотированной, закаленной и термообработанной поверхностью. Однако чаще материальный цилиндр выполняется однослойным. В этом случае он целиком изготовляется из высококачественной стали. Обогрев корпуса осуществляется нагревателями, сгруппированными в несколько (как правило, три или четыре) тепловых зон. На конце корпуса устанавливается формующая головка, соединенная с материальным цилиндром посредством адаптера. Между червяком и адаптером может располагаться решетка с пакетом фильтрующих сеток. Материальный цилиндр устанавливается на станине. Осевое усилие воспринимается блоком упорных подшипников. Привод червяка должен обеспечивать бесступенчатое регулирование частоты вращения. В примере, приведенном на рис. 2.5.8, привод осуществляется от регулируемого электродвигателя через шестеренчатый редуктор.

В экструдерах, предназначенных для обработки склонных к деструкции ПМ, предусматривают устройства для отсоса летучих. Червяки таких экструдеров отличаются от обычных тем, что у них за зоной сжатия следует зона дегазации, имеющая меньшую глубину нарезки, чем в зоне сжатия. Витки червяка в этой зоне заполняются расплавом не полностью. Именно в этом месте материального цилиндра располагается отверстие газоотводного канала.

Бункер изготовляют из листовой стали или алюминиевых сплавов со смотровым окном для контроля за уровнем находящегося в бункере материала. Для обработки материалов, склонных к сводообразованию (зависанию), в бункере устанавливают перемешивающее устройство. Бункера экструдеров, предназначенных для обработки материалов с низкой сыпучестью, оборудуют устройствами для предварительного уплотнения материала. Для переработки гидрофильных ПМ применяются бункера с вакуумированием (для удаления влаги и летучих). В некоторых случаях используются бункера, в которых материал подогревается горячим воздухом.

Червяк – основной рабочий орган экструдера. Он забирает материал от загрузочного отверстия, пластицирует его и равномерно подает в виде гомогенного расплава к головке. Продвигаясь по каналу червяка, материал разогревается за счет теплоты, выделяющейся

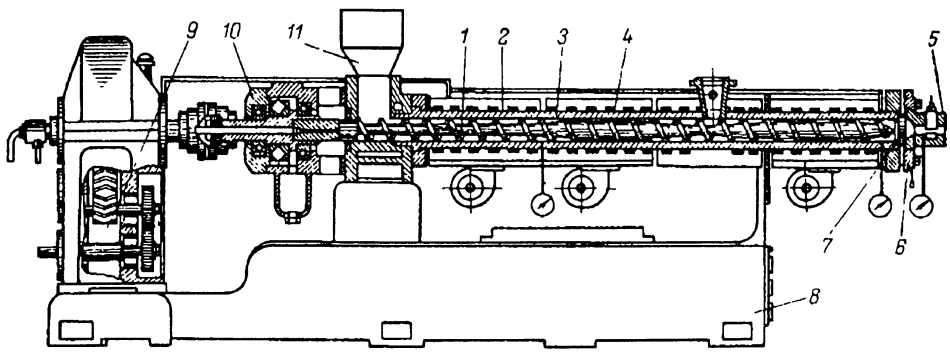


Рис. 2.5.8. Схема одночервячного пресса:
1 – червяк; *2* – материальный цилиндр; *3* – гильза, *4* – нагреватели, *5* – формующая головка; *6* – адаптер, *7* – пакет фильтрующих сеток; *8* – станина, *9* – редуктор, *10* – блок упорных подшипников; *11* – бункер

вследствие вязкого трения, и теплоты, подводимой от внешних нагревателей.

По характеру процессов, протекающих на каждом участке червяка, выделяют три основные зоны: зона питания (или загрузочная), в которой обрабатываемый материал находится в твердом состоянии; зона сжатия (или пластикации), в которой почти полностью происходит плавление материала; зона дозирования (нагнетания, гомогенизации, выдавливания), по которой течет поток расплава ПМ.

Конструкция прессов обеспечивает возможность применения сменных червяков с разными характеристиками в зависимости от обрабатываемого материала и сменного формующего инструмента.

Наиболее распространенные схемы червяков, применяемых для переработки ПМ, показаны на рис. 2.5.9.

Бескомпрессионные червяки с постоянным шагом и постоянной глубиной нарезки (рис. 2.5.9, *а*) применяют довольно редко при обработке материалов с минимальной термостабильностью.

Червяки с переменным шагом и постоянной глубиной нарезки (рис. 2.5.9, *б*) обеспечивают повышенную производительность первых витков, большое давление в последних витках и, имея высокую жесткость, обеспечивают передачу больших крутящих моментов. Применяют обычно для высоковязких ПМ типа поливинилхлорида и полистирола.

Червяки с постоянным шагом и переменной глубиной нарезки (рис. 2.5.9, *в*) нашли наиболее широкое применение в машинах для ПМ. При малой глубине нарезки в конце червяка образуется малый обратный поток обрабатываемого материала и большие усилия сдвига, что особенно важно для маловязких ПМ. Для высоковязких материалов глубина должна быть увеличена, что в конечном итоге приводит к уменьшению сечения червяка в зоне загрузки.

В червяке небольшого диаметра ослабление сечения может привести к потере прочности. В этом случае рекомендуется к применению червяк с переменным шагом и глубиной нарезки (рис. 2.5.9, *г*), который обеспечивает большое давление, необходимое при выдавливании через формующую головку. Червяк этой конструкции может быть рекомендован и для крупных высокопроизводительных машин.

Червяки с переменным шагом, состоящие из конической части в зоне загрузки и цилиндрической в зоне пластификации и дозирования (рис. 2.5.9, *д*), применяют в крупных экструзионных линиях.

Червяки с постоянным шагом и многократно-переменной глубиной нарезки (рис. 2.5.9, *е*) применяют для обработки материалов, проходящих процесс дегазации. Многократное сжатие и расширение обрабатываемого материала обеспечивает выделение летучих веществ и удаление их через материальный цилиндр или червяк.

В современных экструдерах используют червяки с отношением длины к диаметру от 15 до 42.

Применяют и другие, более сложные червяки. Кроме того, для достижения наибольшей однородности расплава и создания наибольшего давления используются червяки с наконечниками различной формы. Основное назначение конечной части червяков заключается в равномерном подводе расплава к фор-

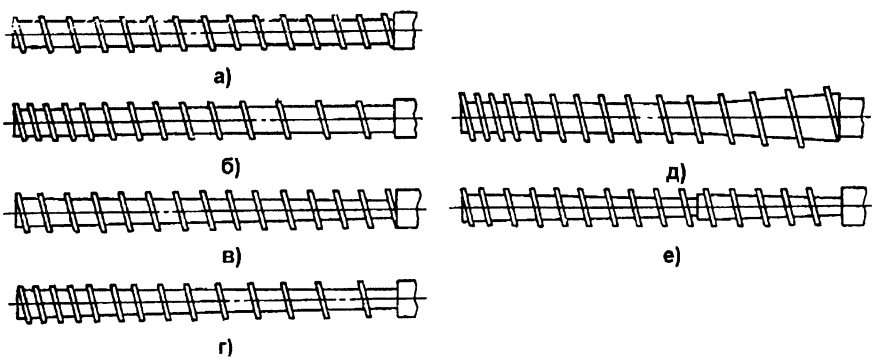


Рис. 2.5.9. Схемы типовых червяков одночервячных машин

мующей головке, т.е. без задержки отдельных частей потока расплава на длительное время в мертвых зонах.

В отличие от одночервячных машин в цилиндре двухчервячных прессов параллельно размещены два червяка. По характеру расположения и направлению вращения червяков различают двухчервячные машины с зацепляющимися и незацепляющимися червяками; с одинаковым или встречным направлением вращения червяков.

Двухчервячные прессы применяют для обработки порошкообразных материалов, имеющих небольшие насыпную массу и коэффициент трения о стенки цилиндра. Это связано с тем, что производительность двухчервячных прессов, в отличие от одночервячных, не зависит от сил трения между рабочими органами и материалом, так как материал захватывается червяками и принудительно продвигается ими вперед. Производительность зоны питания зависит от свободного объема между витками и от равномерности подачи материала. Эти машины нашли широкое применение при обработке порошкообразных ПМ на основе ПВХ.

Охлаждающие ванны трубных линий делают сварными из коррозионно-стойкой стали. На торцах ванн имеются отверстия со сменными резиновыми манжетами. Диаметр отверстия в манжете должен быть несколько меньше наружного диаметра экструдируемой трубы. Внутри ванны устанавливают поддерживающие ролики из ПМ или алюминия, удерживающие охлаждаемую трубу под водой. Охлаждающие ванны для производства сложных профилей обычно выполняют закрытого типа с целью создания в них разрежения, способствующего окончательному калиброванию трубы. Кроме того, в ванне устанавливаются шайбы (рейтары), внутреннее отверстие которых точно соответствуют конфигурации и размерам наружного контура готового профиля. Ванну обычно устанавливают на роликах, позволяющих перемещать ее по укрепленным в полу направляющим. Для равномерного охлаждения труб и профилей ванны снабжают автоматическими регуляторами температуры и системами дозирования подачи охлаждающей воды.

Протяжка труб и профилей осуществляется при помощи гусеничных, роликовых или комбинированных тянущих устройств с пневматическим, механическим или гидравлическим зажимом трубы. Привод тянущего устройства имеет систему бесступенчатого регулирования скорости вытяжки.

Резку труб диаметром до 200 мм и профилей производят при помощи пилы маятникового типа. При диаметре труб более 200 мм используют дисковые пилы с планетарным механизмом, поворачивающим пилу вокруг трубы. При производстве профилей большого размера дисковой пиле сообщается поступательное движение в направлении, перпендикулярном к оси профиля. Во всех случаях в процессе резки пила перемещается вдоль оси трубы или профиля со скоростью их протяжки, а затем возвращается в исходное положение.

Штабелер либо сбрасывает готовую и отрезанную трубу или профиль в соответствующую тару, либо с помощью манипулятора укладывает их в тару соответствующим образом сориентированными.

Намоточные устройства используются при производстве тонких трубок, шлангов, труб малого диаметра и тонких профилей с простым поперечным сечением.

2.5.2. ОСНАСТКА

Оснастка для литья под давлением и прессования классифицируется в первую очередь по методу формования детали. По этому признаку формы подразделяют на формы для литья под давлением, пресс-формы для прямого прессования, пресс-формы для литьевого прессования с верхней или нижней загрузочной камерой. Все перечисленные виды форм классифицируют:

по универсальности – непереналаживаемые (специальные) и переналаживаемые (специальные, универсальные);

по связи с оборудованием – стационарные, полустационарные, съемные;

по виду загрузочной камеры – с общей и индивидуальной загрузочными камерами;

по числу и положению плоскостей разъема – с одной или несколькими (параллельными, взаимно перпендикулярными) плоскостями разъема;

по способу извлечения деталей – сталкиванием (выталкивателями или съемной плитой), вращением резьбовых знаков;

по конструкции механизмов перемещения и (или) вращения подвижных элементов – с приводом от хода подвижной части формы или специальным электро-, гидро- или пневмоприводом.

Стационарные формы, характеризуемые отсутствием съемных элементов, закрепляют на плитах литьевой машины (пресса) на период изготовления всей партии деталей. Такие формы обеспечивают оптимальные параметры технологического процесса, максимальную производительность и позволяют автоматизировать весь цикл литья (прессования). Однако такие формы наиболее дорогие, поэтому их применяют в условиях крупносерийного и массового производств.

Полустационарные формы, характеризуемые наличием отдельных съемных элементов (кассеты с пуансонами, матрицами, резьбовыми знаками, закладными знаками и др.), закрепляют на плитах литьевой машины (пресса) как стационарные. Для ускорения цикла литья (прессования) в большинстве случаев их снабжают двумя (или более) комплектами съемных элементов, которые поочередно устанавливают в форму. Это позволяет совмещать операции прессования и отделения готовой детали от кассеты (знаков). Такие формы применяют для изготовления армированных и резьбовых деталей в серийном производстве.

Съемные формы в отличие от стационарных и полустационарных не закрепляют на плитах. После каждой операции формы извлекают из литьевой машины (пресса) для удаления изделия, очистки, установки арматуры и пр. Они не имеют собственной системы обогрева (охлаждения), не могут обеспечить оптимальные параметры технологического режима, поэтому их применяют в основном в единичном производстве.

Формы могут быть одногнездными или многогнездными и являются относительно сложными механизмами, состоящими из целого ряда устройств, способствующих выполнению отдельных элементов процесса формования готовой детали. В число этих устройств входят: система оформляющих деталей, литниковая система, система термостатирования, система выталкивания, система перемещения и центрирования, система вентиляции.

Система оформляющих деталей состоит из элементов, образующих оформляющую полость формы; ее назначение – обеспечение формования детали заданного качества при оптимальном технологическом цикле.

Оформляющие детали (матрицы, пуансоны, знаки, плиты и т.д.) конструктивно многообразны, так как их контуры и размеры негативно повторяют геометрические особенности детали.

Оформляющие детали разделяют по ряду признаков: характеру поверхностей формования – гладкие, резьбовые, с поднутрениями; состоянию поверхностей формования – зеркальные, матовые, шагреневые; сложности – цельные, вставные, составные; точности формуемых элементов детали – нормальные и прецизионные; способу перемещения подвижных формующих элементов; геометрической форме деталей – круглые, прямоугольные, кольцевые, трубчатые, корпусные и т.д.; технологии изготовления – механообработка, давление (холодное, полугорячее, горячее выдавливание), лазерная и электроискровая обработка, гальванопластика и т.д. Оформляющие детали помимо формующих поверхностей имеют поверхности, участвующие: в сопряжениях с другими деталями (посадочные, центрирующие); в контакте с ними (опорные, уплотняющие); попадающие в плоскость разъема формы (т.е. циклически охлаждающиеся – нагревающиеся).

Основное назначение литниковой системы – транспортирование расплава в оформляющую полость формы за возможно более короткое время с минимальными потерями расплавом энергии и создание благоприятных условий для заполнения расплавом оформляющей полости. Литниковая система существенно влияет на работоспособность формы. От конструкции литниковой системы зависят: производительность процесса качество детали, экономия материала.

Классификация литниковых систем выделяет системы с затвердевающими, незатвердевающими и частично затвердевающими литниками. Соответственно этому формы для литья под давлением и литниковые системы получили название холодноканальных, горячеканальных и комбинированных. Конструкции литниковых систем варьируются в зависимости от гнездности формы, числа впусков в одно гнездо, расположения литниковых каналов (в плане и относительно плоскости размыкания формы), конфигурации каналов и т.д. Все это позволяет классифицировать литниковые системы по соответствующим признакам.

1. Структура элементов литниковой системы. Литниковая система состоит из трех элементов: основного литникового канала, по которому расплав из материального цилиндра поступает в форму; разводящего канала, ответвляющегося от основного в сторону оформляющего гнезда; впускного канала, по которо-

му расплав непосредственно поступает в оформляющую полость. В зависимости от конструкции детали и формы литниковые системы могут иметь: все три элемента, первый и третий, только первый, только третий.

Основной канал выполняют в литниковой втулке, в этом канале образуется центральный литник. Разводящие каналы выполняют в литниковой плите (или в обойме матрицы – по плоскости разъема), в них образуются разводящие литники. Впускные каналы (с впускными литниками) являются продолжением разводящих каналов.

2. Расположение литниковых разводящих и впускных каналов. Прямолинейное расположение позволяет разместить большое число гнезд при относительно малой массе литников, удобно расположить охлаждающие каналы. Заполнение гнезд происходит неравномерно, ближние к литнику детали охлаждаются раньше, и детали характеризуются разным качеством. Радиальное расположение позволяет одновременно заполнить все гнезда, но конструктивно такое расположение охлаждающих каналов неудобно. При необходимости увеличивать число гнезд разводящие каналы удлиняются и увеличивается сечение основного литника, а это приводит к увеличению сопротивления течению массы и падению давления в оформляющей полости. Это в значительной степени устраняется при радиально-разветвляющемся расположении. Используется и комбинированное расположение, сочетающее в себе элементы вышеперечисленных вариантов. При формовании в многогнездных формах деталей, одно измерение которых существенно больше двух других, используются варианты параллельного расположения литниковых каналов.

3. Сбалансированность системы. По этому признаку литниковые системы делят на сбалансированные и несбалансированные. В последних требуется специальная корректировка размеров поперечных сечений и протяженности разводящих и впускных каналов для обеспечения одновременности заполнения всех гнезд формы расплавом. Это особо важно при соответствующих требованиях к качеству деталей для прямолинейного, параллельного и рядного расположения гнезд в многогнездных формах, а также при литье под давлением в одной многогнездной форме разных деталей, несколько различающихся по массе и размерам.

Система термостатирования должна регулировать температуру формы, поддерживая ее на заданном уровне.

В зависимости от требуемого интервала поддержания температуры формы, мощности и производительности термопластавтомата различают следующие типы термостатирующих систем: водоциркуляционные с прямым водяным охлаждением по способу смешивания; маслоциркуляционные с непрямым водяным или воздушным охлаждением; компрессорно-охлаждающие с водяным и воздушным охлаждением; системы с градирнями.

Эти системы предназначены для циркуляции воды (при температурах не более 80 °С), масла, этиленгликоля и т.д. Температурные ограничения для воды связаны с осаждением солей на стенках каналов.

Классификация систем охлаждения отражает несколько признаков. Известны варианты охлаждения отливок вне формы (на съемных деталях – на воздухе и в ваннах с охлаждающей жидкостью) и в форме (охлаждая непосредственно оформляющие детали формы или менее эффективно при косвенном их охлаждении путем контакта с охлаждающими плитами и другими деталями). В последнем случае выделяют системы с независимым регулированием температуры охлаждения матрицы, пуансона, знаков, шиберов, а также других элементов конструкции и с общим – для всей формы или для каждой полуформы в отдельности.

Главный классификационный признак – конструктивные особенности охлаждающих элементов: каналы, полости, комбинированные варианты; дополнительный признак – расположение этих охлаждающих элементов (параллельное, пересекающееся, спиральное и т.д.).

Для термостатирования литьевых форм, устанавливаемых на реактопластавтоматах, и пресс-форм применяются электронагреватели (как омические, так и индукционные). Однако в некоторых случаях используется и жидкостной обогрев.

Назначение системы выталкивания – удаление без повреждения отливки из формы за возможно короткое время и возврат формы в исходное положение. Удаление может быть связано с отделением (отрывом) литников от детали; оно реализуется в результате возвратно-поступательного перемещения подвижной полуформы и, при необходимости, перемеще-

ний специальных деталей оснастки или приводов, кинематически связанных с подвижной полуформой. Важной является такая работа системы, при которой не возможны повреждения отливки.

Система выталкивания состоит из деталей, образующих камеру для размещения выталкивателей, собственно выталкивателей, деталей сброса и возврата системы в исходное положение.

Чрезвычайно разнообразны по конструкции и принципу действия выталкиватели и выталкивающие устройства: стержневые, плоские, трубчатые, кольцевые, "грибковые", пружинные выталкиватели; сталкивающие плиты; сталкивающие планки и полуматрицы, кассеты, съемные детали; противовакуумные устройства; пневматические устройства; гидравлические устройства; детали системы двойного сталкивания и др. Конкретный выбор устройства зависит от многих факторов, но в первую очередь от конструкции детали и формы, эксплуатационных требований к детали и ее материала.

Система перемещения обеспечивает движение деталей, оформляющих боковые отверстия, поднутрения на наружных и внутренних поверхностях отливок. Эти детали (раздвижные полуматрицы, составные пуансоны, знаки) перемещают с помощью механического, гидравлического или пневматического приводов. Во многих случаях для привода подвижных элементов используют пружины, особенно когда требуются незначительные усилия.

Система центрирования должна обеспечить точное центрирование пуансона относительно матрицы в момент смыкания полуформ и при впрыске. Неблагоприятные смещения могут происходить из-за несимметричной конфигурации детали и неравномерности заполнения полости; несимметричной плоскости разъема формы, дефектов крепления формы к плитам машины, износа направляющих колонн машины и т.д.

Положение частей формы обеспечивается направляющими колонками и планками, коническими или наклонными поверхностями, поперечными валиками, коническими цапфами и т.д. Выбор того или иного способа центрирования зависит от величины поперечных сил, допустимой несоосности пуансона и матрицы, формы детали и технологических возможностей изготовления формы.

При заполнении оформляющей полости находящийся в ней воздух, а также газы, выделяющиеся из ПМ, сжимаются, препятствуя заполнению формы. В связи с этим для вывода газов из оформляющей полости в форме предусматривают вентиляционные (газоотводящие) каналы в местах, заполняемых расплавом в последнюю очередь. Как правило, это наиболее удаленные от места впуска участки полости с максимальным сопротивлением течению, где газ сжимается. Вентиляционный канал (глубиной 0,015...0,060 мм и длиной 1,5... 2,0 мм) переходит в соединительный канал глубиной 1,0...2,0 мм, который соединяет его с атмосферой. Часто вентиляционными каналами могут служить зазоры в толкателях, вставках, подвижных и разъемных элементах или специальных деталях, устанавливаемых в месте защемления газа.

Пресс-формы для прямого прессования деталей по принципу устройства оформляющего гнезда подразделяют на формы открытого, закрытого (поршневого) и полузакрытого (с перетеканием) типов. Пресс-формы открытого типа не имеют загрузочной камеры, что несколько упрощает конструкции матрицы и пуансона. Такие пресс-формы применяют для изготовления неглубоких изделий (тарелки, крышки) с большой площадью прессования при сравнительно тонких стенках, когда загружаемый полуфабрикат полностью помещается в оформляющем гнезде матрицы. Недостатки форм этого типа – повышенный расход материала и увеличение числа бракованных деталей.

Пресс-формы закрытого типа характеризуются тем, что оформляющее гнездо является непосредственным продолжением загрузочной полости. В процессе формования пуансон входит в загрузочную камеру с малым зазором; это затрудняет вытекание материала из гнезда. В таких пресс-формах изготовляют детали из труднопрессуемых ПМ с малой текучестью. Недостатки пресс-форм – необходимость строгого соответствия масс загружаемого материал и готовой детали, сложность получения точных по высоте деталей и увеличенный износ пуансона и загрузочной камеры матрицы.

Наиболее распространены пресс-формы полузакрытого типа (с перетеканием). Они характеризуются минимально необходимым гарантированным зазором по периметру между пуансоном и загрузочной камерой. Этот зазор обеспечивает вытекание избытка материала

при запрессовке и гарантирует создание необходимого давления прессования. Загрузочная камера имеет несколько большие размеры, чем прессуемая деталь. Это необходимо для создания отжимного пояска, обеспечивающего окончательное запирание оформляющего гнезда. Такая форма позволяет изготовлять любые детали методом прямого прессования, уменьшает износ пуансона и загрузочной камеры, не требует точной дозировки материала, допускает подпрессовку. Недостаток форм с перетеканием – несколько увеличенная площадь прессования из-за наличия отжимного пояска.

Пресс-формы с индивидуальной загрузочной камерой применяют наиболее часто. Их преимущества – большая точность изготовления оформляющего гнезда и соответственно детали, более высокая ремонтопригодность, уменьшенный расход сырья; недостатки – большие размеры и металлоемкость формы. Пресс-формы с общей загрузочное камерой применяют для изготовления простых небольших деталей. Основные преимущества таких форм по сравнению с рассмотренными – меньшие размеры, суммарная трудоемкость изготовления и металлоемкость, а также простота загрузки сырья.

В отличие от пресс-форм для прямого прессования формы для литьевого прессования имеют загрузочную камеру, отделенную от оформляющего гнезда, и литниковую систему, соединяющую загрузочную камеру с оформляющим гнездом (гнездами).

Пресс-формы с верхней загрузочной камерой можно устанавливать на всех прессах, используемых для прямого прессования.

Пресс-формы с нижней загрузочной камерой наиболее целесообразно устанавливать на специальных прессах с увеличенным усилием нижнего гидравлического цилиндра. Регулированием этого усилия в процессе запрессовки можно получить отливку с поверхностью прессования почти в 2 раза большей, чем в формах без регулирования.

Оснастка для формования объемных деталей из листовых и пленочных термопластов классифицируется по выполняемой функции:

на оформляющую оснастку, которая придает заготовке, формуемой с помощью вакуума или сжатого воздуха, вид готовой детали (например, проймы при свободном формовании);

на формующую оснастку, которая непосредственно сама формует заготовку и придает ей форму готовой детали (например, матрицы при негативном формовании);

на вспомогательную оснастку, которая используется для предварительной механической вытяжки перед формованием или для других вспомогательных целей (деталь не воспроизводит геометрию вспомогательной оснастки).

По методу осуществляемого на данной оснастке формования ее можно разделить на проймы (для свободного формования), негативную, позитивную и негативно-позитивную.

По методу установки на оборудование оснастку делят на стационарную и съемную, по числу одновременно формуемых деталей – на одногнездную и многогнездную.

Технологическая оснастка для деталей из листов и пленок может быть жесткой и эластичной; разъемной; двухсторонней; с вставными или закладными подвижными или неподвижными знаками; с термостатированием или без него. Невысокие рабочие давления, используемые при формовании, позволяют применять для изготовления формующей оснастки материал с относительно низкими прочностными показателями. Выбор материала зависит в первую очередь от количества формуемых деталей и от требований к их качеству. Установлено, что деревянные формы выдерживают до 500 формовок, гипсовые – до 50, формы из каменного литья и из литьевых полимерных компаундов – свыше 500. На формах из слоистых ПМ, цветных металлов и стали можно получить неограниченное число изделий.

Для производства единичных образцов и малых серий более широко применяют деревянные формы. Для изготовления форм применяют древесину ольхи, клена, вяза, липы, вишни, груши, бука или красного дерева. Можно использовать фанеру. При изготовлении форм необходимо учитывать, что древесина дает разную усадку вдоль и поперек волокон. На практике это затрудняет получение деталей с размерами, имеющими повышенную точность. Поэтому формы делают из тщательно просушенной и пропитанной клеем древесины с параллельным расположением волокна. Для улучшения качества поверхности, предотвращения попадания в поры влаги и уменьшения износа деревянные формы часто покрывают эпоксидными лаками с последующей пескоструйной обработкой или шлифованием и полировкой.

Хорошие теплоизоляционные свойства древесины способствуют тому, что на поверхности деталей никогда не образуется пятен переохлаждения. Однако при длительной непрерывной работе формы возможен ее перегрев, что, естественно, приводит к замедлению цикла. В этих случаях рекомендуется один раз за 5 – 7 циклов обдувать деревянную форму с помощью вентилятора или воздушного пистолета.

У деревянных форм не рекомендуется делать какие-либо подвижные вставки, так как в этом случае возможное число изготавливаемых деталей может снизиться почти в 10 раз. Элементы форм соединяют на шурупах, а не крепят гвоздями или клеем. Это дает возможность легко заменять отдельные вышедшие из строя элементы.

Для производства единичных деталей выгодны гипсовые формы. Их получают простой отливкой с модели из глины, гипса, пластилина, древесины или металла. Форма должна быть тщательно высушена. Рекомендуется проводить воздушную сушку продолжительностью от трех дней до недели в зависимости от размеров формы.

Для изготовления форм можно применять гипс разных марок, однако наиболее пригодны модельный гипс или смесь гипса с алебастром. После отливки и просушки гипсовой матрицы ее можно упрочнить пропиткой 30 %-ным раствором железного или медного купороса, а также разбавленным раствором жидкого стекла. Гипсовая форма должна иметь развитую опорную поверхность, сколько-нибудь значительные неровности на которой недопустимы. Гипсовые формы пористы, поэтому эвакуационные (вентиляционные) отверстия в них предусматриваются лишь в местах, нуждающихся в наиболее интенсивном отсосе.

Для средних сроков работы применяют формы, отлитые из фенольных, полиэфирных или эпоксидных композиций. Модель для отливки формы может быть выполнена из древесины, гипса, глины и т.п. При необходимости форму армируют стеклянными волокнами, а для укрепления ответственных мест, таких, например, как верхний кант или тонкие знаки используют металлические вставки.

Для охлаждения полимерных форм простой конфигурации достаточно использовать охлаждающую рубашку, служащую одновременно упрочняющим элементом. Для получения вентиляционных каналов сразу после заливки литьевой композиции в заранее предусмотренные места вставляют стальную проволоку диаметр которой соответствует размерам будущих каналов. Приблизительно через 1,5 – 2 ч проволока удаляется, а на ее месте остаются необходимые отверстия для удаления воздуха.

Процесс изготовления форм из каменного литья очень близок к процессу производства форм из литьевых ПМ. Вентиляционные каналы в формах наиболее легко получать, закладывая в соответствующие места перед заливкой каменной массы проволоку, хорошо смазанную по поверхности жиром, который является лучшим разделительным слоем. Вынимают эту проволоку примерно через 14 ч после заливки формы. Каменное литье вызывает коррозию металлов, поэтому, если невозможно обойтись без арматуры, следует использовать армирующие элементы лишь с соответствующим защитным покрытием. Для придания прочности форме и удлинения ее срока службы ребра, пазы, выступы и тому подобные элементы можно армировать стекловолокном.

Для охлаждения форм в процессе их работы в каменную массу могут быть заформованы змеевики. Через эти змеевики в процессе отверждения каменной массы рекомендуется пропускать воду с целью отбора теплоты, выделяющейся при реакции отверждения.

Для длительных сроков службы применяют металлические или покрытые металлом формы. Обычно используют алюминий и его сплавы, латунь, магниевые сплавы, сплавы электролитного цинка и сталь. Наибольшее распространение получили формы, отлитые из цветных металлов и, в частности, из сплавов алюминия. Их, как правило, изготовляют литьем по деревянным или ПМ моделям в землю. Затем отливка подвергается механической обработке. Иногда алюминиевые формы изготовляют из сплошной заготовки с применением только механической обработки. Последний метод предпочтителен для производства стального формующего инструмента. Формы из легких сплавов хорошо обрабатываются, имеют высокое качество поверхности, хорошо отводят теплоту, позволяют изготовить большое количество деталей. Непосредственно при литье в эти формы могут быть залиты змеевики, выполненные из более теплостойких металлов, например стальные. Положительным

фактором является и небольшая масса этих форм. При изготовлении стальных форм хорошее качество рабочих поверхностей рекомендуется достигать путем нанесения на них медно-никелевого или хромового покрытия. Однако наибольшее распространение сталь получила не при изготовлении пуансонов и матриц, а как материал для вспомогательных элементов, например, опорных плит и тому подобных частей, изготовление которых из литых заготовок экономически необосновано.

Инструмент для механической вытяжки изготовляют преимущественно из цементируемых конструкционных сталей, эластичные пуансоны и матрицы для механического формования изготовляют из резиновых смесей методом вулканизации на прессе. Возможно применение вспененной резины.

Головки на экструдерах для изготовления труб имеют преимущественно прямоточную конфигурацию, удобную с точки зрения приема экструдируемых труб и обеспечивающую практически полное равенство длин всех линий потока. Таким образом, сама конструкция головки предусматривает выравненность потока на выходе из кольцевой щели. Поэтому заложенная в конструкции возможность радиального смещения мундштука посредством регулировочных болтов *3* (рис. 2.5.10) с целью регулировки высоты щели формующего зазора имеет только корректировочный смысл: компенсация незначительной неоднородности экструзии вследствие систематической разности вязкости расплава в различных точках поперечного сечения канала головки.

Конструкция головки, изображенной на рис. 2.5.10, традиционна. Диаметр труб, изготовляемых в головках такого типа, как правило, близок к диаметру червяка экструдера.

На одной трубной головке возможна экструзия труб различного диаметра и толщины в определенном диапазоне путем замены комплекта дорна и мундштука. Практикой установлено, что для экструзии труб диаметром 20...1000 мм достаточно четырех типоразмеров головок: I – от 20 до 115 мм; II – от 125 до 400 мм; III – от 400 до 650 мм; IV – от 650 до 1000 м.

Каждый из этих типоразмеров имеет свои особенности конструкции, которые обусловлены преимущественно различными приемами монтажа–демонтажа и чистки каналов в связи со значительным различием габаритных размеров и массы как отдельных деталей, так и головок в целом.

Увеличение диаметра канала, по которому проходит ПМ, с последующим уменьшением до диаметра формующего канала, казалось бы, нерационально, так как приводит к значительному увеличению габаритных размеров и массы головки. Однако оно здесь оказывается необходимым для решения проблемы свариваемости отдельных потоков, на которые разбивается расплав ребрами дорнодержателя.

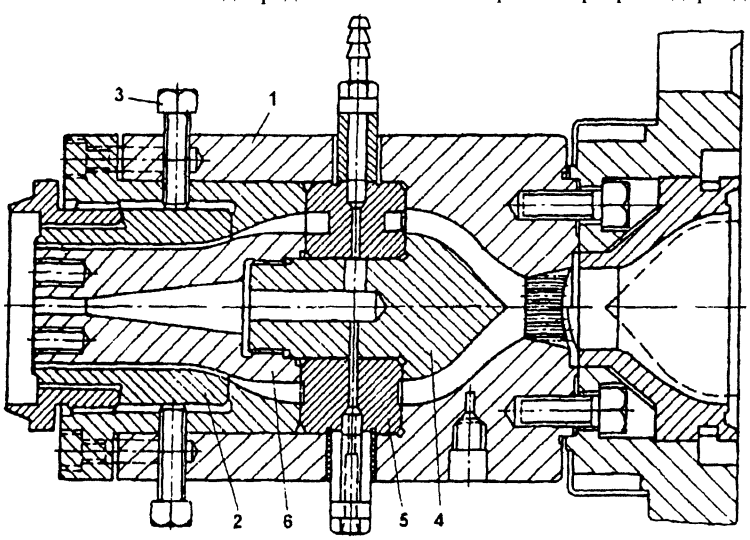


Рис. 2.5.10. Схема трубной головки:
1 – корпус; *2* – мундштук; *3* – регулировочные болты, *4* – дорн, *5* – дорнодержатель; *6* – формующая часть дорна

Проблема сварки потоков в равной степени относится к головкам всех типоразмеров, однако степень значимости ее неодинакова для различных материалов. Так, полиэтилен низкой плотности, ударопрочный полистирол имеют хорошую свариваемость, и не требуется специальных приемов при конструировании головок для ее улучшения. Для других материалов качество получаемой трубы или шланга зависит от рационального крепления дорна к корпусу головки.

Применяют различные конструкции дорнодержателей: с радиально расположенными ребрами каплевидного сечения; в виде перфорированного кольца; с тангенциально расположенными ребрами и др.

Так как существует бесконечное разнообразие профилей, для создания любого из них требуется специальное решение оформляющего канала, то в промышленности применяются самые различные конструктивные решения профильных головок. На рис. 2.5.11 представлена головка для экструзии Ш-образного профиля. Мундштук этой головки состоит (не считая переходных деталей) из двух деталей *5* и *6*. Деталь *5* осуществляет переход потока термопласта из круглого сечения к Ш-образному сечению фильеры *6*, соответствующему

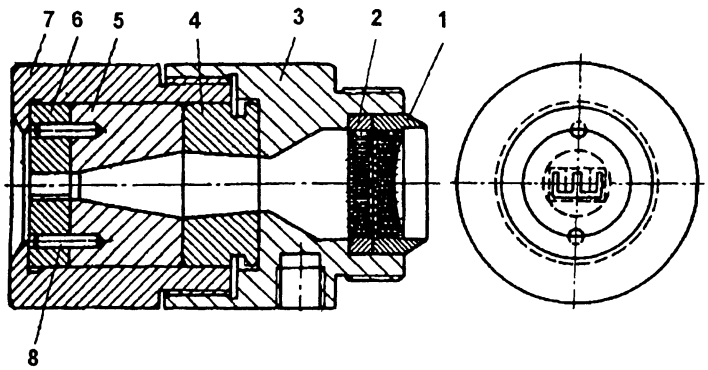


Рис. 2.5.11. Схема профильной головки:
1 – 2 – решетка; *3* – корпус, *4* – кольцо, *5* – переход; *6* – фильера; *7* – обойма; *8* – штифт

профилю изделия. Наиболее ответственным в этом случае является обеспечение плавного подхода расплава к фасонному сечению оформляющего канала, т.е. выбор внутренних поверхностей детали *5*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В.** Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учеб. для вузов. М.: Химия, 1991. 352 с.

2. **Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А.** Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов: Учеб. для вузов. М.: Химия, 1986. 488 с.

3. **Каплун Я.Б., Ким В.С.** Формующее оборудование экструдеров. М.: Машиностроение, 1969. 158 с.

4. **Салазкин К.А.** Прессование, прессы. Ч. 1. Конспект лекций. М.: Московский институт химического машиностроения, 1975. 196 с.

5. **Салазкин К.А.** Прессы-автоматы и роторные линии. Текст лекций. М.: Московский институт химического машиностроения, 1991. 108 с.

6. **Справочник** по технологии изделий из пластмасс / Г.В. Сагалаев, В.В. Абрамов, В.Н. Кулезнев, С.В. Власов и др. М.: Химия, 2000. 424 с.

7. **Техника** переработки пластмасс / Под ред. Н.И. Басова и В. Броя. М.: Химия, 1985. 528 с.

8. **Торнер Р.В., Акутин М.С.** Оборудование заводов по переработке пластмасс. М.: Химия, 1986. 400 с.

9. **Stitz S., Keller W.** Spritzgieptechnik: Verarbeitung – Maschine – Periphene. München; Wien: Carl Hanser, Verlag, 2001. 500 s.

10. **Throne J.L., Beine J.** Thenoformen: Werkstoffe – Verfahren – Anwenaung. München; Wien: Carl Hanser, Verlag, 1999. 504 s.

Раздел 3

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении в наибольшей степени применяют конструкционные композиты с повышенной прочностью и жесткостью. Искусственное упрочнение металлических материалов (помимо легирования) достигается введением в них частиц (дисперсно-упрочненные материалы) или слоев более высокой прочности (слоистые композиционные материалы (СКМ)), или высокопрочных и, как правило, высокомодульных волокон. Именно эта группа композиционных материалов (КМ) называется ***волокнистыми композиционными материалами (ВКМ)***.

ВКМ состоят из матричной составляющей и волокон-упрочнителей. Матрица ВКМ должна иметь прочную связь с волокнами, тогда она способна передать действующую внешнюю нагрузку на волокна. Кроме того, матрица обеспечивает оформление внешнего контура композитного изделия и требуемое качество поверхности.

Волокна ВКМ могут быть непрерывными или дискретными. В первом случае достигаются более высокие прочность и жесткость при сжатии (вдоль направления волокон в композите) и изгибе. ВКМ, упрочненные дискретными волокнами, более технологичны при формообразующих операциях, причем это их достоинство проявляется тем очевиднее, чем сложнее профиль изделия. Кроме того, технологичность ВКМ тем хуже, чем выше объемная доля волокон и чем они более хрупкие.

ВКМ подразделяют по схемам послойной ориентации волокон на одноосно-армированные (однонаправленные), ортогонально-армированные и армированные в нескольких заранее заданных направлениях.

ВКМ с металлической матрицей или волокнистые металлические композиционные материалы (ВМКМ), в отличие от ВКМ с другими, например полимерными матрицами, с ортогональным и многоосевым армированием не нашли широкого промышленного использования. Эффект частичного (в каждом из направлений) армирования оказывается невелик, когда используется металлическая достаточно прочная и жесткая матрица (по сравнению с полимерной).

Однако ВМКМ превосходят (при нагружении вдоль волокон) металлические материалы в несколько раз по прочностным и упругим характеристикам, а также по большинству эксплуатационных характеристик. Например, наиболее распространенный ВМКМ – бороалюминий – превосходит по прочности алюминиевые сплавы, как минимум, в 1,5 – 2 раза, а по модулю Юнга – в 3 – 3,5 раза. Жаропрочные ВМКМ (например, никель–вольфрам) превосходят жаропрочные сплавы по основной (одноименной) характеристике до 12 раз.

Тем не менее, одноосно армированные ВМКМ являются специализированными материалами и применяются для определенных групп номенклатуры машиностроительных деталей, в которых специфические достоинства этих материалов проявляются наиболее полно. Одноосно-армированные ВМКМ не могут претендовать на роль универсальных материалов, прежде всего потому, что обладают ярко выраженной анизотропией характеристик, в наибольшей степени – прочности и пластичности. ВМКМ уступают металлическим материалам по технологичности на всех этапах производства. Поэтому в последнее десятилетие активно развиваются разработки и производство изделий из комбинированных трехкомпонентных слоисто-волокнистых композиционных материалов. Третий компонент – металлические слои, обычно располагающиеся в поверхностных зонах изделий, вводят с различными целями. Для снижения анизотропии прочности используют слои высокопрочных сплавов (например, титановую фольгу для бороалюминия или фольгу из сплава 1201 для этого же композита). При необходимости получения сварных узлов в качестве материала

третьего компонента применяют сплавы с высокой свариваемостью. Для изготовления деталей сложных конфигураций материалом третьего компонента являются металлы и малолегированные сплавы, обладающие высокой пластичностью.

Технология производства изделий из ВМКМ может быть одно- или двухстадийной. Различие заключается в том, что в первом случае компактирование композита и формообразование изделия совмещают. Однако, в подавляющем большинстве случаев такие процессы существенно ограничивают габариты изделий, поэтому для длинномерных изделий используют второй вариант, когда на первой стадии компактируют заготовку, а на второй – производят ее формоизменение (гибка или свертывание или другие формообразующие операции).

Достижение заранее заданных высоких характеристик ВМКМ и изделий из них сопряжено с проектированием "внутренней конструкции" самих материалов и технологических процессов в единой системе и с учетом многих факторов.

Во-первых, необходимо обеспечить регулярный характер расположения волокон, так как только в этом случае внешняя нагрузка распределяется между волокнами равномерно. Регулярное расположение волокон обеспечивается предварительным объединением матричной составляющей и волокон (монослойные композитные пористые ленты плазменного напыления, в которых волокна располагаются параллельно в один ряд и с заданным шагом укладки, параллельные жгуты, содержащие 7 и более волокон, получаемые пропиткой расплавом матричного материала с последующей высокоскоростной кристаллизацией, а также ряд других возможных элементов сборных заготовок ВМКМ). Из лент или жгутов получают, как правило, многослойные сборные заготовки (в них в ряде случаев используют фольговые прокладки из матричного, в слоистых ВКМ – из другого металлического материала). В качестве поверхностных слоев используют наружную фольговую (или сварную листовую) оболочку для плоских заготовок, наружную трубчатую оболочку – для прутковых заготовок, а также наружную и внутреннюю трубчатые оболочки – для трубных композитных заготовок.

Во-вторых, при изготовлении изделий из конструкционных ВМКМ необходимо обеспечить сохранение сплошности и прочности волокон и сформировать прочное соединение составляющих материала. Поэтому температуру и время процесса (а при деформационной обработке – и давление) необходимо регламентировать так, чтобы достичь формирования прочного соединения составляющих ВМКМ и одновременно не вызвать разрушения волокон, их термического разупрочнения и химической деградации (за счет химического объемного взаимодействия с матричной составляющей). Для многих ВМКМ по вышеуказанным причинам приходится применять барьерные покрытия, препятствующие активному химическому взаимодействию на границе матрица–волокно, а при использовании химически инертных волокон, наоборот, приходится применять технологические покрытия, способствующие формированию связей составляющих ВМКМ. Покрытия на волокна наносят с помощью газо-, паро- или жидкофазных процессов.

ВМКМ – материалы настоящего и будущего, их достоинства реализованы далеко не полностью, потому что их история составляет всего 40 – 45 лет, а история промышленного производства – менее 35 лет. Однако уже сейчас эти материалы заняли достойное место в ряду высокоэффективных машиностроительных материалов. Наибольшее распространение ВМКМ получили в конструкциях отечественной и зарубежной космической и авиационной техники, в частности, для изготовления деталей планера (стрингерные профили, шпангоуты, лонжероны, элементы обшивки, усиливающие накладки и др.), подкосов, панелей, приборных щитков, трубчатых элементов ферменных конструкций, элементов управления полетом беспилотных средств – таков неполный перечень изделий из ВМКМ, прежде всего, из бороалюминия и трехкомпонентных материалов на его основе [1, 4]. Применение ВМКМ обеспечивает существенное снижение массы указанных деталей и узлов – на 20...66 %.

Уникальными характеристиками обладают также транспирационные ВМКМ (пористость 15...20 %), спрессованные из клубка проволочных волокон диаметром 0,6...1,2 мм, применяемые в авиационных противообледенительных системах. Кроме того, ВМКМ успешно используются в электротехнике, виброизолирующих, охлаждающих, антифрикционных и звукопоглощающих системах и конструкциях.

Глава 3.1

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

3.1.1. ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ СТАДИЯ

3.1.1.1. ПОДГОТОВКА И СОВМЕЩЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВМКМ

Основу механизма формирования композиционных материалов составляют процессы диффузии элементов, входящих в состав матрицы и упрочнителя. Эти процессы реализуются на границах раздела между слоями матричной составляющей, а также на границах матрица–волокно, поэтому состояние контактирующих поверхностей оказывает существенное влияние на динамику, существо процесса и на качество получаемого материала. Волокна (непрерывные нити, металлическая проволока либо волокнистые монокристаллы) перед объединением с матричной составляющей подвергают поверхностной очистке. Эта предварительная операция необходима, так как на поверхности волокон могут находиться замасливатели, остатки смазок, применяемых при изготовлении волокон, оксидные поверхностные слои малых толщин и др. Очистка поверхности металлических элементов осуществляется в щелочных или кислотных травильных растворах. Очистка других волокон осуществляется промывкой в обезжиривающих органических растворителях.

С целью повышения прочности соединения составляющих композита на волокна могут предварительно наноситься технологические (металлические и другие) покрытия. Волокна с покрытиями и тонкие фольги (например, алюминиевые) очищают химической промывкой или обезжириванием в ваннах с органическими растворителями. Механическую очистку используют в отдельных случаях, когда толщина матричных элементов (листов) 0,4 мм и более, причем после механической очистки, когда удаляются грубые частицы загрязнений или оксидные пленки большой толщины, следует химическая очистка или обезжиривание. Промывку осуществляют спиртом (с последующим прохождением волокон или матричных лент ванн с горячей и холодной водой и зоны сушки горячим воздухом), а также моющими растворами. Для обезжиривания, которое является наиболее распространенным в производстве композитов очистным процессом, используют бензин, ацетон, четыреххлористый углерод, трихлорбензол и другие растворители.

Механическую очистку осуществляют шлифовальной бумагой, проволочными щетками, абразивным инструментом.

При изготовлении композиционных материалов жидкофазными методами поверхностной обработке подвергают только упрочнитель. Волокна обрабатывают в травильных или моющих растворах с последующим прохождением ванн с водой и сушильной камеры. Более сложен процесс очистки нитевидных монокристаллов, как правило, загрязненных графитом, оксидом кремния, пылевидными частицами железа и др. Эти дискретные волокна, помимо химической очистки, могут подвергаться флотационной обработке, магнитной сепарации и другим операциям. В связи с более активно протекающими процессами химического взаимодействия составляющих при жидкофазных технологиях на волокна в большинстве случаев наносят барьерные покрытия, которые предотвращают химическую и термическую деградацию волокон [1]. Наиболее распространенными являются покрытия карбида или нитрида бора на борных волокнах, а также покрытия из борида титана на углеродных волокнах.

3.1.1.2. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ВОЛОКНА

Одним из способов достижения физико-химической совместимости компонентов в композиционных материалах является нанесение на армирующие волокна покрытий, которые обладают химической стойкостью в контакте с матрицами в условиях изготовления и эксплуатации ВМКМ. Однако чем выше химическая стойкость волокон с покрытиями, тем, как правило, сложнее обеспечить прочную связь между компонентами ВМКМ. Поэтому при разработке покрытий для армирующих элементов должны быть учтены не только их барьерные свойства, но и способность к образованию адгезионных связей.

По функциональному назначению различают покрытия барьерные и технологические [1]. Барьерные покрытия защищают волокна от окисления или активного химического взаимодействия с матричными сплавами и представляют собой термодинамически стойкие химические соединения (карбиды, оксиды, бориды, нитриды), играющие роль диффузионных

барьеров. Способы нанесения барьерных покрытий основаны обычно на процессах восстановительного синтеза (водородом) химических соединений в газовых смесях сложных исходных продуктов либо прямого синтеза соединений в парогазовой смеси из элементарных составляющих.

Технологические покрытия предназначены для улучшения смачивания волокон матричными расплавами, повышения работы адгезии или для пластифицирования волокон или для создания в ВМКМ пластичных слоев, повышающих диссипативные свойства материала. Технологическими покрытиями могут быть чистые металлы и химические соединения. Металлические покрытия на волокнах получают обычно осаждением из растворов и парогазовых сред, термическим разложением летучих соединений металлов, а также протягиванием волокон через ванны с металлическими расплавами. Покрытия в виде химических соединений получают газофазными способами или непосредственно в процессе производства ВМКМ при легировании металлических матриц добавками с большим сродством к элементам, входящим в состав волокон, и взаимодействующими с ними с образованием слоев тугоплавких фаз (карбидных, оксидных, нитридных).

Помимо этого, нанесение покрытий, особенно металлических большой толщины, может быть одним из способов изготовления монослойных полуфабрикатов слоистых и волокнистых композиционных материалов.

Металлические покрытия. Одним из наиболее распространенных методов нанесения металлических покрытий является химическое осаждение из растворов. Процесс основан на восстановлении ионов металла из водных растворов с помощью растворенного восстановителя. Таким образом получают покрытия из никеля и меди на волокнах углерода или карбида кремния. Назначение этих покрытий может быть различным: в качестве материала матрицы или промежуточных слоев в гибридных композициях, для защиты волокон от окисления или для предупреждения процесса карбидообразования. Данные о влиянии никелевых и медных покрытий на смачивание волокон металлическими расплавами противоречивы, вероятно, из-за морфологической нестабильности покрытий [1]. Перед нанесением покрытий волокна подвергают обработке в окислительной среде, сенсибилизации и активации с целью придания поверхности волокон каталитических свойств и достижения в последующем прочной связи покрытия с волокном. Температура растворов при нанесении покрытий не превышает 80 °С, длительность процесса при толщине покрытий до 2 мкм не более 4 мин. Покрытия не снижают прочности волокон. Напротив, имеются сведения о пластифицировании углеродных волокон при никелировании и последующей термообработке [1].

Покрытия из никеля и меди большой толщины получают электролитическим осаждением. При сложной многофиламентной структуре армирующих жгутов или лент метод применяют только для наращивания покрытий на волокнах, предварительно покрытых методом химического осаждения. В противном случае жгуты будут покрыты только снаружи корковым слоем.

Металлические покрытия на волокнах могут быть получены из паров металлов при их прямом физическом испарении (термическом, катодном, электронным лучом, ионными пучками и т.д.). Покрытие титана, нанесенное таким образом на углеродные волокна, улучшает их смачивание магниевыми расплавами.

Другим газофазным способом нанесения покрытий является осаждение при термическом разложении летучих металлоорганических соединений, например, карбонилов металлов. Разложение карбонила металла происходит по реакции

$$\mathrm{Me(CO)}_n \rightarrow \mathrm{Me} + n \cdot \mathrm{CO}\,.$$

Формирование покрытия является результатом ряда последовательных элементарных процессов: испарения (сублимации) карбонила, переноса, химических реакций в газовой фазе и на подложке, адсорбционно-десорбционных процессов на подложке, образования зародышей и роста кристаллов покрытия. Наряду с основной реакцией протекают и побочные, обусловливающие появление в покрытии оксидов и карбидов металла, а также свободного углерода. Изменяя параметры процесса осаждения (температуру нагрева карбонила в сублиматоре, температуру подложки, время осаждения), можно влиять на состав и структуру покрытия, что отражается на качестве связи компонентов в ВМКМ. Преимуществами карбонильного способа являются низкая температура процесса, высокая скорость нанесения покрытия, легкость металлизации внутренних поверхностей.

Таким образом получают покрытия из никеля, железа, тугоплавких металлов на нитевидных кристаллах, многофиламентных жгутах углерода, карбида кремния. Карбонильные покрытия из тугоплавких металлов улучшают смачиваемость волокон углерода расплавами легких металлов [2].

Химическим осаждением из газовой смеси хлорида тантала и водорода при температуре 1000 К получают танталовые покрытия на углеродных волокнах "Торнел 25" и "Модмор".

Покрытие позволяет осуществить самопроизвольную пропитку углеродных жгутов алюминиевыми расплавами.

Покрытия из сплавов алюминия, магния и других металлов с низкой температурой плавления можно получать протягиванием волокон через соответствующие расплавы. Условием формирования непрерывных покрытий является смачивание волокон расплавами. Свойства волокон с покрытиями определяются температурой процесса и длительностью контактирования волокна с расплавом.

Изменение относительной прочности на разрыв (рис. 3.1.1) волокон бора с покрытиями $\sigma_\tau / \sigma_{исх}$ и относительной массы волокон $m_\tau / m_{исх}$ после растворения покрытия в зависимости от длительности τ контактирования с расплавом алюминиевого сплава АД1 позволяет выделить на кинетических кривых два участка: I – прирост прочности $\left(\frac{\partial \sigma_\tau}{\sigma_{исх}} \Big/ \partial\tau > 0\right)$, которому соответствует уменьшение массы волокна $\left(\frac{\partial m_\tau}{m_{исх}} \Big/ \partial\tau < 0\right)$, или растворение волокна в расплаве; II – снижение прочности волокна $\left(\frac{\partial \sigma_\tau}{\sigma_{исх}} \Big/ \partial\tau < 0\right)$ и увеличение его массы $\left(\frac{\partial m_\tau}{m_{исх}} \Big/ \partial\tau > 0\right)$, связанное с формированием на межфазной поверхности продуктов химического взаимодействия боридных фаз. Повышение прочности волокон с покрытием при $\tau < \tau_{кр}$ связывают с уменьшением влияния действия концентраторов напряжений на поверхности борных волокон (зернограничных канавок) в результате избирательного растворения волокна в металлическом расплаве [3]. Очевидно, что металлизацию волокон следует проводить

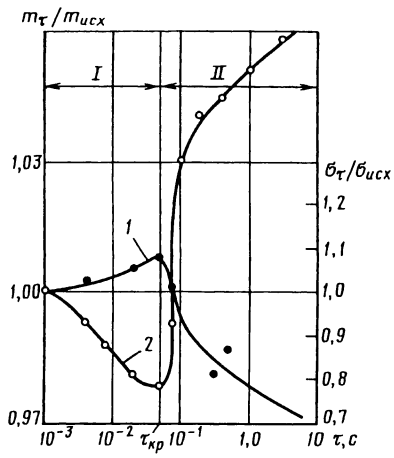


Рис. 3.1.1. Изменение относительной прочности на разрыв волокон бора с покрытием из сплава АД1 $\sigma_c/\sigma_{исх}$ (*1*) и относительной массы волокон после растворения покрытия $m_\tau/m_{исх}$ (*2*) в зависимости от длительности контактирования с расплавом τ, с. Температура расплава 940±5 К

при длительностях контактирования с расплавом, обеспечивающих сохранение исходной прочности волокон. Легирование расплавов элементами, влияющими на скорость растворения волокна в расплаве и формирование продуктов химических реакций, изменяет положение $\tau_{кр}$ и уровень прочности волокон с покрытиями. Алюминиевые покрытия на волокнах бора служат как барьерные при получении деталей или полуфабрикатов ВМКМ литейными методами или плазменным напылением матриц; как пластичные прослойки, облегчающие получение боралюминия методами обработки давлением; для улучшения адгезионной прочности в боропластиках.

Покрытия из химических соединений. Одним из наиболее широко применяемых барьерных покрытий является карбид кремния. Его наносят на волокна бора, углерода, металлические волокна химическим осаждением из газовой смеси, например, метилтрихлорсилана с водородом при температурах около 1473 К, или методом физического осаждения из пара. К числу распространенных относят борные волокна с покрытием SiC для изготовления ВМКМ с титановыми матрицами [1].

Методом химического осаждения из газовой смеси хлорида титана, метана и водорода при температуре 1323 К на волокна углерода наносят покрытие карбида титана. Проч-

ность волокон с покрытиями карбида кремния или карбида титана зависит от исходной пластичности волокон: волокна не разупрочняются при нанесении покрытий, если удлинение при разрыве менее 0,8 %, и разупрочняются при бóльших удлинениях [5]. Меньшее охрупчивающее влияние на волокна углерода оказывают покрытия из нитрида титана, получаемые химическим осаждением из газовой смеси хлорида титана и азота, и покрытия из пироуглерода, образующиеся при распаде метана в интервале температур 1473...1773 К [4]. Пироуглерод наносят в качестве подслоя перед нанесением покрытия из карбидов титана и кремния или нитрида титана для предотвращения распространения хрупких разрушений из покрытия в волокно.

Барьерные покрытия (ZrC, ZrO_2, H_fG, H_fO_2, TaC, Al_4C_3) тормозят развитие химического взаимодействия волокна и матричной составляющей композита. Наиболее эффективными являются покрытия карбида или оксида циркония.

К технологическим относят покрытия, обеспечивающие улучшение смачивания поверхности волокон расплавами матричных металлов и сплавов. Углеродные волокна протягивают через реактор, в который поступают газообразные хлориды титана и бора, а также пары цинка. В результате реакции восстановления при 873...1073 К формируется покрытие из титана, бора и диборида титана, которое хорошо смачивается алюминиевыми матричными расплавами. Покрытие из двуокиси кремния, наносимое на поверхность волокон карбида кремния, оказывает аналогичное влияние на формирование ВМКМ с алюминиевыми матрицами. Это покрытие получают из раствора тетратилортосиликата $Si(OC_2H_5)_4$ и тетрахлорида кремния $SiCl_4$ в толуоле. Предварительное нанесение аморфного углерода на волокно улучшает адгезию между волокном и покрытием.

3.1.2. ПРОЦЕССЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СОВМЕЩЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ

3.1.2.1. МЕХАНИЧЕСКАЯ СБОРКА И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Механическая сборка заготовок ВМКМ является наиболее простым методом. Ее вариантами являются намотка и укладка (пакетирование) с последующей фиксацией элементов. Намоткой успешно пользуются при получении листов и труб из ВМКМ, армированных проволочными волокнами диаметром 600 мкм и менее (преимущественно 150...300 мкм). Схема намоточного устройства весьма проста (рис. 3.1.2). Сборка ведется последовательной намоткой волокон с регламентированным шагом на пластину из матричного материала с последующей установкой к внешним сторонам пакета двух новых матричных пластин и последующей намоткой нового слоя волокон и т.д. до получения пакета требуемой толщины. Для фиксации концевых участков волокон в угловых участках пластин предусматривают отверстия диаметром 1,5...2,0 мм. Возможно получение пакетов с одноосной ориентацией волокон, а также с ортогональным (послойным) их расположением (в этом случае собранную часть пакета поворачивают на 90°, а затем продолжают намотку). Пластины фиксируют на элементах крепления, имеющих уголковое сечение, временными болтовыми соединениями. Окончательную фиксацию собранного пакета обеспечивают установкой заклепок по кромкам или сваркой (точечной либо роликовой) по контуру. При получении трубных заготовок все элементы устройства сохраняются, заменяются только элементы крепления, имеющие рабочие фланцы.

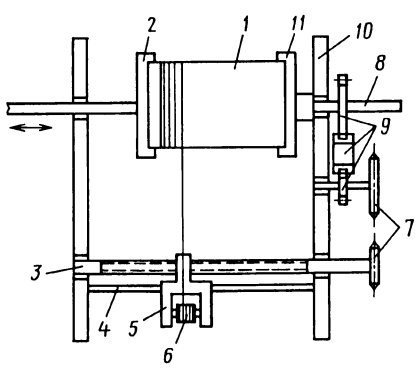


Рис. 3.1.2. Намоточное устройство для получения листовых заготовок из ВМКМ:
1 – центральная пластина пакета из матричного материала; *2* – свободно вращающийся элемент крепления, *3* – ходовой винт, *4* – направляющая ось, *5* – каретка; *6* – катушка с волокном, *7* – передача; *8* – ведущий вал; *9* – система зубчатых передач; *10* – станина; *11* – приводной элемент крепления [1]

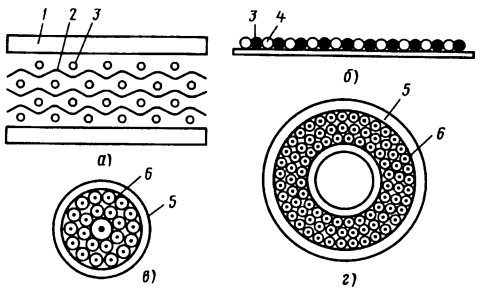


Рис. 3.1.3. Схемы плоских (*а*, *б*), цилиндрической (*в*) и трубчатой (*г*) заготовок, получаемых укладкой:
1 – плоский матричный элемент;
2 – гофрированный элемент; *3* – армирующие волокна;
4 – прокладочные волокна из матричного материала;
5 – трубчатые оболочки из матричного материала,
6 – армирующие волокна с покрытием
из матричного материала [1]

Укладкой (рис. 3.1.3) получают плоские, цилиндрические, трубчатые и фасонные заготовки небольших габаритных размеров, при этом для упорядоченного размещения армирующих элементов применяют гофрированные матричные фольги или пластины (рис. 3.1.3, *а*), прокладочные волокна из матричного материала (рис. 3.1.3, *б*) либо волокна с покрытием из матричного материала (рис. 3.1.3, *в*, *г*). В случаях *а*, *б* фиксация элементов такая же, как в ранее рассмотренном варианте получения заготовок намоткой, в случаях *в* и *г* для фиксации к торцам (по контуру) приваривают соответственно диски и кольца из матричного материала. При укладке можно реализовать практически любые схемы армирования.

Деформационные процессы используются при получении предварительно совмещенных ленточных элементов, состоящих из матричной фольги и вдавленного в нее одного ряда волокон (глубина вдавливания около половины диаметра сечения волокон), расположенных с определенным шагом. Для получения этих элементов можно использовать впрессовывание волокон в фольгу (предпочтительно в режиме сверхпластического состояния матричной составляющей ВМКМ); термокомпрессионное внедрение волокон в матричный элемент. При получении длинномерных лент ряд волокон (с катушки) и фольга (с разматывателя) проходят нагревательную камеру и пропускаются через нагретые давильные ролики, при этом происходит вдавливание волокон в фольгу. Получаемая лента свертывается в рулон на тянущей приемной моталке [1].

3.1.2.2. СКЛЕИВАНИЕ

При использовании исходных матричных элементов в виде фольги алюминиевых, титановых, магниевых или никелевых сплавов фиксация волокон после намотки может осуществляться склеиванием. Для этой цели применяют клей на основе толуола с добавками полистирола и диэтилового эфира.

Технология изготовления монослойных полуфабрикатов состоит в следующем. На барабане намоточного станка фиксируется слой фольги. На фольгу с заданным шагом наматывается слой волокон, концевые участки которых закрепляют с помощью клейкой ленты. Затем на волокна наносят один или два слоя клея. После сушки в вытяжном шкафу (около 3 мин) образующаяся на поверхности пленка приобретает прочность и эластичность, достаточные для выполнения операций съема монослойной заготовки с барабана, ее раскроя и укладки в пакетную заготовку. Уплотнение пакета, собранного из монослойных лент с фольговой матрицей, осуществляют в три стадии: предварительная подпрессовка пакета (давление 1...2 МПа), отжиг в течение 30 мин при температуре 710...730 К в воздушной атмосфере или в вакууме, окончательное уплотнение пакета прессованием или прокаткой. Отжиг по указанному режиму обеспечивает полное удаление продуктов разложения клея. Однако следует учитывать, что при производстве компактных полуфабрикатов деталей с габаритными размерами более 2000 мм, а также деталей любых размеров с послойно перекрестным расположением волокон удаление продуктов разложения клея может быть неполным из-за большой длины или замкнутости капиллярных микрополостей в межволоконном пространстве. В таких случаях нужно компактировать прессованием или прокаткой каждый проклеенный монослойный полуфабрикат в отдельности, а затем соединять уплотненные слои диффузионной сваркой или прессованием.

3.1.2.3. ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Плазменное напыление, широко используемое для нанесении покрытый, нашло применение и в производстве монослойных пористых лент – полуфабрикатов. Плазма – частично или полностью ионизированный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц. Носителями зарядов в плазме являются электроны и положительные

ионы. В плазме также присутствуют неионизированные атомы или молекулы. Плазма подчиняется большинству газовых законов, однако она отличается от газа электропроводностью и взаимодействием с магнитными полями. Для плазменного напыления применяют так называемую низкотемпературную плазму, которая характеризуется повышенной плотностью и относительно низкой температурой 10 000...20 000 К [4]. Эта плазма характеризуется значительной энтальпией и способностью быстро нагревать и сообщать высокую скорость напыляемым частицам.

Для генерации плазмы используют дуговые плазмотроны (рис. 3.1.4), в которых дуговой электрический разряд возбуждается между стержневым катодом и кольцевым анодом. Нагретый и ионизированный в столбе дуги газ (с помощью продувки плазмообразующего газа вдоль столба разряда) выбрасывается с большой скоростью из сопла кольцевого анода, формируя плазменную струю. В качестве плазмообразующего газа используют аргон, азот, водород, гелий, аммиак и их смеси. В современных установках плазменного напыления скорость истечения плазменной струи в несколько раз превышает скорость звука.

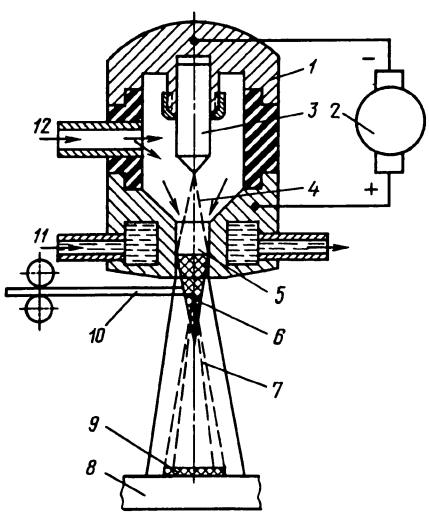


Рис. 3.1.4. Схема работы дугового плазмотрона:
1 – плазмотрон; *2* – источник электропитания; *3* –вольфрамовый катод, *4* – дуга, *5* – сопло анода, *6* – плазменная струя, *7* – поток напыляемых частиц, *8* – упрочняющее волокно или подложка, на которую производится напыление; *9* – напылительный материал; *10* – распыляемая проволока или порошок, *11* – охлаждающая вода; *12* – плазмообразующий газ

Напыляемый материал (порошок или проволока) вводится в плазменную струю, где нагревается, плавится, ускоряется и распределяется в газовом потоке. Образуется струя плазмы или нагретого газа, в которой движутся напыляемые частицы размером от 10 до 150 мкм. При ударе о поверхность напыления (в том числе волокон) частицы деформируются и, накладываясь друг на друга, образуют слой напыленного материала.

Свойства напыленного материала зависят от распределения частиц в потоке как по массе и скорости, так и по энергетическому состоянию. Важным условием осуществления процесса является создание потоков с заданным распределением и энергией частиц.

Существенным преимуществом плазменного напыления является быстрый нагрев и охлаждение частот. Длительность нагрева частиц составляет $10^{-2}...10^{-4}$ с, охлаждения – $10^{-2}...10^{-7}$ с, что позволяет получать скорости охлаждения материала частиц порядка $10^{6}...10^{9}$ К/с. Столь высокие скорости нагрева и охлаждения частиц дают возможность тонко регулировать состав и строение напыленного материала, получая равномерное распределение исходных компонентов и мелкокристаллическую или аморфную структуру. Нагрев частиц в плазме регулируется таким образом, чтобы обеспечить полное растворение и равномерное распределение элементов, составляющих данный сплав.

В процессе напыления в двухфазном потоке происходит взаимодействие между частицей и плазмообразующим газом. Вследствие высокой температуры газа это взаимодействие протекает быстро и в зависимости от состава газа может вести к образованию новых веществ – нитридов, оксидов, карбидов и других соединений. Поэтому состав газа двухфазного потока и его химическая активность являются важными параметрами получения и свойств напыленного материала. Различают три вида плазменного напыления: 1) напыление в атмосфере воздуха; 2) напыление в камере с контролируемой газовой атмосферой нормального давления; 3) напыление в камерах с пониженным давлением или с контролируемой по составу атмосферой.

Напыление в атмосфере приводит к взаимодействию частиц с окружающими газами и образованию оксидов и нитридов, вызывающих упрочнение и повышение жаростойкости металла или сплава.

Для более тонкого регулирования состава и структуры напыленного материала процесс ведут в камере с контролируемым составом атмосферы. Обычно для заполнения камеры применяют инертный газ (аргон) с необходимыми для получения заданного состава напыленного материала добавками активных газов (кислород или азот).

Еще более высокое качество напыленного материала можно получить, если вести процесс в камере с пониженным давлением. В такой камере осуществляется постоянная откачка газа и одновременно происходит нагнетание плазмообразующего газа из горящего в камере плазмотрона. Разрежение в камере определяется скоростью откачки и скоростью поступления плазмообразующего газа и обычно составляет $(0{,}133...2{,}66) \cdot 10^3$ Па. Атмосфера формируется из плазмообразующего газа. Откачиваемый газ сбрасывается в атмосферу или поступает на регенерацию, и процесс напыления происходит по замкнутому циклу. Благодаря пониженному давлению в камере напыляемый материал рафинируется, подвергается дегазации, приобретая высокие эксплуатационные свойства.

Плазменным напылением получают матрицы из алюминия и его сплавов, титана и его сплавов, хромоникелевых сплавов.

3.1.2.4. ПРОЦЕССЫ САМОПРОИЗВОЛЬНОЙ ПРОПИТКИ И ПРОТЯГИВАНИЕ ВОЛОКОН ЧЕРЕЗ МАТРИЧНЫЙ РАСПЛАВ

Жидкофазные процессы изготовления ВМКМ основаны на методах самопроизвольной и принудительной пропитки. При самопроизвольной пропитке движущей силой течения расплава в капиллярно-пористом каркасе является физико-химическое взаимодействие компонентов (смачивание, растекание вследствие химической реакции и др.), при принудительной – внешнее воздействие на расплав или частицы наполнителя (давление сжатого газа, механическое усилие, центробежные силы, высокоскоростное замешивание частиц наполнителя в матричный расплав и др.)

Самопроизвольная пропитка. Методы самопроизвольной пропитки включают следующие операции: совместный или раздельный нагрев матричного сплава и каркаса из частиц или волокон наполнителя, совмещение расплава и каркаса, выдержку до окончания пропитки и охлаждение. Разновидности метода, как правило, определяются способом совмещения (введения в контакт) матричного расплава и упрочнителя. Эта операция может быть реализована заливкой расплава в форму с размещенным в ней армирующим каркасом, погружением каркаса под зеркало матричного расплава или помещением нижнего торца каркаса в расплав. Сами каркасы при этом могут быть не связанными, а просто размещенными в литейной форме или предварительно агрегатированными, связанными (в этом случае использование литейной формы необязательно). Предварительно агрегатированные заготовки часто используют для локального армирования литых деталей, размещая их перед заливкой в рабочей полости формы таким образом, чтобы обеспечить армирование тех частей детали, которые подвергаются наибольшим эксплуатационным воздействиям (наибольшие нагрузки, температуры, износ и т.п.).

Схемы самопроизвольной пропитки показаны на рис. 3.1.5.

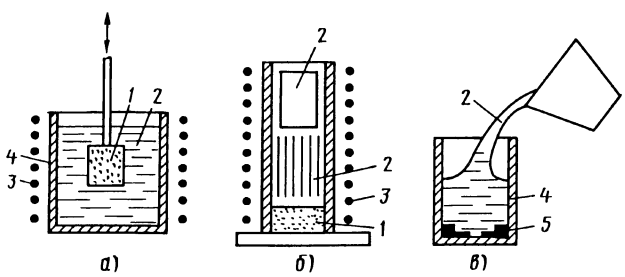


Рис. 3.1.5. Схема самопроизвольной пропитки:
а – с погружением каркаса под зеркало матричного расплава, *б* – с совместным нагревом каркаса и матричного расплава и пропиткой сверху, *в* – с заливкой сверху и с использованием предварительно агрегатированной вставки для локального армирования детали, *1* – каркас волокон; *2* – расплав матрицы ВМКМ, *3* – нагревательные элементы, *4* – литейная форма, *5* – пористая вставка литейной формы

Недостатком метода является малая скорость пропитывания, а следовательно, длительные выдержки, в результате чего в системе матрица–наполнитель могут развиваться нежелательные процессы взаимодействия компонентов. По этой причине методы самопроизвольной пропитки получили наибольшее применение при изготовлении псевдосплавов и керметов, где процессы взаимодействия не играют решающей роли, а также при изготовлении проволоки-полуфабриката методом протягивания волокон через расплав. В этом случае поперечная пропитка пучка волокон (жгута) небольшого сечения реализуется за несколько секунд.

Принудительная пропитка. Метод заключается в протягивании волокнистого наполнителя через матричный расплав. Он используется для изготовления непрерывной проволоки-полуфабриката ВМКМ с матрицами из алюминиевых, магниевых и других сплавов и армирующими углеродными, борными, стальными и другими волокнами. Метод заключается в подготовке пучка волокон, протягивании его через ванну с матричным расплавом, дальнейшем протягивании пропитанного пучка через формообразующее устройство и кристаллизатор. Полученная таким образом проволока-полуфабрикат наматывается на приемную бобину или подвергается мерной резке.

При использовании в качестве армирующих упрочнителей моноволокон большого диаметра (бора, стали, карбида кремния и др.) применяют специальные подающие устройства, включающие в себя набор шпуль с исходными волокнами и распределительное устройство, обеспечивающее разобщение волокон перед входом их в матричный расплав. Распределитель обычно представляет собой плиту со сквозными отверстиями для прохода моноволокон; оси отверстий расположены по образующим воображаемого конуса, вершина которого находится при входе в кристаллизатор (рис. 3.1.6). Такая конструкция облегчает заполнение матричным расплавом пустот между волокнами и получение плотных бездефектных полуфабрикатов.

При использовании в качестве армирующего наполнителя жгутов из волокон небольшого диаметра (углеродных, поликристаллических, карбидокремниевых, оксидных и др.) необходимо обеспечить улучшенное смачивание в системе, так как разобщить волокна

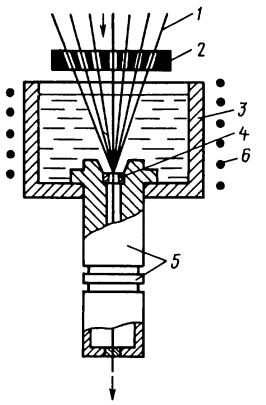


Рис. 3.1.6. Схема установки вертикального типа для изготовления проволоки-полуфабриката протяжкой пучка моноволокон через матричный расплав:
1 – пучок волокон; *2* – распределительное устройство, *3* – тигель с матричным расплавом, *4* – формообразующее устройство, *5* – кристаллизатор, *6* – нагреватель

в жгуте обычно не удается. В этом случае в технологический процесс изготовления полуфабриката дополнительно включаются технологические операции для предварительной обработки волокон. Используют два типа обработки: нанесение защитных покрытий и модифицирование.

Примером первой группы процессов является так называемая титаноборидная технология изготовления полуфабрикатов из углеалюминия, впервые разработанная американскими фирмами Aerospace Corp. и FmI. Углеродный жгут, включающий до 10 – 11 тыс. моноволокон, сначала пропускают через газовый реактор, где из смеси ($TiCl_4$ + BCl_3) в присутствии паров цинка на волокна наносят покрытие толщиной до нескольких сотых микрона (наличие паров цинка обеспечивает пленочный, а не сферолитный характер осаждения покрытия). Покрытие состоит из сложного набора боридов и карборидов титана и легко смачивается металлическими расплавами при условии отсутствия контакта с воздухом (волокна с покрытием нельзя выносить на воздух до протяжки через матричный расплав).

Вторая стадия технологического процесса – протяжка жгута через матричный расплав и формообразующую фильеру и охлаждение полуфабриката (рис. 3.1.7). Процесс обеспечивает изготовление непрерывной проволоки-полуфабриката сечением в несколько квадратных миллиметров с объемной долей волокон 0,35...0,5.

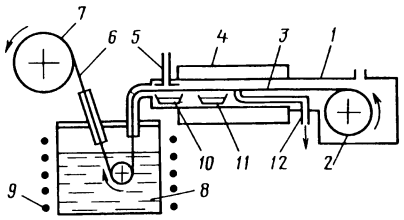


Рис. 3.1.7. Схема титаноборидного процесса для изготовления проволоки-полуфабриката протяжкой углеродных жгутов через матричный расплав:
1 – камера с инертной средой, *2* – катушка с углеродным жгутом, *3* – углеродный жгут, *4* – реактор для нанесения покрытия, *5* – ввод инертного газа, *6* – проволока-полуфабрикат, *7* – приемная катушка, *8* – ванна с матричным расплавом, *9* – печь с инертной средой, *10* – титановый порошок, *11* – жидкий цинк, *12* – отвод хлоридов

Нанесение защитных технологических покрытий иногда осуществляют и при изготовлении полуфабрикатов из моноволокон, например, борных. В этом случае для улучшения смачивания на борные волокна перед протягивавшем через матричный расплав наносят покрытие из нитрида бора, пропуская волокна последовательно через камеры окисления и азотирования. Используя волокна с такими покрытиями, можно не применять устройства для разобщения волокон перед входом в расплав, а также увеличить количество волокон в полуфабрикате, не усложняя конструкцию шпулярника (перемотка нескольких волокон, разложенных в ленту на одной шпуле).

Модифицирование поверхности углеродных и других волокон, обеспечивающее их смачивание металлическими расплавами, реализуется при так называемой натриевой технологии.

Способ заключается в последовательном пропускании армирующих волокон через ванны с жидким натрием (~ 823 К), сплавом Sn–2 % Mg (873 К) и с матричным расплавом, например, алюминиевым, при температуре, на 20...50 °С превышающей температуру ликвидуса. После затвердевания расплава при выходе из последней ванны получают проволоку-полуфабрикат (рис. 3.1.8). Обработка натрием приводит не только к очистке поверхности волокон от сорбированных элементов и групп, но и к модификации химического состава поверхностного слоя волокон.

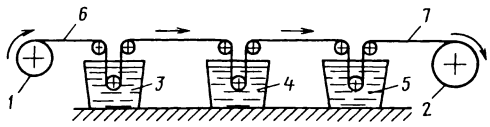


Рис. 3.1.8. Схема натриевого процесса для изготовления проволоки-полуфабриката протяжкой жгутов волокон через матричный расплав:
1, 2 – подающая и приемная катушки, *3* – ванна с жидким натрием, *4* – ванна с расплавом Sn–Mg, *5* – ванна с матричным расплавом; *6* – исходный жгут, *7* – проволока-полуфабрикат

Проволока-полуфабрикат, изготовляемая методом протягивания волокон через матричный расплав, перерабатывается в конечный продукт следующими способами:

1) горячим прессованием пакета, выложенного из элементов мерных заготовок (лист, полоса, простой профиль и др.);

2) жидкофазным соединением набора непрерывных заготовок при пропускании их через ванну с расплавом (полоса, профиль и др.);

3) намоткой с горячей прокаткой для внешнего упрочнения (сосуды высокого давления, гидроцилиндры и т.п.).

Методы пропитки при протягивании волокон через матричные расплавы позволяют получать изделия разнообразных сечений практически неограниченной длины, регулировать в широких пределах время контакта волокон с расплавом, процессы производства легко поддаются автоматизации. Недостатки этих методов связаны с их сравнительно невысокой производительностью из-за малых сечений получаемых полуфабрикатов, дороговизной в случаях, когда необходимо нанесение качественных защитных технологических покрытий, ограниченностью номенклатуры ВМКМ, подходящих для изготовления этими методами.

3.1.3. ПРОЦЕССЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

3.1.3.1. ТВЕРДОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Твердофазные процессы подразделяют на статические, динамические и импульсные. К статическим процессам относят: диффузионную сварку, термокомпрессионное, гидро- и изостатическое компактирование, прессование

и статическую формовку. К динамическим процессам относят: прокатку, волочение, динамическое горячее прессование, роликовую и вальцовочную формовку. К импульсным относят: сварку взрывом, магнитно-импульсное, гидро- и электроимпульсное компактирование. Процессы, в ходе которых происходит пластическая деформация матричной составляющей (при введении в матрицу нехрупких волокон пластической деформации может подвергаться и эта составляющая ВМКМ), обеспечивают возможность формирования ВМКМ при умеренных температурах без применения барьерных покрытий на волокнах, что упрощает и удешевляет производство. Кроме того, твердофазные процессы позволяют получать полуфабрикаты и изделия из ВМКМ с более высокими характеристиками качества поверхности. При изготовлении более технологичных трехкомпонентных слоисто-волокнистых КМ (неармированные зоны в сочетании с армированными) применяют только твердофазные процессы.

При осуществлении рассматриваемых процессов необходимо регламентировать время, температуру и давление таким образом, чтобы обеспечить формирование прочных связей по границам матрица–матрица и волокно–матрица и в то же время избежать термической, химической или механической деградации волокон.

В большинстве случаев волокна конструкционных ВМКМ малопластичны или хрупки, а также химически инертны (и поэтому для формирования прочного соединения по границам волокно–матрица требуется достаточно большое время выдержки под давлением при умеренной температуре), в связи с чем наибольшее распространение получили статические твердофазные процессы. Для получения и обработки ВМКМ с относительно высокой технологичностью целесообразны более производительные динамические и импульсные твердофазные процессы.

3.1.3.2. ЖИДКОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В большинстве случаев при производстве ВМКМ с использованием процессов пропитки упрочняющего компонента матричным расплавом форма и размеры получаемой отливки максимально приближаются к требуемым размерам готовой детали. По технологии протяжки через расплав получают полуфабрикаты в виде жгутов, полос и других профилей, из которых можно изготовлять детали и элементы конструкций путем формообразования в твердом, твердожидком или жидком состояниях.

Жидкофазные процессы формообразования используют в указанных ниже случаях.

Изготовление деталей сложной формы из монослойных полуфабрикатов прессованием в закрытых пресс-формах. Температура прессования при этом превышает температуру солидуса матричного сплава, давление прессования для ВМКМ с алюминиевой матрицей составляет 0,5...1,0 МПа, время прессования при этой температуре составляет 10...20 с. Такие режимы прессования рекомендуются для ВМКМ, компоненты которых активно взаимодействуют при температурах жидкого состояния матрицы, например, алюминий–борсик, алюминий–стальная проволока и др. Для ВМКМ, компоненты которых взаимодействуют не столь активно (алюминий–волокна карбида кремния, алюминий–углеродное волокно) либо не взаимодействуют (магниевый сплав–борное волокно), температура обработки может быть доведена до точки ликвидуса матричного сплава и несколько выше.

Изготовление полуфабрикатов в виде листов, полос, профилей различных сечений. При этом исходным материалом служат монослойные плоские листы и ленты, получаемые протяжкой через расплав, плазменным напылением или химическим осаждением матрицы, а также жгуты любого поперечного сечения. Технологический процесс заключается в шаговом прессовании в пресс-форме открытого типа с последовательным перемещением обжимаемого участка. Рекомендуемые режимы обработки – те же, что и в предыдущем случае.

Прессование (штамповка) деталей из заготовок ВМКМ, армированных дискретным упрочнителем, например, нитевидными кристаллами или частицами тугоплавких соединений (карбида кремния или оксида алюминия). Нагрев заготовки до температуры твердожидкого состояния матрицы в этом случае позволяет сохранить целостность волокнистого упрочнителя и существенно снизить давление формообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волокнистые** композиционные материалы с металлической матрицей / Под ред. М.Х. Шоршорова. М.: Машиностроение, 1981, 272 с.

2. **Шоршоров М.Х., Чернышева Т.А., Савватеева С.М., Кобелева Л.И.** // Физика и химия обработки материалов. 1980, № 4, С. 124 – 130.

3. **Chernyshova T.A., Tylkina, Gevlich S.O.** Jnteraction of Boron Fibres with Aluminium Melt during Metallization. J. of Mater. Sci., 1988, vol. 23, № 6, p. 1981 – 1984.

4. **Honjo K., Shindo A.** Jnterfacial Behavior of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Ceramics – Coated Carbon Fibres. Composite interfaces. Proc. 1-st ICCI, Cleveland, Oh., 1986, p. 181 – 187, Elsevier Publish. Co.

5. **Weisweiler W., Nagel G.** SiC – Coatings on Carbon Fibres by RF-Sputtering. Fourth Jntern. Conf. "Carbo". Baden-Baden, 1986, Proc., p. 646 – 651.

Глава 3.2

ЭЛЕМЕНТЫ СБОРНЫХ ЗАГОТОВОК

3.2.1. МОНОСЛОЙНЫЕ ЛЕНТЫ-ПОЛУФАБРИКАТЫ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Плазменное напыление является наиболее развитым процессом получения монослойных лент-полуфабрикатов. Металлические частицы наносятся плазменным потоком на волокна, намотанные на барабан, или на сетку из волокон, уложенную на плоское основание. Толщина получаемых лент-полуфабрикатов (они имеют другое название – монотайпы) составляет 100...280 мкм, ширина – 10... 1000 мм. Схемы получения лент-полуфабрикатов представлены на рис. 3.2.1.

Плазменное напыление используют и для производства композитных изделий. В этом случае дискретные волокна вводят в крупные напыляемые частицы (размер частиц

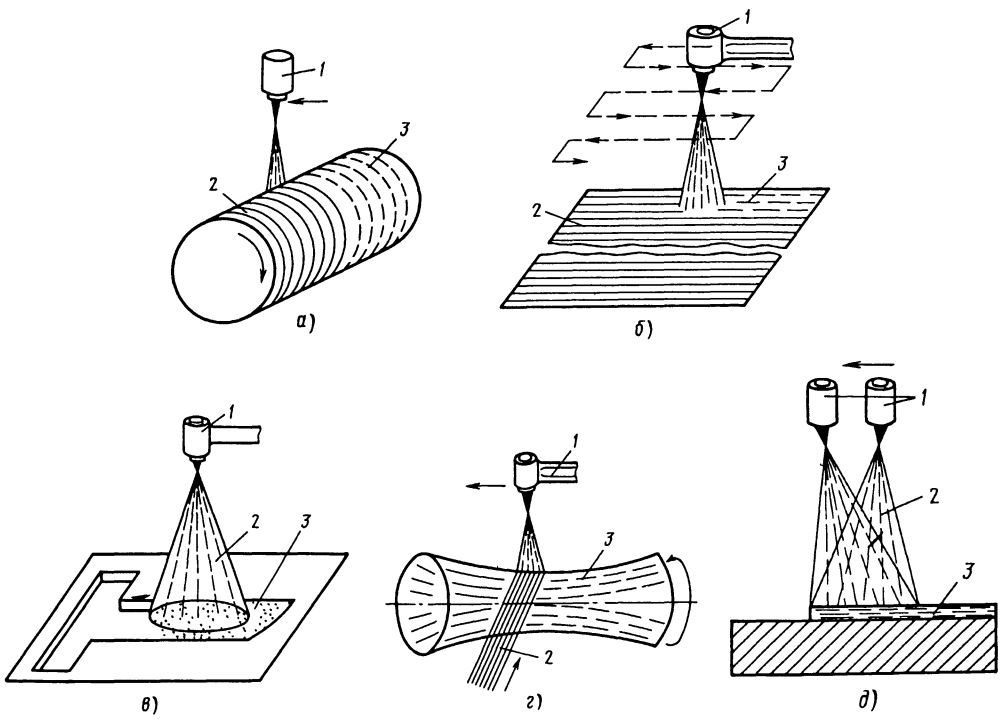


Рис. 3.2.1. Схемы получения полуфабрикатов композиционных материалов плазменным напылением: *1* – плазмотрон; *2* – упрочнитель; *3* – напыленная матрица, *а* – напыление металла матрицы на волокно, намотанное на барабан; *б* – напыление металла матрицы на ткани или сетки, *в* – получение полуфабриката заданной конфигурации напылением на форму; *г* – изготовление объемных деталей по удаленным моделям чередованием навивки волокна и напыления металла матрицы, *д* – одновременное напыление упрочнителя одним плазмотроном и металла матрицы другим плазмотроном

150...200 мкм). Схема процесса представлена на рис. 3.2.1, *в*. Для изготовления изделий сложной формы применяют послойную укладку или навивку волокон с последующим напылением каждого слоя материалом матрицы (рис. 3.2.1, *г*).

Напылением двумя плазмотронами (рис. 3.2.1, *д*) (в одно пятно напыления) обеспечивают возможность изготовления полуфабрикатов, в которых обе составляющие (и матрица, и волокна) формируются плазменным процессом. В этом случае волокнистые упрочняющие частицы оксидов (например, оксида алюминия или диоксида циркония) являются предпочтительными, такие волокна используют в сочетании с высокотемпературными металлами, т.е. при получении жаропрочных ВМКМ. Преимуществом рассматриваемого процесса является возможность регулировать соотношение составляющих по любой заданной программе.

Напыленная упрочняющая фаза имеет дискообразную (тарельчатую) форму, поэтому материал в этом случае имеет более высокую степень изотропности характеристик, чем материал, упрочненный волокнами.

Преимуществом плазменного метода получения лент-полуфабрикатов является возможность ограничивать длительность термического и механического действия напыляемых частиц на волокна до $10^{-2}...10^{-4}$ с, поэтому между составляющими ВМКМ успевает пройти только частичное поверхностное взаимодействие. Кратковременность процесса ограничивает также процессы рекристаллизации и диффузионного массопереноса с образованием зародышей новых фаз.

Напыленная плазмой матрица получается пористой (относительная плотность 85...95 %). Для уплотнения и упрочнения напыленной матрицы, а также для формования готового изделия из плазменных полуфабрикатов применяют последующий этап компактирования горячим прессованием или горячей прокаткой либо осуществляют пропитку металлическими расплавами или полимерными составами.

3.2.2. ЖГУТЫ ВОЛОКОН, ПРОПИТАННЫЕ РАСПЛАВОМ МАТРИЧНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Жгуты волокон, пропитанные расплавом матрицы, представляют собой, как правило, полуфабрикаты для последующего изготовления более сложных композитных изделий с более строгим обеспечением заданной укладки волокон в матрице при отсутствии окисления и загрязнения контактных поверхностей компонентов материала [4]. Эти полуфабрикаты весьма разнообразны – от одного волокна с нанесенным матричным покрытием до десятков, сотен и тысяч волокон в зависимости от специфики применяемых технологий и стадийности создания элементов композитных конструкций (рис. 3.2.2).

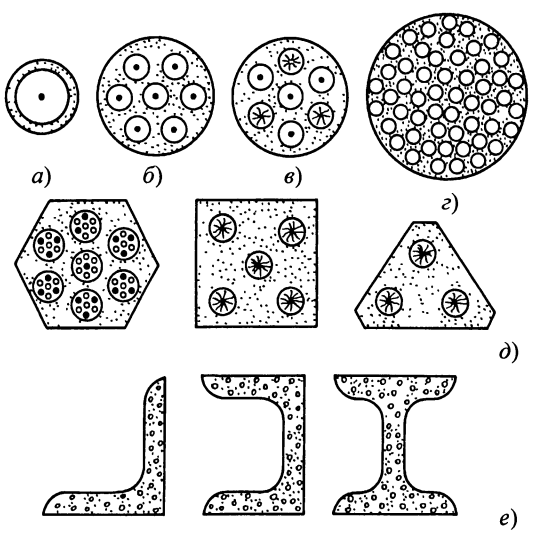


Рис. 3.2.2. Армированные композиционные жгуты:
а – моноволокно с металломатричным покрытием; *б* – семиволоконный жгут с волокнами одного типа, *в* – семиволоконный жгут с волокнами двух типов, *г* – многофиламентный жгут, пропитанный металлом, *д* – металлические прутки, армированные моноволокнами или тонкими жгутами, *е* – профили, армированные волокнами или тонкими жгутами

Металлические матричные материалы. В качестве металломатричных материалов для жгутов наиболее широко применяют технический алюминий и его сплавы марок АМц, АМг2, АМг6, АД33, АВ, 1201, Д20, Д16, В95 и др. Эти материалы при нормальных условиях обладают рядом преимуществ: широкий спектр прочностных характеристик (временное сопротивление разрыву 60...750 МПа), высокая пластичность, способность к релаксации напряжений, низкая плотность, хрупкость оксидной пленки, технологичность при различных видах механической обработки, высокая свариваемость, коррозионная стойкость.

Магниевые сплавы марок МА2-1, МА5, МА8 и некоторые другие в качестве металломатричного материала используют для получения композитных жгутов с малой плотностью.

В случаях необходимости сохранения высоких прочностных характеристик при повышенных температурах используют титановые сплавы типа ВТ или ОТ [4], однако по технологичности (и особенно при горячем деформировании) они заметно уступают алюминиевым матрицам.

Материалы для армирования жгутов. В качестве арматуры в жгутах могут быть использованы непрерывные волокна, представленные в разнообразных формах (крученые и некрученые нити, пряжи, проволока и др.).

С металлическими матрицами хорошо сочетаются тонкие проволоки из стали, вольфрама, бериллия, молибдена и других металлов и сплавов, обладающие изотропией механических характеристик.

Проволочные волокна из сталей являются самыми доступными. Их основное преимущество заключается в достижении высокой прочности на основе термомеханического упрочнения и присущей некоторым сталям коррозионной стойкости. Однако стальные и бериллиевые проволочные волокна пригодны только для композитов, эксплуатируемых при низких и умеренных температурах.

Проволочные волокна на основе вольфрама [5] и молибдена пригодны для композитов, эксплуатируемых при умеренных и высоких температурах. Волокна на основе вольфрама обладают высокотемпературной прочностью и повышенным сопротивлением ползучести. Молибденовые проволочные волокна несколько уступают вольфрамовым по прочностным и упругим характеристикам, а также по жаропрочности.

Среди неметаллических волокон предпочтительны борные и углеродные волокна с ярко выраженной анизотропией механических свойств, а также волокна карбида кремния. В качестве перспективных рассматриваются базальтовые и сапфировые волокна. По форме борные волокна представляют собой некрученые нити. Преимущества борных волокон заключаются в том, что они обладают повышенной сдвиговой жесткостью, а композиты на их основе имеют высокие прочностные (при растяжении и сжатии) и усталостные характеристики, высокий модуль упругости, пониженные тепло- и электропроводность.

Углеродные волокна выпускаются в виде крученых нитей или в виде пряжи. Среди волокон углеродные волокна выделяются уникальными электрофизическими свойствами – от полупроводников до проводников. Композитам углеродные волокна могут придавать по ряду показателей уникальные механические и физико-химические свойства (повышенную теплостойкость, низкий коэффициент линейного термического расширения и некоторые другие).

Волокна карбида кремния применяют, как правило, в металлокомпозитах, предназначенных для эксплуатации при высоких температурах.

Методы получения композитных жгутов. Нанесение покрытий на волокна. Металлические покрытия на волокнах (см. рис. 3.2.2, *а*) могут быть получены следующими способами: протягиванием волокон через расплав, гальваническим или химическим осаждением материала покрытия на волокна в растворах, осаждением в газовой среде при разложении летучих химических соединений, распылением материала покрытия.

Так, матричное покрытие, наносимое путем протягивания через расплав алюминия (или сплавов на его основе) волокон бора, бора с покрытием карбида кремния, а также карбидокремниевых волокон, позволяет существенно стабилизировать прочность волокон.

Но, как правило, на волокна наносят не матричное, а барьерное покрытие, которое позволяет защитить материал волокна в условиях эксплуатации или в процессе получения полуфабрикатов от собственной химической активности или от чрезмерной химической активности матричных расплавов, приводящей в конечном счете к деградации механических свойств волокон [3, 5].

Метод химического осаждения материала покрытия на волокна в растворах довольно широко применяют для получения никелевого барьерного покрытия на углеродных волокнах [3], а гальваническое покрытие медью, никелем и хромом весьма эффективно для молибденовых проволочных волокон при их пластифицировании.

Покрытие углеродных волокон тугоплавкими металлами наилучшим образом достигается при использовании метода термического разложения летучих карбонилов [3]. Более эффективными металлическими покрытиями для углеродных волокон являются хром, молибден и вольфрам, а также покрытия карбида кремния, карбида титана, диборида титана, нитридов титана или циркония.

Метод распыления покрытия нашел применение для получения барьерных покрытий (карбида титана и гафния, оксидов алюминия и гафния) на вольфрамовых волокнах.

Метод полунепрерывного литья довольно широко известен в металлургии, а применительно к конструкционным композитам используется при изготовлении полуфабрикатов, имеющих постоянное поперечное сечение.

Так, например, можно изготовлять высококачественные семиволоконные жгуты [6] разной иерархии укладки волокон (см. рис. 3.2.2, *б*, *в*), которые по гибкости мало уступают исходным нитям и весьма удобны для последующего изготовления изделий. В дальнейшем жгуты бороалюминия, сталеалюминия и жгуты с борными и стальными волокнами вводят в конструкции намоткой или укладкой в зависимости от формы изделия.

Наиболее целесообразно в данной технологии изготовления жгутов применять волокна с барьерными покрытиями как средством противодействия повышенной химической активности расплава матрицы. Преимущество этого метода заключается в возможности получения длинномерных полуфабрикатов, обеспечении и контроле малого времени контактирования волокон с расплавом матрицы.

Метод непрерывного литья. Преимуществом этого метода является возможность на первом этапе получать тонкие жгуты (см. рис. 3.2.2, *б*, *в*, *г*) или прутки (см. рис. 3.2.2, *д*) и узкие ленты с малым количеством волокон, а на втором этапе – полуфабрикаты более сложной геометрии [3] (с поперечными сечениями в виде уголков, тавров, двутавров и т.д. (см. рис. 3.2.2, *е*)).

При получении полуфабрикатов методом непрерывного литья волокна разматываются с катушек, подогреваются и с небольшим натяжением проходят тигель с расплавом матрицы. Далее формируемый полуфабрикат проходит через полость фильеры, сечение которой (с учетом термической усадки) и определяет сечение полуфабриката.

Таким образом получают бороалюминиевые и сталеалюминиевые жгуты, боромагниевые полуфабрикаты и некоторые другие.

Методы пропитки в вакууме и под давлением применяют для изготовления полуфабрикатов ограниченных размеров и изделий различных конфигураций. Так, на основе этих методов разработаны технологии получения боромагниевых полуфабрикатов и жгутов, армированных углеродными волокнами.

Различия этих методов связаны со способами пропитки жгутов из волокон (или каркасов). Наиболее широко применяют следующие способы: вакуумной заливки матричного расплава в форму, в полости которой предварительно установлен каркас волокон; вакуумного всасывания расплава матрицы; пропитки жгутов из волокон матрицей под давлением; центробежного литья в обычной воздушной атмосфере и с применением защитных атмосфер.

Возможны также более сложные способы пропитки. В полость формы помещают каркас из волокон, имеющих покрытие из материала матрицы, порошок или фольгу. Последующий нагрев формы выше температуры плавления материала матрицы и опрессовка формы приводят к более равномерной пропитке каркаса.

Общим недостатком всех методов пропитки по сравнению с непрерывным литьем является большая длительность контактирования волокон с расплавом матрицы [3].

Механические свойства жгутов. Многообразие технологических способов получения композитных жгутов определяет широкий спектр механических свойств получаемых полуфабрикатов. Прочность гибридных семиволоконных (бор–сталь–алюминиевых) жгутов с алюминиевой (АД1) матрицей [7] на интервале объемных долей 0,09...0,7 может меняться от 1550 до 2250 МПа.

Бороалюминиевые жгуты (с объемной долей волокон 0,70), содержащие 19 волокон с покрытием карбида бора, в зависимости от длительности контакта волокон с расплавом матрицы и от последующей термообработки

имеют временное сопротивление разрыву 1200... 1500 МПа [3]. А те же жгуты (с объемной долей волокон 0,60, имеющие 16 волокон с покрытием карбида кремния, дают практически незначительное снижение временного сопротивления: 1100...1500 МПа.

Литые жгуты, армированные проволочными волокнами из высокопрочной стали, при объемной доле волокон 0,60 имеют сопротивление разрыву 1060...1120 МПа.

Боромагниевые полуфабрикаты, полученные методом вакуумной пропитки, с объемной долей 0,70 имеют временное сопротивление разрыву порядка 2400 МПа.

Использование процесса получения углеалюминия методом пропитки при избыточных давлениях (не выше 0,1 МПа) [3] на основе волокон с барьерными покрытиями из тугоплавких металлов позволяет увеличить прочность при сдвиге с 15 до 50 МПа.

Ограничения применения процессов жидкофазной технологии получения армированных жгутов вызваны повышенной химической активностью расплавов матрицы к материалам волокон, а также повышенными скоростями окисления матричных материалов, поэтому многие процессы осуществляют в вакууме или с применением защитных атмосфер, а на волокна наносят предварительно барьерные покрытия.

Барьерные покрытия на волокнах позволяют легче сохранить исходную прочность волокон или даже повысить ее. При этом время контакта волокон с расплавом матрицы можно повышать, что приведет к образованию более прочного соединения компонентов жгута без снижения механических характеристик композита.

3.2.3. ТКАНЫЕ ПОЛУФАБРИКАТЫ

Для армирования деталей в отдельных случаях применяют моноволокна относительно больших диаметров (стальные, борные, карбидокремниевые и другие диметром 100 ... 500 мкм, а также жгуты из высокомодульных (например, углеродных) волокон и жгуты из поликристаллических керамических и других волокон с умеренным модулем Юнга (карбидокремниевые волокна и волокна оксида алюминия).

Ткацкие операции с такими армирующими элементами затруднены из-за их жесткости и хрупкости (кроме сталепроволочных моноволокон). Поэтому из указанных армирующих элементов изготовляют плоскостные полуфабрикаты в виде плетеных сеток с поперечными проволочными нитями даже тогда, когда в качестве продольных нитей используются высокомодульные неметаллические волокна. Кроме того, широко распространены тканые ленты из углеродных волокон (диаметр нитей 6...10 мкм), но в этих случаях используют волокна (например, полиакрилнитрильные) с несколько пониженным модулем Юнга. После изготовления тканых лент осуществляют карбонизацию. В этих лентах объемная доля продольных нитей составляет 0,95, а уточных (поперечных) – 0,05. Для изготовления тканых лент с использованием поликристаллических волокон (модуль Юнга до 200 ГПа) применяют прецизионное ткацкое оборудование.

Композитные полуфабрикаты с использованием тканых углеродных лент получают пропиткой под давлением (например, расплавом алюминиевого сплава). При размотке происходит затвердевание матричной составляющей (рис. 3.2.3). Такие монослойные композитные полуфабрикаты имеют длину до 50 м, ширину 80...85 мм, толщину 0,18...0,20 мм. Последующее изготовление листов, полос, труб и профилей из углеалюминия осуществляют горячим прессованием. Длинномерные листовые полуфабрикаты получают шаговым прессованием (см. рис. 3.2.3, *в*).

Композитные полуфабрикаты, армированные волокнами из карбида кремния или оксида алюминия также получают пропиткой матричным расплавом по технологической схеме, подобной предыдущей.

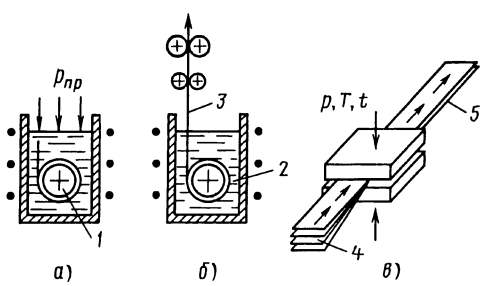


Рис. 3.2.3. Схема пропитки тканого рулона пропиткой под давлением (*а*), протягиванием через расплав (*б*), ступенчатым ("шаговым") прессованием (*в*):
1 – барабан (моталка), *2* – рулон; *3* – лента (монослойный полуфабрикат), *4* – пакет-заготовка; *5* – готовый полуфабрикат

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алюминиевые** сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные сплавы / Под ред. Ф.И. Квасова и И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1984. 528 с.

2. **Алюмиевые** сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / Под ред. В.И. Елагина, В.А. Ливанова. М.: Металлургия, 1984. 408 с.

3. **Волокнистые** композиционные материалы с металлической матрицей / Под ред. М.Х. Шоршорова. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

4. **Колпашников А. И., Арефьев Б.А., Мануйлов В.Ф.** Деформирование композиционных материалов. М.: Металлургия, 1982. 248 с.

5. **Портной К.П., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.М.** Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979, 255 с.

6. **Семенов Б.И., Круглов С.И., Тищенкова Е.Ф.** Исследование прочности и разрушения при растяжении проволок, армированных стальными и борными волокнами // Композиционные материалы. М : Наука, 1981. С. 82 – 88

7. **Семенов Б.И., Круглов С.И., Ханин Е.И., Тищенкова Е.Ф.** Синтез сталь–бор–алюминиевых композиций // Повышение прочности отливок в машиностроении. М.: Наука, 1981, С. 67 – 72.

Глава 3.3

ТВЕРДОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

3 3.1. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА И ПРЕССОВАНИЕ ПОЛОС И ЛИСТОВ

3.3.1.1. ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА

Согласно принятому Международным институтом сварки (МИС) определению диффузионная сварка материалов в твердом состоянии – это способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов.

Этот процесс осуществляется на вертикальных гидравлических прессах в вакуумных камерах или на воздухе. Диффузионная сварка, а также процессы прессования между параллельными плитами на вертикальных гидравлических прессах и установках изостатического прессования по существу являются процессами спрессовывания (с одновременным компактированием) неплотных заготовок, т.е. имеют много общего с процессами статического компактирования, используемыми в производстве полуфабрикатов и изделий из порошковых материалов. Диффузионная сварка в вакууме обеспечивает возможность производить компактирование заготовок ВМКМ при пониженных давлениях, что особенно важно при производстве ВМКМ с хрупкими волокнами, имеющими малое сопротивление разрушению при поперечном сжатии.

Прессование композиционных материалов может осуществляться на обычных гидравлических прессах различной мощности, оснащенных обогреваемыми плитами или иными устройствами для нагрева заготовок [6, 10, 12, 16]. Необходимым условием, обеспечивающим пригодность пресса для процесса диффузионной сварки, является возможность поддержания заданного давления в течение длительного времени. Диффузионная сварка может осуществляться на воздухе, в вакууме или и в инертной атмосфере. В зависимости от этого пресс, на котором ее проводят, может быть оснащен камерой для создания вакуума или необходимой атмосферы.

Схема установки для диффузионной сварки в вакууме показана на рис. 3.3.1. Установка представляет собой гидравлический пресс с вакуумной камерой. На нижней и верхней плитах пресса смонтированы плиты с нагревателями сопротивления, обеспечивающие нагрев их и заготовки композиционного материала. Для предотвращения нагрева деталей пресса нагревательные плиты изолированы от верхней и нижней плит пресса водоохлаждаемыми плитами и теплоизоляционными прокладками.

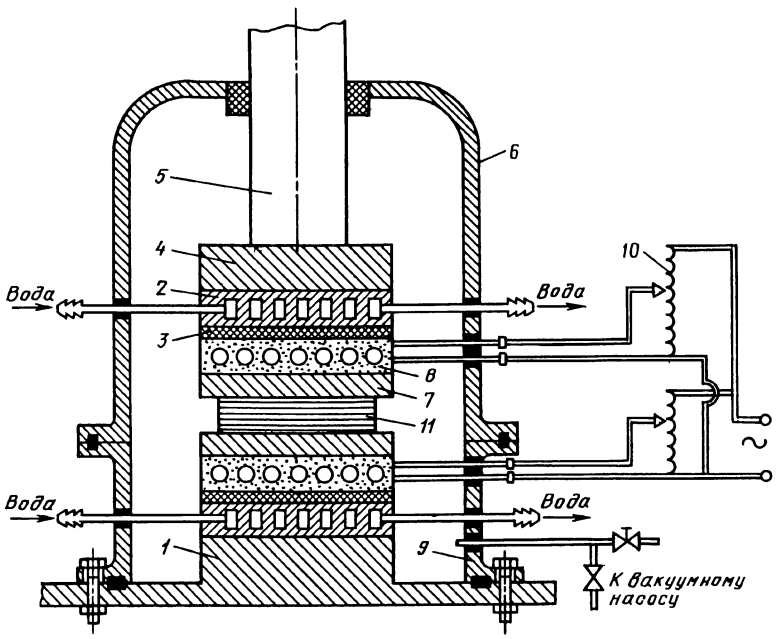


Рис. 3.3.1. Пресс с вакуумной камерой:
1 – нижняя плита пресса; *2* – водоохлаждаемые плиты, *3* – теплоизоляционные прокладки, *4* – верхняя плита пресса; *5* – шток пресса, *6* – крышка вакуумной камеры, *7* – плоские плиты, *8* – обогреваемые плиты, *9* – основание вакуумной камеры, *10* – автотрансформаторы; *11* – заготовка композиционного материала

Процесс прессования на воздухе на прессе с обогреваемыми плитами схематически показан на рис. 3.3.2 и рис. 3.3.3. При этом на рис. 3.3.3 показан пример ступенчатого прессования, позволяющего получать полуфабрикаты в виде листов, полос и профилей большой длины на прессах с небольшими размерами прессующих плит. Процесс прессования пакета из заготовок композиционного материала осуществляется периодически: вначале подпрессовывается участок, ближайший к одному из концов пакета, затем пакет передвигается таким образом, что непосредственно между плитами оказывается часть ранее обжатого участка и еще не подвергавшаяся деформированию часть. Таким образом постепенно прорабатывается весь пакет. При ступенчатом прессовании ширина изделия ограничивается размером прессующих плит пресса.

Горячее изостатическое прессование (ГИП) широко используют при получении полуфабрикатов и изделий из порошковых материалов (эта группа процессов характеризуется применением газов или жидкостей в качестве передающей давление среды) [15].

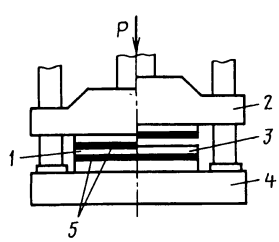


Рис. 3.3.2. Схема прессования листовых полуфабрикатов на воздухе:
1 – лист ВМКМ, *2* – верхняя траверса пресса, *3* – пакет-заготовка ВМКМ, *4* – нижняя траверса, *5* – обогреваемые плиты

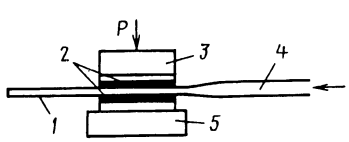


Рис. 3.3.3. Схема ступенчатого прессования длинномерных полуфабрикатов (листов, полос, профилей):
1 – полоса ВМКМ, *2* – обогреваемые плиты, *3* – верхняя траверса пресса; *4* – пакет-заготовка ВМКМ, *5* – нижняя траверса

Заготовки из порошковых материалов и ВМКМ компактируют в технологических герметизированных оболочках из мягких металлов и сплавов. Система нагрева обеспечивает возможность достижения и поддержания в рабочей камере температур до 1773 К. Давление, развиваемое в новых конструкциях газостатов конструкции ВНИИМЕТМАШ, достигает 1200 МПа. Получаемые компактированием в газостатах полосы имеют длину до 1000 мм (возможный диаметр дисковых заготовок 515 мм).

Установка для ГИП обычно состоит из трех агрегатов: сосуда высокого давления (автоклава), системы создания давления и системы обеспечения температурного режима. Сосуд высокого давления может быть выполнен в виде оболочки, упрочненной намотанной на нее проволокой из высокопрочных сталей, либо иметь монолитный корпус большей толщины. Установки имеют рабочее пространство диаметром до 910 мм. Рабочее давление установок может быть в пределах 21...210 МПа (наиболее распространенным является интервал 70...105 МПа). Давление в установках создается компрессорами диафрагменного или поршневого типов в зависимости от требуемой динамики создания высокого давления. В качестве рабочей газовой среды используют обычно гелий или аргон, в отдельных случаях – азот или воздух. Установки для ГИП обычно построены по принципу "холодных стенок": охлаждающая среда приложена снаружи либо изнутри к стенкам сосуда высокого давления, а также к уплотнениям и соединениям. Основой системы обеспечения температурного режима ГИП является печь, устанавливаемая внутри сосуда высокого давления таким образом, чтобы исключалась возможность утечки теплоты к стенкам сосуда [5].

Крупнейший в мире автоклав для изостатического горячего прессования изготовлен фирмой "Аутоклэйв Инджиниирз". Внутренний диаметр и длина рабочего пространства этого автоклава равны соответственно 1500 и 4500 мм. Вмонтированное в него нагревательное устройство имеет рабочее пространство диаметром 1220 мм и длиной 2400...3000 мм, в котором обеспечивается постоянная температура. Максимальная рабочая температура в этой установке может достигать 1530...1590 К, а давление – 105 МПа. Давление в установке создается однопоршневым компрессором, причем максимальное давление в пустом автоклаве может быть достигнуто менее чем за 3 ч. Нагревательное устройство автоклава оснащено термопарами, размещенными в 48 точках в рабочем пространстве, в уплотнениях и в наиболее опасных точках стенок. Конструкция позволяет быстро загрузить и разгрузить автоклав как в холодном, так и в горячем состоянии. Рабочий цикл, включающий подогрев и разгрузку в горячем состоянии, занимает менее 8 ч, если не применяется длительное время выдержки. При увеличении вдвое производительности компрессора рабочий цикл может быть сокращен до 2...3 ч.

Номенклатура изделий, которые можно изготовить из композиционных материалов методом диффузионной сварки под давлением в изостате или автоклаве, весьма разнообразна. На рис. 3.3.4 представлены виды профилей, получаемых в автоклаве, и схемы приспособлений, необходимых для изготовления таких профилей. Наряду с получением открытых профилей, показанных на рис. 3.3.4, газостатический метод позволяет получать и профили трубчатой формы.

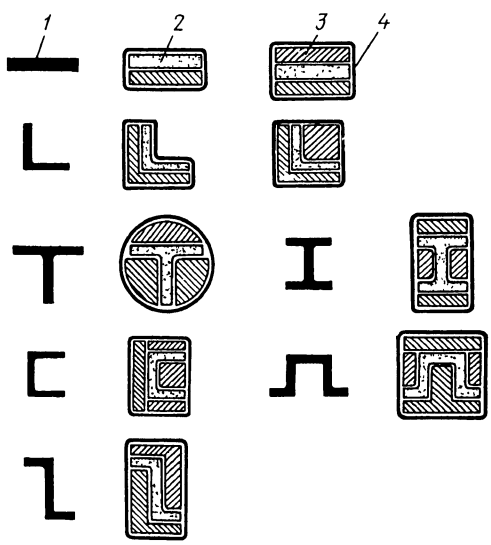


Рис. 3.3.4. Виды полуфабрикатов и схемы их получения в газостате:
1 – готовый полуфабрикат ВМКМ; *2* – заготовка ВМКМ, *3* – формирующий элемент, *4* – технологическая оболочка

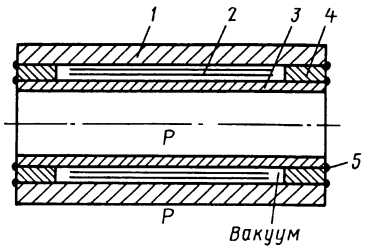


Рис. 3.3.5. Схема приспособления для получения труб в газостате:
1 – наружная труба, *2* – заготовка ВМКМ; *3* – внутренняя труба, *4* – заглушка, *5* – сварной шов

Схема приспособления для изготовления труб из композиционных материалов показана на рис. 3.3.5. Приспособление в сборе состоит из наружной и внутренней труб, выполненных из низкоуглеродистой стали, между которыми помещается заготовка из матрицы и упрочнителя. С торцов пространство между трубами закрывается заглушками. Пространство вакуумируется и заглушки привариваются герметичным швом к наружной и внутренней трубам. Помещенная в изостат сборка нагревается и подвергается давлению газа, которое благодаря деформации пластичных труб передается на заготовку композиционного материала. Если внутренняя труба толще наружной, то прессование заготовки композиционного материала происходит только за счет пластической деформации наружной трубы, на которой могут образовываться морщины и складки. Оптимальные условия получения компактного изделия заданной конфигурации создаются в случае прессования заготовок за счет преимущественной деформации внутренней трубы. Для этого наружная труба должна быть либо толще внутренней, либо изготовлена из материала, имеющего в условиях изостатического прессования более высокий предел текучести. Нагрев заготовки осуществляют одновременно с подъемом давления рабочего газа в камеру установки. В гидростате нагрев блока с заготовкой осуществляют предварительно в печи до рабочей температуры, затем блок помещают в камеру и нагружают давлением пресса, на столе которого установлен контейнер. На заготовку действуют постоянное всестороннее (изостатическое) давление. Максимальное давление – 560 МПа.

Пакетную заготовку (рис. 3.3.6) помещают в контейнер после вакуумирования и герметизации (сваркой). Контейнер или оболочка, деформируясь без разрушения, передает давление на пакет – заготовку из ВМКМ. Режимы компактирования ВМКМ в газостатах или гидростатах зависят от конструкции заготовки, состава ВМКМ и температуры. Например, при компактировании бороалюминия используют режим со следующими параметрами: вакуум в оболочке заготовки $6{,}7 \cdot 10^{-3}$ МПа, температура 853 К, давление 30 МПа, время выдержки под давлением – 120 с (высокотемпературная стадия); температура 727...773 К, давление 35... 50 МПа, выдержка под давлением 1800...5400 с (низкотемпературная стадия).

Для повышения производительности ГИП целесообразна оптимизация формы, размеров, плотности заготовки и тепловых характеристик. В этом случае наиболее полно реализуются преимущества процесса – равномерное давление и передача давления через нежесткую среду.

Передача давления в гидростатах осуществляется через жидкое стекло или расплавы солей. Гидростатическое компактирование можно осуществлять на универсальных вертикальных гидравлических прессах с использованием соответствующей оснастки. Основными узлами оснастки являются контейнер с рабочей камерой, пуансон с телескопическим устройством, система выталкивания, а также комплект прессующих и герметизирующих шайб.

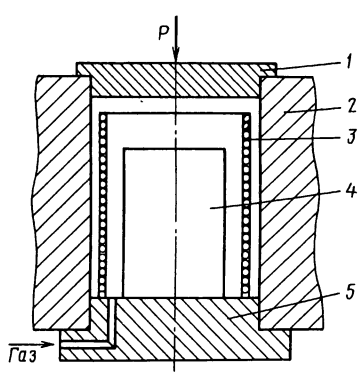


Рис. 3.3.6. Схема изостатического прессования изделий из ВМКМ в газостате:
1 – верхняя крышка газостата; *2* – корпус газостата, *3* – нагревательное устройство, *4* – заготовка для получения ВМКМ в контейнере, *5* – нижняя крышка газостата

3.3.1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ

Давление диффузионной сварки обеспечивает микропластическую деформацию матричного компонента и создание плотного контакта его с волокнами в течение всего времени прессования. Критерием достаточности давления может служить максимальная трансверсальная или сдвиговая прочность ВМКМ при оптимальных значениях двух других параметров: температуры и времени диффузионной сварки. Для алюминиевых сплавов, прессуемых при температурах 750...850 К, давление составляет не более 60 МПа. Такое давление необходимо в течение первых 6...8 мин по достижении максимальной температуры диффузионной сварки. При этом происходит пластическое течение металла матрицы, заполнение им межволоконного пространства и образование плотного физического контакта, после чего давление может быть снижено примерно вдвое.

Температура и время диффузионной сварки. Процесс формирования ВМКМ можно рассматривать как процесс сварки разнородных материалов – армирующего и матричного компонентов. В идеальном случае компоненты ВМКМ должны быть термодинамически совместимыми, т.е. находиться в термодинамическом равновесии неограниченное время при температурах изготовления и эксплуатации. С учетом высокой реакционной способности металлов относительно большинства элементов и соединений, используемых в качестве упрочнителей, допустимо ограничиться "кинетической совместимостью", т.е. способностью компонентов ВМКМ находиться в метастабильном равновесии в течение требуемого времени эксплуатации и изготовления ВМКМ.

Поскольку температура диффузионной сварки значительно превышает температуру эксплуатации ВМКМ, основные процессы взаимодействия компонентов проходят в период изготовления композита. Качество сварки определяет весь комплекс характеристик ВМКМ. В зависимости от природы используемых компонентов в процессе диффузионной сварки могут проходить следующие физико-химические процессы: растворение или коагуляция оксидных пленок на поверхности компонентов; взаимное растворение компонентов; образование новых химических соединений; рекристаллизация армирующего волокна.

Для получения качественного ВМКМ, в котором реализуются требуемые свойства его компонентов, необходимо, с одной стороны, создание прочной связи компонентов, т.е. некоторая минимальная степень физико-химического взаимодействия, с другой стороны, предотвращение чрезмерного взаимодействия, приводящего к деградации компонентов и ВМКМ в целом.

Температурно-временные режимы, обеспечивающие оптимальное сочетание свойств, выбирают в каждом отдельном случае, исходя из состава ВМКМ и его назначения.

ВМКМ с алюминиевой и магниевой матрицей. Бороалюминий. Компоненты бороалюминия образуют систему, когда матрица и упрочнитель взаимодействуют с образованием химического соединения – боридов алюминия AlB, AlB_{12}, но в определенных условиях технологического процесса такое взаимодействие можно предотвратить. Связь между компонентами осуществляется через последовательность фаз: от алюминиевой матрицы через поверхность раздела оксид алюминия–оксид бора к бору. В процессе диффузионной сварки происходят процессы частичного растворения и механического разрушения оксидных пленок, образование непосредственного контакта бора и алюминия и начало реакции образования боридов.

Установлено, что оптимальному сочетанию основных характеристик композиционного материала (прочность в направлении волокон, трансверсальная и сдвиговая прочность, предел выносливости, ударная вязкость) соответствует такое состояние поверхности раздела компонентов, когда уже имеется достаточно прочная связь, но отмечается лишь начало образования боридов. Равномерно распределенные на поверхности борного волокна мелкие очаги боридообразования свидетельствуют о необходимой достаточности температурно-временного режима диффузионной сварки. По существу образование прочной связи происходит до начала образования боридов, и процесс диффузионной сварки следовало бы прекратить до начала боридообразования, но отсутствие методики фиксирования этого момента инструментальными измерениями приводит к необходимости считать моментом окончания процесса появление первых очагов боридов. Однако образование большого количества (тем

более сплошного слоя) боридов на поверхности волокна приводит к резкому снижению прочностных характеристик ВМКМ.

В предположении диффузионного характера процессов, протекающих на поверхности раздела до начала боридообразования (коагуляция и растворение оксидных пленок и других соединений), взаимосвязь так называемого латентного периода $t_н$ (времени диффузионной сварки до появления боридов алюминия) и температурой диффузионной сварки T может быть описана отношением

$$t_н \exp(-Q/RT) = K,$$

где Q – энергия активации диффузионных процессов; R – газовая постоянная; K – постоянный для данного ВМКМ параметр.

В табл. 3.3.1 приведены рекомендуемые технологические режимы для некоторых ВМКМ.

Прессование в вакууме предпочтительнее, чем прессование в атмосфере воздуха, прочность бороалюминия и боромагния оказывается примерно на 10 % выше, однако в связи с трудностями, связанными с использованием прессов с вакуумируемой камерой, особенно при прессовании больших деталей и полуфабрикатов, процесс диффузионной сварки обычно проводят в воздушной атмосфере.

Боромагний. В материалах системы магний–борное волокно межфазное взаимодействие отсутствует до температуры 673 К. При производстве ВМКМ этой системы диапазон температурно-временных режимов диффузионной сварки по сравнению с бороалюминием значительно шире (см. табл. 3.3.1).

Алюминий–стальная проволока. Растворимость железа в твердом алюминии весьма незначительна (~0,02 %). Основным результатом взаимодействия компонентов, приводящим к снижению свойств ВМКМ, является образование хрупких интерметаллических соединений типа Fe_2Al_5 и $FeAl_3$. Разрушение ВМКМ инициируется трещиной в этом хрупком слое, служащей концентратором напряжений и приводящей при дальнейшем нагружении к хрупкому сколу проволоки. Рекомендуемые технологические режимы (см. табл. 3.3.1) должны корректироваться с учетом марки стали и алюминиевой матрицы, чтобы предотвратить образование интерметаллидов.

ВМКМ с титановой матрицей. Наиболее перспективным упрочнителем для титановых сплавов являются волокна карбида кремния. Материалы этой системы получают в основном по технологии горячего прессования. Монослойные ленты готовят с применением летучего беззольного клея, удаляемого в процессе горячего прессования. Прессование проводят в вакууме, рекомендуемый режим: температура 1144...1173 К, давление – 40...60 МПа, продолжительность прессования – 1 ч. При более высокой температуре и времени выдержки возможно образование хрупких интерметаллидных соединений типа Ti_5Si_3, $TiSi_2$ и карбида титана TiC.

3.3.1. Рекомендуемые технологические режимы диффузионной сварки для некоторых ВМКМ [1]

Состав ВМКМ		Режим сварки		
Матрица	Волокно	T, К	$t_н$, с	p, МПа
АД1	Бор	780...840	3000...2400	40...50
АД33		750...800	2400...1600	50...60
Д16		760...820	2200...1600	50...60
АМГ6		780...820	2200...1600	50...60
АД1	Стальная проволока	770...810	3600...2400	60...70
АВ	То же	750...800	3600...2400	70...80
Mg	Бор	780...840	3600...3000	70...80
Ti	SiC	1144...1173	3600	40...60

ВМКМ с никелевой матрицей. В качестве матрицы применяют жаропрочные деформируемые никелевые сплавы либо порошки жаропрочных сплавов. Используемые твердофазные технологические процессы: диффузионная сварка в вакууме пакетных заготовок либо горячее изостатическое прессование в вакууме вольфрамовой арматуры, пропитанной порошковым шликером, предварительно спекаемым в атмосфере водорода. Режимы изостатического прессования и диффузионной сварки: температура 1363 К, давление 138 МПа, время 1 ч.

3.3.2. ПРОКАТКА ПОЛОС И ЛИСТОВ

3.3.2.1. ПРОКАТКА ВМКМ ПОПЕРЕК ВОЛОКОН

Прокатка металлических материалов относится к динамическим высокопроизводительным процессам. При получении композиционных материалов, когда требуется обеспечить формирование прочного соединения матричной составляющей и волокон, прокатку выполняют с невысокими скоростями (0,1... 0,5 м/с), но и в этом случае производительность на порядок и более превосходит производительность прессования. Армированные плоские полуфабрикаты получают прокаткой вдоль расположения волокон в заготовке или при поперечном к оси прокатки направлении волокон. Первый из процессов жестко регламентирован по величине суммарного обжатия и степени обжатия в каждом проходе во избежание разрушения волокон (при завышении обжатий) или неполного компактирования (при занижении обжатий). Второй из указанных процессов технологичнее, так как на волокна в очаге деформации действуют только напряжения поперечного сжатия (через температурные условия прокатки и величину обжатия они регламентируются во избежание скалывания хрупких волокон или потери формы, а значит, и снижения прочности металлических волокон). Повышенная технологичность прокатки поперек волокон обусловлена также тем, что шаг укладки волокон в ходе деформации заготовок возрастает, что облегчает компактирование. На практике прокатке подвергают ВМКМ систем алюминий–бор, алюминий–сталь, алюминий–бериллий, титан–молибден, никель–вольфрам, медь–ниобий [10, 11]. Размер листов в направлении укладки волокон (500...1800 мм) [9] ограничивается длиной бочки прокатных валков.

Распределение послойных деформаций матричной составляющей ВМКМ существенно отличается от общеизвестной деформационной картины при прокатке монометаллических материалов. Это объясняется двоякой ролью волокон, которые как "внутренний инструмент" осуществляют деформацию матричных прослоек и в то же время в совокупности составляют жесткий каркас, препятствующий проникновению деформации в толщу заготовки (тем больше, чем выше объемная доля волокон и чем меньше их диаметр). Распределение послойных деформаций заготовок из плазменных лент (с одним слоем волокон в каждой ленте) характеризуется относительно высокой равномерностью (коэффициент неравномерности послойной деформации: $K_н$ = 0,94...1,02). При прокатке заготовок, состоящих из чередующихся слоев фольги и рядов волокон, интервал изменения $K_н$ значительно шире, и требуется оптимизация параметров заготовок и их элементов [10].

В отличие от большинства процессов компактирования ВМКМ в процессе прокатки поперек волокон требуется учет изменения шага укладки волокон ΔS при определении обжатия $\varepsilon_{ф к}$, обеспечивающего полное уплотнение ВМК.

При использовании заготовок, состоящих из чередующихся слоев фольги и рядов волокон:

$$\varepsilon_{ф к} = \frac{d_f(4S - \pi d_f) + 4\Delta S(d_f + h_{0i})}{4(S + \Delta S)(h_{0i} + d_f)},$$

а при использовании заготовок, состоящих из плазменных лент с волокнами,

$$\varepsilon_{ф к} = \frac{p_m(4Sh_л - \pi d_f^2) + 4\Delta S(h_л + h_ф)}{4(S + \Delta S)(h_л + h_ф)},$$

где d_f – диаметр волокон; S – шаг первоначальной укладки волокон; $h_ф$ – толщина фольговых матричных слоев заготовки; p_m – пористость плазменной ленты; $h_л$ – толщина плазменной ленты; $h_ф$ – толщина фольговых прокладок и наружных обкладок в пакете из плазменных лент. Количественные данные об изменении шага укладки волокон ΔS для ряда ВМКМ приведены в табл. 3.3.2.

3.3.2. Изменение шага укладки волокон при прокатке поперек волокон [10]

d_f, мкм	V_f, %	ε_Σ, %	ΔS, мм	d_f, мкм	V_f, %	ε_Σ, %	ΔS, мм
АД1-В				АМг6-В			
100	30	10 20 35 48 52	0,01 0,03 0,04 0,045 0,05	140	30	10 20 35 50	0,015 0,040 0,075 0,110
140	30	10 20 35 48 52	0,02 0,045 0,075 0,11 0,12	140	40	10 20 35 45	0,005 0,010 0,025 0,030
140	40	10 20 35 48	0,01 0,03 0,065 0,075	АМг6-ЭП322			
				200	35	20 35 50 54	0,035 0,070 0,085 0,090
140	50	20 35 45	0,015 0,025 0,035	600	35	20 35 50	0,170 0,250 0,330

Примечания 1 Начальный шаг S укладки волокон в заготовках при использовании волокон бора диаметром 100 мкм составлял 130 мкм, для волокон бора диаметром 140 мкм – 180 мкм, а при использовании проволочных волокон из стали ЭП322 начальный шаг был равен их диаметру плюс 20 мкм

2 V_f – объемная доля волокон, ε_Σ – суммарная степень обжатия заготовки ВМКМ

Данные о распределении послойных деформаций используют при расчете параметров заготовок. При заданной толщине листа h толщина заготовки $h_{зг} = h / (1 - \varepsilon_\Sigma)$, где ε_Σ – относительное суммарное обжатие при прокатке. После этого определяют толщины матричных слоев h_{0i}, если заготовки состоят из чередующихся фольговых элементов и рядов волокон:

$$h_{0i} = h_{0i\,ср} k_{нi},$$

где $k_{нi}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации данного слоя по отношению к заготовке в целом; $h_{0i\,ср} = (h_{зг} - d_f n) / (n + 1)$, здесь n – число рядов волокон в заготовке.

Если заготовки состоят из плазменных лент с волокнами, а между ними помещены фольговые прокладки, определяют суммарную толщину фольговых элементов

$$h_{ф\Sigma} = \left[\frac{\pi d_f^2 (1 - V_f + p_m V_f) - 4 h_л S p_m V_f}{4 V_f S}\right](n_1 + 1),$$

где n_1 – число слоев плазменных лент с волокнами. Средняя толщина фольгового элемента $h_{ф\,ср}$ в $(n + 1)$ раз меньше $h_{ф\,\Sigma}$, а толщина каждого элемента $h_{ф\,i} = h_{ф\,ср} k_{нi}$.

Суммарное относительное обжатие при прокатке поперек волокон, достаточное для

получения компактных листов с прочной связью матрицы и волокон ВМКМ, определяют расчетом по формуле

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{4\pi^2 n_{в}^2 t_{с}^2 R_{в}}{h_{зг}},$$

где $n_{в}$ – частота вращения валков прокатного стана; $R_{в}$ – радиус валков; $t_{с}$ – время образования соединения (расчет $t_{с}$ см. гл. 5.1).

При разработке процесса прокатки листов из ВМКМ с хрупкими волокнами знание ε_{Σ} недостаточно. Во избежание дробления волокон необходима регламентация обжатий по проходам в соответствии с результатами расчетов, получаемыми из выражения

$$\sigma_{f}^{*} = \frac{\sigma_{sci}^{*}}{\delta} \times$$

$$\times \left[(\delta + 1) \left(\frac{h_{1i} + 2R_{в} - \sqrt{4R_{в}^2 - R_{в}\Delta h_i}}{h_{1i}} \right)^{\delta} - 1 \right],$$

где σ_{f}^{*} – сопротивление волокон разрушению при поперечном сжатии в температурных условиях, соответствующих условиям процесса (σ_{f}^{*} для волокон бора диаметром 100 мкм при 500 °С равно 79,3...261 МПа, для волокон бора диаметром 140 мкм равно 86,6...376 МПа, в расчеты вводятся минимальные значения); σ_{sci}^{*} – среднее напряжение течения матричной составляющей ВМКМ в межволоконном пространстве; h_1 – толщина листа (полосы) после выполнения данного прохода; Δh_i – допустимое абсолютное обжатие на рассматриваемом проходе; $\delta = 2l_i\mu / \Delta h_i$ – показатель (μ – коэффициент трения при прокатке), $l_i = \sqrt{R_{в}\Delta h_i}$ – длина дуги захвата заготовки валками. Единственным неизвестным является Δh_i. Режимы прокатки поперек волокон представлены для ряда конструкционных ВМКМ в табл. 3.3.3.

Листы из ВМКМ, получаемые по оптимальным режимам, имеют высокие механические свойства.

3.3.3. Относительные обжатия по проходам при прокатке армированных листов поперек волокон

Материал	V_f	ε_i, %, на прокатном проходе				
		1	2	3	4	5
АД1-В	0,20	32	18	12	5	3
	0,25	28	17	12	5	3
	0,30	25	15	10	5	3
	0,35	25	15	8	4	3
	0,44	23	12	7	4	2
	0,54	21	12	7	3	–
АМг6-В	0,20	25	17	11	7	5
	0,30	25	15	10	5	–
	0,35	25	15	10	5	–
АМг6-ЭП322	0,20	36	23	16	12	–
	0,30	29	17	12	6	4
	0,35	25	15	10	5	3

Примечание Температура прокатки листов из бороалюминия 520 °С, сталеалюминия 400 °С

3.3.2.2. ПРОКАТКА ВМКМ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

Процесс горячего прессования полос трудоемок, особенно высока трудоемкость шагового прессования полос большой длины. Более производителен процесс прокатки, когда направления прокатки и укладки волокон в заготовках совпадают. При использовании хрупких (борных и др.) волокон необходимо жестко регламентировать режим деформирования пакетов-заготовок. Процесс уплотнения заготовки должен быть реализован как однокомпонентная деформация, т.е. деформироваться должна только матрица ВМКМ. Одной из основных особенностей компактирования полосовых заготовок в этом случае является наличие микроочагов пластической деформации [10], совокупность которых представляется как множество "элементарных ячеек" ВМКМ.

Для пакетных заготовок, состоящих из чередующихся слоев фольги из матричного материала и рядов волокон, уложенных с определенным шагом, величина обжатия по проходам зависит от диаметра волокон и их объемной доли в ВМКМ, а также от толщины фольговых слоев, природы материала матрицы ВМКМ и температуры процесса. С увеличением диаметра и объемной доли волокон локальные деформации возрастают, и для компактирования ВМКМ требуются меньшие суммарные обжатия.

Если в заготовках используются фольговые матричные слои и монослойные композитные ленты-полуфабрикаты (например, ленты плазменного напыления), на величину обжатия влияют параметры микрорельефа, напыленных лент и их пористость, а также диаметр и объемная доля волокон, свойства матрицы при температуре процесса. С увеличением пористости матрицы обжатия увеличиваются, а с увеличением объемной доли волокон – уменьшаются.

Величина растягивающих контактных напряжений, действующих на волокно при прокатке вдоль волокон, определяется воздействием сдвиговых напряжений на поверхностях контакта волокна и матрицы, величиной радиальных напряжений и напряжений изгиба волокон в очаге деформации [2]. Условием сохранения сплошности волокон является наличие в очаге деформации растягивающих напряжений, действующих на волокно, не превышающих по величине сопротивление волокон разрыву.

При прокатке ВМКМ вдоль волокон положительным фактором, способствующим сохранению сплошности волокон, является некоторое уширение прокатываемых заготовок. Уширение тем больше, чем выше обжатие и объемная доля волокон.

Таким образом, практически все параметры оказывают влияние на режим прокатки вдоль волокон. При расчетах оптимальных обжатий выявляется, что увеличение объемной доли волокон в ВМКМ, скорости вращения валков прокатного стана, а также их диаметра приводит к снижению обжатий по проходам (а значит, к увеличению числа проходов). Диаметр и прочность волокон оказывают противоположное действие.

В зависимости от состава ВМКМ время, необходимое для нахождения единичного объема заготовки в очаге деформации при прокатке вдоль волокон, заметно изменяется в зависимости от природы ВМКМ. Например, для сталеалюминия оно равно 1...2 с, а для бороалюминия – 9...14 с.

Теплофизические и технологические параметры прокатки в близких к изотермическим условиях представлены в табл. 3.3.4.

3.3.4. Режимы изготовления полос прокаткой вдоль волок

ВМКМ	Диаметр валков стана, мм	Время компактирования, с	Температура прокатки, К	Свойства ВМКМ		Доля разрушенных волокон, %
				σ_c, МПа	$\sigma_{c\perp}$, МПа	
Бороалюминий	110	0,20	600	420	40	73
		0,32	600	500	50	70
		0,013	680	530	70	30
	650	0,021	680	550	80	25
		0,60	800	850	90	3
		0,45	800	920	80	2
Сталеалюминий	110	0,667	773	1300	65	0
	650	0,62	773	990	100	0

Примечание. σ_c и $\sigma_{c\perp}$ – сопротивление разрыву при растяжении соответственно вдоль и поперек укладки волокон.

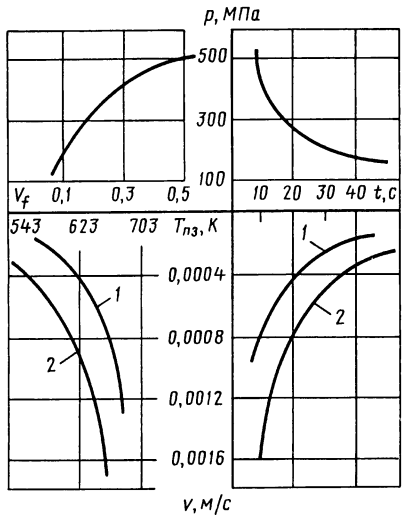


Рис. 3.3.7. Номограмма для оценки технологических параметров компактирования бороалюминия прокаткой вдоль расположения армирующих волокон:
V_f – объемная доля волокна; p – давление компактирования; $T_{пз}$ – температура предварительного нагрева ПЗ, t — время компактирования; v – скорость прокатки
Область между кривыми *1* и *2* положительных решений – отсутствие дробления волокон

Параметры компактирования прокаткой определяются по номограмме (рис. 3.3.7): на основании объемной доли волокон устанавливается скорость прокатки, температура (при определенной температуре подогрева валков 823 К). Соотношение толщины заготовки и диаметра валков стана принимается в интервале 0,02...0,006.

3.3.2.3. ПРОКАТКА ЛИСТОВ ИЗ ВМКМ С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ВОЛОКНАМИ

При прокатке плоских компактных полуфабрикатов для определения режима обжатий по проходам и температурно-скоростных параметров необходимо учитывать явления и процессы, проходящие при деформировании неплотных составных заготовок. Для сближения (на физическом уровне) и соединения контактирующих металлических составляющих ВМКМ необходимо удаление с них загрязняющих и оксидных пленок, адсорбированных и хемосорбированных веществ. Кроме того, необходимо обеспечить пластическое смятие выступов микрорельефа мягкой составляющей ВМКМ, а также устранить микронесплошности заготовки. Природа рассматриваемого процесса является смешанной – механической и диффузионной [7, 21]. Другим определяющим фактором является кинетика пластического течения и вид напряженно-деформированного состояния в приконтактных зонах соединяемых составляющих ВМКМ. Для формирования плотного физического контакта необходима интенсивная пластическая деформация и напряженно-деформированное состояние с большими сдвиговыми напряжениями и деформациями. Наличие сдвиговых напряжении способствует выходу в зону контакта дислокаций, "залечиванию" микронесплошностей и других дефектов, а также интенсификации пластического течения [18].

Существенную роль в формировании соединений играют процессы диффузии, приводящие к формированию переходной зоны. Вследствие различных механических свойств и различных степеней деформации компонентов при совместной пластической деформации рекристаллизация в зоне схватывания протекает неоднородно. Наличие на границах составляющих рекристаллизованных зерен, которые совпадают с линией соединения, свидетельствует об адгезионном взаимодействии. Поэтому взаимодействие поверхностей носит адгезионный характер, а диффузия лишь увеличивает прочность соединения. Высокоскоростная и высокотемпературная пластическая деформация приводит к увеличению искажения кристаллической решетки и появлению большого количества различного рода дефектов.

Еще одним физическим процессом, протекающем в зоне контакта, который необходимо учитывать, является образование кристаллографических ориентировок (текстуры). К образованию текстур приводит интенсивная пластическая деформация в прилегающих к зоне соединения зонах. Кинетика образования соединения определяется не только параметрами процесса, но и структурными особенностями соединенных материалов [17].

Совокупность рассмотренных физических явлений и процессов может быть положена в основу гипотез, описывающих процесс соединения металлов. Можно выделить четыре класса таких гипотез: механические, термодинамические, диффузионные и кристаллографические.

Механические гипотезы описывают механику деформирования приконтактных объе-

мов материалов и основаны на описании совместной пластической деформации разнородных металлов. Разрушение оксидных пленок разнородных металлов описывается феноменологическими критериями, например,

$$\psi = \int_0^t \frac{H d\tau}{\lambda_{пр}} \le 1,$$

где H – интенсивность скоростей пластической деформации; $\lambda_{пр}$ – предельное значение степени пластической деформации пленки; τ – время.

Зависимость между нормальным давлением p_c, обеспечивающим схватывание, степенью пластической деформации λ и предельной истинной пластической деформацией пленки $\lambda_{пр}$ описывается феноменологическими соотношениями, например [8]:

$$p_c = 4\tau_{sм}\left(1+\frac{1}{8}\sqrt{\frac{1+\exp\frac{\lambda-\lambda_{пр}}{2}}{1-\exp\frac{\lambda_{пр}-\lambda}{2}}}\right)\exp\frac{\lambda_{пр}-\lambda}{2},$$

где $\tau_{sм}$ – предел текучести на сдвиг мягкой металлической составляющей.

Прочность соединения на отрыв определяется также феноменологическими критериями типа

$$\sigma_0 = 4\tau_{sм}\left(1-\frac{\lambda_{пр}-\lambda}{2}\right), \quad \eta < 0{,}2;$$

$$\sigma_0 = 4\tau_{sм}\left(1{,}5-\exp\frac{\lambda_{пр}-\lambda}{2}\right), \quad \eta \ge 0{,}2,$$

где

$$\eta = 1-\exp\frac{\lambda_{пр}-\lambda}{2}.$$

Учет влияния касательных напряжений на межслойных поверхностях на прочность таких соединений определяется также феноменологическими соотношениями [9]:

$$\tau = \frac{p-p_c}{\tau_{sм}}.$$

Характеристики пластического течения (степень пластической деформации и др.) являются макроскопическими и определяются вариационными методами с использованием методов статистики.

Для качественных оценок процессов, протекающих при соединении металлов, часто используют термодинамические гипотезы. Для анализа прочности соединения пользуются кинетическим уравнением [14]:

$$\sigma_c = \sigma_{sм}\left\{1-\exp\left[-K_0^n t^n \exp\left(-\frac{nEa}{kT}\right)\right]\right\},$$

где $\sigma_{sм}$ – макроскопический предел текучести мягкой составляющей композита; K_0 – эффективная частота колебаний атомов решетки более твердого из соединяемых металлов; E – энергия активации процесса ползучести; k – постоянная Больцмана; T – температура; n – показатели степени, описывающие состояние ползучести материала; t – время. Таким образом, если между соединяемыми поверхностями образовался физический контакт, активация контактных поверхностей – необходимое и достаточное условие образование соединения.

Собственно процесс прокатки тонких листов из металлических композиционных материалов описывается традиционными методами: в предположении, что справедливы условия плоской деформации, материал упругопластический, для которого справедлив ассоциированный закон пластичности и обобщенные макроскопические условия пластичности. Условие пластичности для композиционных материалов строится упомянутыми методами: вариационным с использованием методов статистки или с учетом анизотропии, обусловленной конструкцией композита.

Уравнения механики, дополненные распространенными условиями [18], составляют полную систему уравнений, анализ которой позволяет назначить режимы процесса прокатки. Анализ результатов численного эксперимента позволяет определить и методы интенсификации процесса прокатки.

Указанные параметры характеризуют поведение металлов в областях, прилегающих к зоне схватывания.

Интенсификация процесса прокатки с учетом отмеченных особенностей достигается использованием кратковременного высокоэнергетического электромагнитного поля. Последнее создает электрические токи в объеме композита [3, 4, 13].

Типовая технология производства тонкой ленты из волокнистого композиционного материала включает в себя термообработку при T = 773 К в течение 2...3 ч, прокатку за 10 проходов при степени обжатия 20...30 % за проход, кроме этого необходима промежуточная термообработка при T = 773 К за время t = 1...2 ч. Число термообработок – восемь.

Новая технология с использованием кратковременного воздействия высокоэнергетического электромагнитного поля с определяющими параметрами: удельная энергия $q = (2{,}5...4{,}7) \cdot 10^9$ Дж/м^3 и время воздействия τ = (0,1...0,3) с дает возможность сократить число проходов до четырех при увеличении степени обжатия до 60...75 %.

3.3.3. ПРЕССОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ

Процессы изготовления труб из конструкционных композиционных материалов наиболее полно освещены в работах [10, 11]. Полые изделия относительно больших диаметров и относительно малых длин целесообразно получать статическим деформированием по схеме, представленной на рис. 3.3.8. Существо этого процесса заключается в том, что при внедрении полой пресс-шайбы во вкладыш технологического наполнителя на стенки сборного трубчатого пакета действует давление, вызванное сопротивлением материала технологического наполнителя обратному истечению в полость пресс-шайбы, вследствие чего происходит компактирование трубы с последующим формированием соединения составляющих ВМКМ.

Расчет параметров заготовки, технологической оснастки и процесса осуществляется следующим образом. Наружный диаметр заготовки-пакета D_0 легко определяется через заданный диаметр изделия, термический коэффициент линейного расширения и температуру процесса. Внутренний диаметр трубчатого пакета-заготовки d_0 рассчитывается из выражения

$$d_0 = \sqrt{\frac{d^2 - k_{\text{н п}} D_0^2}{1 - k_{\text{н п}}}},$$

где $k_{\text{н п}}$ – коэффициент неплотности пакета; d – диаметр компактной трубы при температуре деформации.

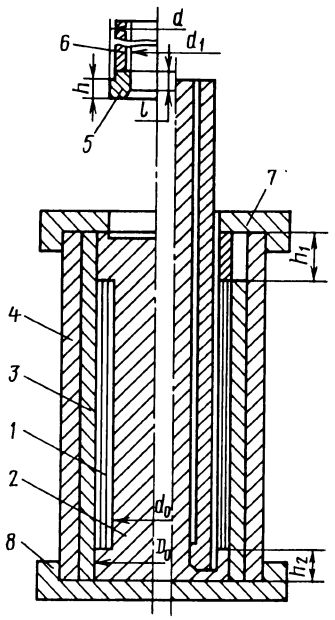


Рис. 3.3.8. Схема радиального компактирования армированных трубчатых заготовок с одновременным обратным истечением материала осевого технологического наполнителя:
1 – сборная полая армированная заготовка, *2* – вкладыш из материала технологического наполнителя, *3* – наружная технологическая оболочка, *4* – контейнер, *5* – полая пресс-шайба, *6* – полый пресс-штемпель, *7* – крышка, закрепляемая на контейнере, *8* – нижняя плита

Время силового воздействия на единичный по длине участок обрабатываемой заготовки

$$t_{\text{д}} = (h + l_{\text{п з}}) / \text{v},$$

где v – скорость перемещения пресс-шайбы; h – высота пресс-шайбы; $l_{\text{п з}} = d_1 \sin\alpha$ – длина пластической зоны (d_1 – диаметр полости пресс-шайбы, α – угол входного конуса полости пресс-шайбы, равный 45 ... 60°. Величина h определяется следующим образом:

$$h = t_{\text{с}} \text{v} - d_1 \sin\alpha,$$

где $t_{\text{с}}$ – время образования прочного соединения составляющих ВМКМ.

Сохранение сплошности волокон при деформировании заготовок по рассматриваемой схеме определяется выражением

$$\sigma_f^* = \frac{\sigma_{scl}^* \left[(d^2 / \sin\alpha) \ln(d^2 / d_1^2)\mu + \right.}{\cos\gamma(d^2 - d_1^2)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\left. + \left(1/\cos^2\frac{\alpha}{2}\right) d^2 \ln(d^2/d_1^2) + (4d^2/d_1^2)\mu l \right]}{},$$

в котором μ – коэффициент трения на пояске пресс-шайбы (поверхности скоса ее полости); γ – угол "естественного течения" материала технологического наполнителя, определяемый экспериментально, так как он зависит от конкретного значения угла α, температуры, материала наполнителя, условий трения на рабочем пояске полости пресс-шайбы; l – длина калибрующего пояска рабочей полости пресс-шайбы, равная $(3...15) \cdot 10^3$ мкм; σ_f^* – сопротивление разрушению хрупких волокон при поперечном сжатии в температурных условиях испытаний, соответствующих температуре процесса (если труба армируется металлическими нехрупкими волокнами – в этом выражении вместо σ_f^* целесообразно использовать предел текучести материала волокна при сжатии при температуре испытаний, соответствующей температуре процесса); σ_{scl}^* – среднее напряжение пластического течения матричной составляющей ВМКМ при его компактировании. Таким образом, в рассматриваемом выражении неизвестным является параметр d_1.

Полые изделия, полученные из ВМКМ алюминий–бор с объемной долей волокон 0,50 компактированием при температуре 603 К, имеют высокие значения сопротивления разрушению при растяжении (1200...1300 МПа) и сжатии (1500...1800 МПа) в осевом направлении. Скорость прессования $6{,}7 \cdot 10^{-4}$ м/с, остальные параметры процесса представлены в табл. 3.3.5.

При осуществлении процесса по схеме, представленной на рис. 3.3.8, неизбежно неполное внедрение полой пресс-шайбы (так же, как неизбежен пресс-остаток при обратном прессовании металлов). В этой схеме в данной части технологического вкладыша остается непропрессованный участок высотой $h_2 (h_2 \geq 1{,}5 l_{\text{п з}})$. Для того чтобы гарантировать компактирование на верхнем концевом участке трубной заготовки, в этой части конструкции оснастки предусматривается участок высотой $h_1 = (1{,}5...2{,}0) l_{\text{п з}}$.

3.3.5. Параметры радиального компактирования бороалюминиевых труб по схеме рис. 3.3.8

D_0, м	d	d_1	$l \cdot 10^2$, мкм	Усилие прессового компактирования, кН
	м			
0,04	0,038	0,024	50...100	22,3...27,0
	0,038	0,020	50...100	23,3...31,0
	0,036	0,020	50...100	24,5...27,6
	0,036	0,016	30...50	34,5...35,3
0,05	0,048	0,032	50...150	31,4...35,0
	0,048	0,028	50...80	39,8...42,9
	0,048	0,026	30...50	45,0...46,8
	0,046	0,030	50...120	30,5...33,0
	0,046	0,022	50...80	51,0...53,0
0,06	0,057	0,031	50...100	66,0...68,0
	0,057	0,027	50...80	80,0...82,0
	0,057	0,025	30...50	87,0...88,0
	0,056	0,030	50...100	63,0...68,0
	0,056	0,026	30...50	78,0...80,0

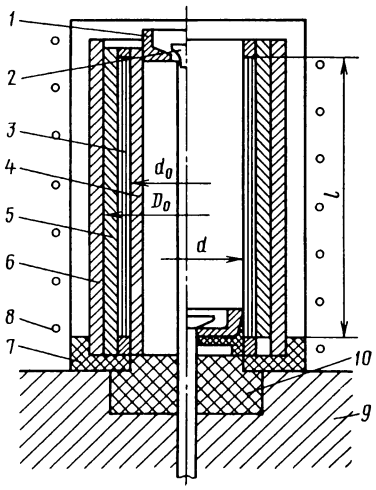


Рис. 3.3.9. Схема радиального уплотнения полых заготовок в технологических оболочках:
1 – пресс-шайба, *2* – тяга; *3* – полая армированная сборная заготовка; *4* – внутренняя технологическая оболочка, *5* – наружная технологическая оболочка, *6* – контейнер, *7* – нижняя (опорная) плита оснастки, *8* – система нагрева, *9* – подкладная плита, *10* – технологический вкладыш

Армированные трубы длиной 500... 1200 мм с небольшими толщинами стенок (0,8...1,5 мм) компактируют на вертикальных прессах по схеме, представленной на рис. 3.3.9. В этом случае компактирование заготовки также происходит с помощью давления изнутри, действующего в данном случае на полую заготовку-пакет через относительно тонкую технологическую оболочку при прохождении через ее полость одного или нескольких (последовательно уплотняющих) пуансонов [10]. Ограничение деформации в этом процессе определяется не только условиями сохранения сплошности волокон, но и условием сохранения устойчивости [10] внутренней технологической оболочки. В связи с этим процесс, как правило, характеризуется некоторой дробностью деформации, т.е. компактированием за несколько переходов, число которых n_i рассчитывают по формуле

$$n_i = \lg k_{F\Sigma} / \lg k_{Fi\text{ср}},$$

где $k_{F\Sigma}$ – коэффициент уплотнения заготовки за весь процесс (коэффициент уменьшения сечения собственно заготовки трубы из КМ при полном компактировании); $k_{Fi\text{ср}}$ – средний коэффициент уплотнения заготовки за переход (применительно к бороалюминиевым трубам его значение составляет 1,05...1,10. Величина $k_{F\Sigma} = F_{\text{зг}} / F_{\text{тр}}$ ($F_{\text{зг}}$ – сечение заготовки; $F_{\text{тр}}$ – сечение компактной трубы). Для рассматриваемой схемы процесса наружные диаметры заготовки и трубы совпадают (D_0 на рис. 3.3.9). Внутренний диаметр трубы d является заданным. Величина $k_{F\Sigma}$ определяется через коэффициент неплотности заготовки $k_{\text{нп}}$:

$$k_{F\Sigma} = 1/(1 - k_{\text{нп}}).$$

После этого через $F_{\text{тр}}$ и $k_{F\Sigma}$ легко установить значения $F_{\text{зг}}$ и d_0 – внутренний диаметр заготовки.

Диаметр полости d_i обрабатываемой заготовки после каждого перехода определяется равенством

$$d_i = \sqrt{D_0^2 - \frac{4F_i}{\pi}},$$

где $F_i = F_{i-1} / k_{Fi}$. Усилие, потребное для выполнения i-го перехода,

$$P_i = \pi\sigma^*_{sci}\left(\frac{d_i^2 - d_{i-1}^2}{2\sin 2\alpha} + d_i l_{\text{к}}\mu\right),$$

где $l_{\text{к}}$ – высота пресс-шайбы; $\alpha = \text{arctg} \times \left(\frac{2t_{\text{д}\Sigma}\,\text{v}}{d - d_0}\right)$ – угол переходного участка от боковой к лицевой поверхности пресс-шайбы ($t_{\text{д}\Sigma} = t_{\text{с}}$ – время образования соединения; v – скорость перемещения пресс-шайбы).

Трубы из бороалюминия (волокна с покрытием карбида кремния) с объемной долей волокон 0,43, компактированные при температуре 853 К при скорости v = 0,1 м/мин, k_{Fi} = = 1,065, $\alpha = 7°$, $n_i = 8$, $l_{\text{к}} = 71 \cdot 10^2$ мкм и σ^*_{sci}, возраставшем от перехода к переходу от 8 до 28 МПа, имеют компактное строение, характеризуются прочной связью составляющих и сопротивлением разрушению при растяжении 950 МПа. Трубы из ВМКМ АД1-В и Д16-В с объемной долей волокон 57 % имеют более высокие значения прочностной характеристики – соответственно 980 и 1150 МПа.

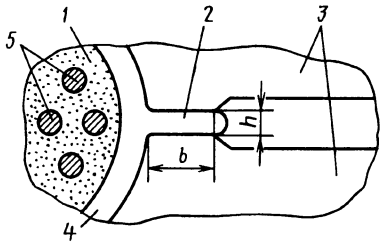


Рис. 3.3.10. Схема к определению параметров облойных полостей при радиальном компактировании армированных труб:
1 – матрица ВМКМ; *2* – облой, *3* – рабочая вставка комплекта технологической оснастки, *4* – технологическая оболочка; *5* – волокна ВМКМ

При радиальном изотермическом компактировании заготовок армированных труб, устанавливаемых на жесткие оправки, компенсация колебаний пористости матричной составляющей ВМКМ, допустимых отклонений толщины элементов заготовок, температуры деформирования, размеров рабочих деталей оснастки обеспечивается облойными полостями между наружными рабочими деталями оснастки (рис. 3.3.10), в которые может затекать материал технологической оболочки сборной заготовки. Совместность условий компактности ВМКМ и равенства σ^*_{sci} и сопротивления истечению в облойные полости позволяет установить зависимость

$$b = \frac{2\mu\sigma^*_{sci}h - \sigma_s\left(h - 2\mu h - h\ln\dfrac{1}{2\mu}\right)}{2\mu\sigma_s},$$

в которой b – длина мостика облойной полости; σ_s – предел текучести материала технологической оболочки при температуре процесса T; μ – коэффициент трения на участке облойной полости; h – высота (ширина) облойной полости, определяемая в зависимости от полного усилия компактирования (табл. 3.3.6):

$$P = \sigma^*_{sci}\pi D_{тр} l_{тр}(1+\alpha_1 T)(1+\alpha_2 T),$$

где $D_{тр}$ и $l_{тр}$ – наружный диаметр и длина трубы (или ее участка, так как эта схема позволяет осуществлять "шаговое", т.е. последовательное компактирование заготовок больших длин); α_1 и α_2 – термические коэффициенты линейного расширения ВМКМ в направлениях соответственно вдоль и поперек направления продольно армирующих труб волокон.

3.3.6. Высота облойной полости (см. рис. 3.3.10)

P, кН	h, мкм
6,3	600...1000
10	1000...1500
16	1200...1600
20	1400...1800
31,5...40	2000...2500
50...63	3000...3500

Изготовление труб, спирально армируемых проволочными волокнами, осуществляется методом гидростатического прессования по схеме, представленной на рис. 3.3.11. Изделие компактируется в условиях гидростатического сжатия и жидкостного режима трения. Предварительно герметизированная заготовка выходит из канала матрицы гидропрессовой технологической оснастки вместе с оправкой. При изготовлении труб из ВМКМ АМг6 – 12Х18Н10Т при температуре 473 К гидропрессование проводится с относительным обжатием по сечению 0,5.

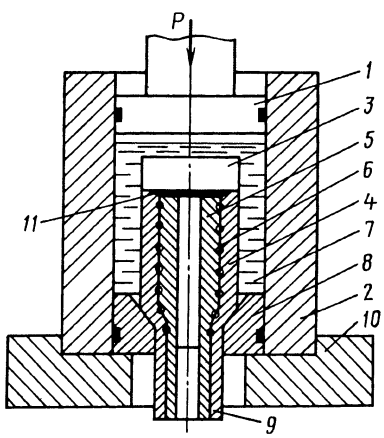


Рис. 3.3.11. Схема гидростатического прессования спирально армированных труб:
1 – пуансон; *2* – контейнер, *3* – пресс-шайба с иглой; *4* и *5* – трубчатые элементы из матричной составляющей КМ, *6* – волокно, свернутое в спираль, *7* – рабочая жидкость, *8* – матрица прессовой технологической оснастки, *9* – армированная труба; *10* – опорная плита, *11* – адгезионный слой

3.3.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КОМПАКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

В последние годы динамические процессы компактирования наряду с их широким использованием в порошковой металлургии находят применение при разработке технологических процессов получения изделий из ВМКМ. Эти методы компактирования (динамическое горячее прессование, ковка на молотах, взрывное и электроимпульсное прессование) обладают рядом преимуществ по сравнению со статическими методами компактирования, которые делают их весьма эффективными при получении изделий из ВМКМ.

Динамические процессы компактирования позволяют получать материалы и изделия из них, в которых взаимная диффузия между компонентами композиционного материала сведена к минимуму. Технологический процесс характеризуется кратковременностью ударного воздействия, что позволяет в ряде случаев отказаться от предварительного нагрева заготовок или практически свести температуру нагрева к минимуму. Это дает возможность не только избавиться от образования интерметаллидов на контактной границе компонентов, но и избежать рекристаллизации упрочняющих элементов, приводящей к снижению прочности всего материала.

Оптимальная технология динамического компактирования должна строится на базе общих закономерностей, которым подчиняются процессы уплотнения и соединения компонентов [2].

Процесс уплотнения во времени условно можно разбить на две стадии: на первой происходит вдавливание волокна в слои матричного материала, на второй – наряду с вдавливанием волокна происходит выдавливание в межволоконное пространство участков матрицы с их взаимным сглаживанием.

При используемых на практике температурах динамического горячего прессования соединение элементов заготовки достигается не полностью, поэтому требуется дополнительная обработка заготовок давлением. Например, для ВМКМ титан–молибден степень деформации при этой обработке должна быть в пределах 7...10 % [19, 20].

Динамические процессы компактирования имеют определенные ограничения по возможности использования для изготовления ВМКМ, например, в связи с неизбежностью разрушения волокон их нецелесообразно применять для ВМКМ с хрупкими, в том числе керамическими волокнами [1].

Наиболее широко применяют процессы ковки и взрывного прессования (компактирования).

Ковка. Этот процесс применяют для производства ВМКМ никель–вольфрам и титан–молибден. Поверхность проволочных вольфрамовых и молибденовых волокон подвергается при технологических температурах интенсивному окислению, что затрудняет получение ВМКМ с прочным соединением составляющих, поэтому процесс выполняют с использованием вакуумированных технологических оболочек. На фольгу из матричного материала наматывают армирующую проволоку, регулируя объемную долю волокон изменением шага намотки. После многократной намотки и получения заготовки нужной толщины ее помещают в оболочку из коррозионно-стойкой стали, вакуумируют и заваривают, затем нагревают до необходимой температуры и деформируют на фрикционном прессе или молоте.

Температуру процесса ковки устанавливают из условия обеспечения достаточной пластичности матричного материала, а также условий активного разупрочнения армирующей проволоки и формирования прочного (но без образования интерметаллидов по границам компонентов) соединения матрицы и волокон. Например, для ВМКМ никель–вольфрам температура компактирования составляет 1273... 1473 К, а для ВМКМ титан–молибден – 1323 К.

Уровень прочности соединения между компонентами ВМКМ достигается после дополнительной горячей осадки образцов со степенью деформации 7...17 %. При этом чем больше температура осадки, тем меньше степень деформации.

Необходимую величину работы для полного уплотнения заготовки для получения изделия из ВМКМ можно определить по формуле [16]:

$$W = \frac{\sigma_q c_1}{\chi}\left[\frac{2(2{,}12-3{,}6r/a)(1+0{,}02r/a)}{(\pi + a\delta\gamma_м/\gamma_в r^2)\gamma_в} + \right.$$

$$\left. + c_2 \ln\frac{H_м}{H}\,\frac{1{,}15aH_м/mr^2+\pi}{\pi\gamma_в + (aH_м/mr^2-\pi)\gamma_м}\right],$$

где W – полная работа деформирования заготовки из композиционного материала; σ_q –

сопротивление деформирования матрицы при динамическом нагружении; χ – КПД молота; c_1 – коэффициент, учитывающий скорость нагружения; c_2 – коэффициент, учитывающий трение между инструментом и заготовкой; a – шаг укладки волокна; $\gamma_м$ и $\gamma_в$ – соответственно удельный вес матрицы и волокна; r – радиус волокна; m – число монослоев волокна в заготовке; δ – толщина матричного слоя в заготовке; H – высота заготовки; $H_м$ – высота плотного материала.

Данная технологическая схема позволяет получать различные изделия из ВМКМ приведенных выше систем. Так, композиция из никелевого сплава ВЖ98 и титанового сплава ВТ15 при объемной доле армирующих волокон 33 % имеет длительную прочность на базе 100 ч в 2,5 раза больше, чем один из лучших современных жаропрочных сплавов ЖС6К, а композиция из титанового сплава ВТ8, армированная волокнами молибдена при температуре 973...1073 К, имеет длительную прочность на 70...90 % выше, чем у матричного сплава [21].

Взрывное прессование. Процесс взрывного прессования нашел широкое использование для компактирования порошковых и волокнистых композиционных материалов. Осуществление процесса взрывного прессования возможно в условиях полигона (в случае крупногабаритных изделий) или во взрывных камерах.

Для получения полуфабрикатов из ВМКМ (труб и листов) разработаны технологические процессы взрывного прессования по схемам, приведенным на рис. 3.3.12. Технологическая схема получения полуфабриката из ВМКМ в этом случае включает следующие основные технологические операции: очистку контактных поверхностей компонентов; сборку пакета (листового или трубного); сварку взрывом; отжиг; холодную обработку давлением.

Процесс очистки составляющих заготовки под сварку взрывом обычно включает механическую очистку матричных слоев, а также травление или обезжиривание армирующей проволоки. В качестве матричных слоев для получения композиции алюминий–сталь используют высокопрочные алюминиевые сплавы, например, АМг6. Высокопрочная стальная проволока различных марок обычно используется с прочностью порядка 3000...5000 МПа. Сборку пакетов-заготовок проводят по схеме, приведенной на рис. 3.3.12. Пакет устанавливают на специальное основание, а взрывчатое вещество (ВВ) располагают, как это показано на схеме.

Процесс сварки взрывом протекает при детонации ВВ. В этом случае происходит метание пластины или трубы из материала матрицы, находящейся под воздействием продуктов детонации ВВ, на слой волокон, другую матричную пластину или трубу. Для сварки взрывом стали с алюминием необходимо использовать ВВ с минимальной скоростью детонации (смесь аммиачной селитры и тротила,

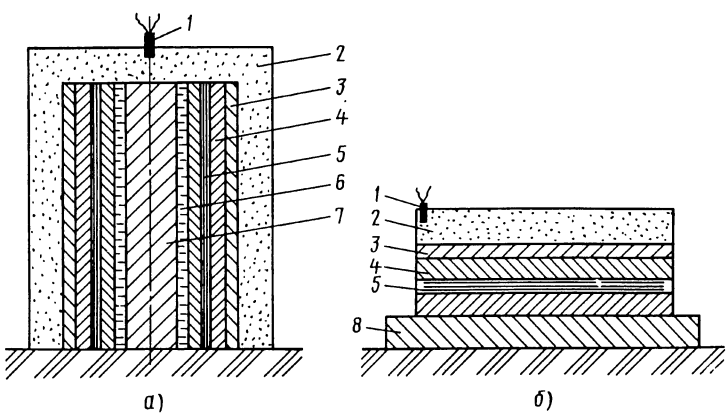


Рис. 3.3.12. Схема получения изделий из ВМКМ труб (*а*) и листов (*б*) с использованием энергии взрыва:
1 – детонатор, *2* – взрывчатое вещество, *3* – амортизационные прокладки, *4* – слой матрицы; *5* – армирующие волокна; *6* – жидкость, *7* – стальной стержень (оправка), *8* – стальная плита

взятых в процентном отношении по массе 97, 3/2, 7). При этом степень измельчения аммиачной селитры и тротила такова, что соответствует стандартным аммонитам (размер максимальных гранул примерно 0,5 мм) [8].

При сварке взрывом часть энергии ВВ расходуется на придание метаемой пластине некоторой скорости, которая и используется для сообщения энергии, необходимой для сварки взрывом слоев ВМКМ.

Отжиг сваренных взрывом листов и труб из ВМКМ используется для частичного снятия внутренних напряжений и восстановления пластичных свойств матричных материалов. Так, при получении листов из сплава АМг6, армированных сталью, рекомендуется проводить отжиг при температуре 423 К в течение 1 ч. В случае армирования алюминия и его сплавов проволокой из высокоуглеродистой стали с сорбитной структурой, термическая обработка листов из ВМКМ (нагрев до 373...473 К с выдержкой 1 ч) вызывает не только отдых матричного металла, но некоторое повышение прочности армированных листов.

Последующая холодная прокатка армированных листов и труб со степенью деформации, не приводящей к разрушению армирующих волокон, позволяет придать полуфабрикатам необходимые размеры и несколько повысить их свойства. Тем не менее предел прочности листов, армированных при компактировании методом горячей прокатки, практически не уступает по значениям пределу прочности листов, полученных сваркой взрывом. Например, листы из сплава АМг6 с объемным содержанием армирующих стальных волокон 0,1 имеют после сварки взрывом, отжига и холодной прокатки с небольшим обжатием предел прочности 510 МПа, в то время как горячекатаные армированные листы из того же сплава и с тем же объемом армирования имеют предел прочности 490...540 МПа.

Однако, несмотря на вышеприведенные результаты, сварку взрывом можно считать весьма перспективным процессом при получении армированных изделий и полуфабрикатов. Во-первых, не требуется высокотемпературное деформирование, что опасно из-за возможности образования интерметаллических хрупких прослоек на границе составляющих компонентов, при этом обеспечивается необходимый уровень прочности соединения; во-вторых, обеспечивается получение изделий таких габаритных размеров, которые невозможно получить каким-либо другим способом компактирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арефьев Б.А.** Физико-химические основы компактирования волокнистых композиционных материалов. М.: Металлургия, 1988. 192 с.

2. **Арефьев Б.А., Ушаков В.К., Малашенко С.Г.** Особенности деформирования пористой матрицы при компактировании волокнистых композиционных материалов // Физика и химия обработки материалов, 1982, № 5. С. 97 – 101.

3. **Беклемишев Н.Н., Веденяпин Е.Н., Шапиро Г.С.** // Доклады АН. Математические науки, 1985. С. 24 – 31.

4. **Беклемишев Н.Н., Шапиро Г.С.** // Доклады АН. Серия "Металлы", Изд. АН СССР, 1985. С. 15 – 19.

5. **Гарибов Г.С.** // Металловедение и новая технология легких и жаропрочных сплавов. М.: ВИЛС, 1982, с. 211.

6. **Ерманок М.З., Гарибов Г.С., Фейгин В.И., Буславский С.В.** // Гидростатическая обработка материалов. Донецк, 1981, с. 183.

7. **Ершов А.А., Малышков А.С., Засуха П.Ф., Сычева Т.А.** Применение холодной сварки прокаткой для соединения материалов // VII Всесоюзное совещание по сварке разнородных композиционных и многослойных материалов. Киев. ИЭС им. Е.О. Патона, 1986. С. 18 – 21.

8. **Каунов А.М.** К расчету метания порошков продуктами взрыва // Металловедение и прочность материалов. Волгоград, Изд. ВПИ, 1983. с. 177.

9. **Ковалев С.И., Корягин Н.И., Ширко И.В.** Напряжения и деформации при плоской прокатке. М.: Металлургия, 1982. 256 с.

10. **Колпашников А.И., Арефьев Б.А., Мануйлов В.Ф.** Деформирование композиционных материалов. М.: Металлургия, 1982. 248 с.

11. **Композиционные** материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

12. **Композиционные материалы:** Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса, Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.

13. **Мануйлов В.Ф., Смирнов В.И., Галкин В.И.** Расчеты процессов деформации композиционных материалов. М.: Металлургия, 1991. 208 с.

14. **Победря Б.Е.** Численные методы в теории упругости и пластичности. М.: МГУ, 1981. 349 с.

15. **Процессы** изостатического прессования: Пер. с англ. / Под ред. П. Дж. Джеймса, М.: Металлургия, 1990. 192 с.

16. **Тучинский Л.И.** Твердофазное уплотнение армированных материалов. Киев: Наукова думка. 1980. 116 с.

17. **Холмогоров В.Л., Щеголев Г.А., Федотов В.П.** Математическая модель процесса волочения биметаллической проволоки // Изв. вузов. Черная металлургия, 1984, № 8. С. 67 – 70.

18. **Шарип В.А., Шамкин Д.П., Епископян Н.С.** Дробление кристаллов в процессе пластического течения при высоком давлении. Доклады АН СССР, 1984, т. 278, № 1. С. 144 – 147.

19. **Шоршоров М.Х., Гукасян Л.Е., Устинов Л.М.** Влияние границы раздела компонентов композиционных материалов с борными волокнами // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980, № 11. С. 22 – 25.

20. **Шоршоров М.Х., Колесниченко В.А., Алехин В.П.** Клинопрессовая сварка давлением разнородных материалов. М.: Металлургия, 1982. 112 с.

21 **Morley K., Nakayama Y.** Shear Bands and Microstructure of Al single Crystals During Rolling-Scripta Metallurgia. Vol. 19, N 2. P 185 – 188.

Глава 3.4

ЖИДКОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВМКМ

3.4.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЛАВОВ ПРИ ЖИДКОФАЗНОМ ПОЛУЧЕНИИ ВМКМ

Наряду с традиционными требованиями, предъявляемыми к металлическим расплавам, используемым для получения обычных отливок (склонность к ликвации, усадка и др.), при жидкофазных методах получения ВМКМ (пропитке) к матричным расплавам предъявляют специфические требования, заключающиеся прежде всего в том, что расплавленный металл должен смачивать волокна или частицы второй (более тугоплавкой) фазы, а его взаимодействие с этой фазой в ходе технологического цикла не должно ухудшать эксплуатационные характеристики ВМКМ.

Движущей силой самопроизвольной (свободной) пропитки является стремление системы волокно–матричный расплав к уменьшению свободной энергии F. Свободная пропитка будет происходить при условии $\Delta F < 0$. Это условие может быть приведено к виду

$$\sigma_{ж-2} \cos\theta > 0, \qquad (3.4.1)$$

где $\sigma_{ж-2}$ – поверхностное натяжение расплавленного матричного металла; θ – краевой угол смачивания волокон матрице.

Чем ближе к нулю краевой угол смачивания матричным расплавом поверхности волокон, тем легче осуществляется самопроизвольная пропитка. При $\theta > 90°$ самопроизвольная пропитка невозможна.

Очищенные от загрязнений и оксидов поверхности металлических волокон хорошо смачиваются жидкими металлами, однако наличие оксидных пленок или других примесей на поверхности контакта часто приводит к нарушению смачивания. В таких случаях обеспечить пропитку нередко помогает перегрев расплава, введение в него легирующих добавок, способствующих смачиванию и др.

При пропитке металлами волокон из тугоплавких соединений смачивание происходит преимущественно благодаря химическому взаимодействию, которое определяется установлением химических связей между жидкостью и твердой поверхностью.

Взаимодействие жидких металлов с оксидами определяется взаимодействием металла с кислородом оксида. Твердый оксид лучше смачивается металлом, имеющим большее сродство к кислороду, чем металл в оксиде. Этот металл, в свою очередь, лучше смачивает оксид, имеющий меньшую энергию образования.

Смачивание волокон из карбидов, боридов и нитридов зависит как от взаимодействия расплавленного матричного металла с углеродом, бором или азотом, так и от его взаимодействия с металлом тугоплавкого соединения.

Условие самопроизвольной пропитки (3.4.1) широко используется для прогнозирования возможности осуществления пропитки в конкретных системах. Оно содержит достаточно надежно экспериментально измеряемые значения поверхностного натяжения пропитывающей жидкости и краевого угла смачивания

ею поверхности твердого тела. Величины поверхностных натяжений различных металлов установлены в работе [4], краевые углы смачивания некоторыми металлами оксидов и боридов приведены в табл. 3.4.1 и 3.4.2 [2]. Если расчеты дают отрицательный результат, то самопроизвольная пропитка невозможна при любой длительности контакта; если же результат положительный, то это еще не означает, что пропитка всегда осуществима, необходимо дополнительно учитывать кинетические факторы, в частности, скорость натекания расплава на волокна, а также технологические особенности, связанные с возможностью образования оксидных пленок на поверхности волокон и жидкости, шероховатостью поверхности и пр.

Интенсивность межфазного взаимодействия расплавленной матрицы с волокнами зависит от скорости пропитки, которая, в свою очередь, определяется величиной внешнего давления, при котором происходит пропитка, и вязкостью расплава. Чем больше давление и меньше вязкость, тем выше скорость пропитки и меньше время контакта расплавленной матрицы с волокнами.

Сведения о вязкости расплавленных металлов вблизи температуры плавления приведены в работе [4]. Для большинства жидких металлов изменения вязкости η с температурой T, К, может быть описано уравнением $\eta = \eta_0 \exp(-E/RT)$, где η_0, E – константы, R – газовая постоянная.

3.4.1. Краевые углы смачивания в системах оксид–металл

Оксид	Металл	T, °С	Среда	θ, °
BeO	Fe	1550	Водород	147
	Fe	1550	Гелий	127
	Ni	1500	Вакуум	128
MgO	Fe	1550	Вакуум	123
	Fe	1550	Гелий	130
Al_2O_3	Al	1255	Аргон	48
	Fe	1550	Азот	139
	Fe	1550	Вакуум	141
	Co	1500	Водород	125
	Ni	1500	Вакуум	128
	Ni	1500	Водород	133
	Ni	1500	Гелий	140
	Cu	1200	Аргон	141
	Cu	1200	Вакуум	138
	Cu	1200	Водород	125
SiO_2	Fe	1550	Азот	108
Cr_2O_3	Fe	1550	Вакуум	75
ZrO_2	Fe	1550	Вакуум	92
	Fe	1550	Гелий	102
	Ni	1500	Вакуум	118
	Ni	1500	Гелий	120
	Cu	1850	Гелий	109

3.4.2. Краевые углы смачивания в системах борид–металл

Борид	Металл	T, °C	Среда	θ, °
TiB_2	Al	1200	Аргон	60
	Fe	1550	То же	100
	Co	1600	То же	64
	Ni	1500	Вакуум	0
	Cu	1200	Аргон	137
VB_2	Co	1600	Аргон	10
	Co	1500		54
	Cu	1400		114
CrB_2	Al	1100	Аргон	96
	Al	1200		36
	Fe	1550		0
	Co	1500		28
	Co	1600		0
	Ni	1600		31
	Cu	1100		26
	Cu	1200		15
ZrB	Al	1200	Аргон	103
	Fe	1550	То же	105
	Co	1600	То же	81
	Co	1500	Вакуум	39
	Ni	1500	То же	55
	Cu	1400	Аргон	36
	Cu	1100	То же	135
MoB	Al	1200	Аргон	88
	Fe	1550		0
	Co	1600		22
	Ni	1600		0

Немаловажную роль в жидкофазной технологии получения ВМКМ играют теплофизические характеристики жидких металлов, в частности, теплоемкость и теплопроводность. Чем выше удельная теплоемкость, тем дольше происходит охлаждение металла и, следовательно, увеличивается время его контакта с волокнами, что в большинстве случаев нежелательно.

3.4.2. ПРОПИТКА В ВАКУУМЕ И ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Одним из распространенных методов получения композиционных материалов является пропитка при нормальном давлении или самопроизвольная (свободная) пропитка пористой волокнистой заготовки расплавленным матричным металлом. Определение "самопроизвольная" подразумевает отсутствие специально приложенного внешнего давления и означает, что процесс пропитки осуществляется только под действием капиллярных сил, обусловливающих заполнение межволоконных промежутков расплавом матричного материала.

Самопроизвольная пропитка пористых заготовок осуществляется при полном их погружении в пропитывающую жидкую фазу, расплавлении навески более легкоплавкого металла, находящейся на верхнем торце заготовки (пропитка сверху) или помещении нижнего торца заготовки в жидкость (пропитка снизу). Для получения армированных ВМКМ наряду с указанными вариантами самопроизвольной пропитки возможно ее осуществление путем укладки волокон заданным способом в литейную форму и заливкой в нее расплавленного матричного металла. Преимущество тако-

го варианта – возможность использования обычной литейной оснастки и получение изделий сложной конфигурации, недостаток – наличие пор и пустот, образующихся в результате объемной усадки при кристаллизации, и недостаточного заполнения межволоконного пространства. Во всех случаях необходимым условием самопроизвольной пропитки является смачивание жидкой фазой поверхности пропитываемого материала.

Свободная пропитка редко осуществляется на воздухе из-за опасности окисления ВМКМ. Чаще она осуществляется в инертной атмосфере или вакууме. Схема установки для пропитки в среде инертных газов приведена на рис. 3.4.1.

Заготовка *8* из намотанных на оправку или уложенных в определенном порядке волокон помещается в камеру *5*, которая закрывается графитовой пробкой *4*, на которой расположен графитовый плавильный тигель *1* с матричным сплавом. Через отверстие в запорном плунжере *2* в тигель подается инертный газ,

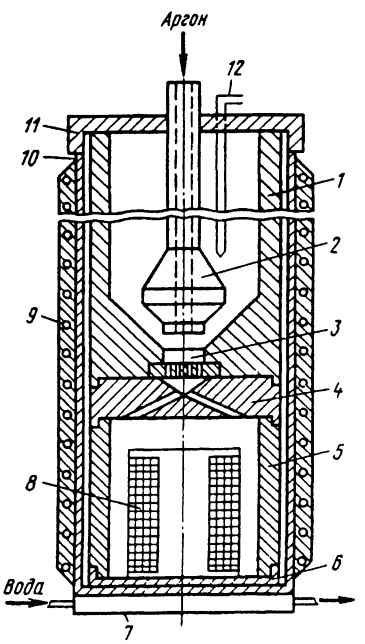


Рис. 3.4.1. Схема установки для получения ВМКМ методом пропитки в инертной атмосфере [5]:
1 – графитовый тигель; *2* – запорный плунжер; *3* – фильтр, *4* – пробка с коллектором и питателями, *5* – заливочная камера; *6* – дно, *7* – холодильник, *8* – заготовки из армирующего материала, *9* – нагреватель; *10* – контейнер, *11* – крышка, *12* – термопара

включается нагрев, матричный материал расплавляется, после чего плунжер *2* поднимается и жидкий металл поступает в камеру *5*, пропитывая промежутки между армирующими волокнами.

Самопроизвольную пропитку используют для изготовления магния, армированного борными и танталовыми волокнами; алюминия, армированного графитовыми волокнами и волокнами карбида кремния, меди, армированной вольфрамовыми и молибденовыми волокнами.

Разновидностью самопроизвольной пропитки является непрерывная пропитка. Ее широко используют для получения материалов, армированных непрерывными волокнами. Технологически могут быть реализованы схемы с вертикальным и горизонтальным направлениями пропитки. На рис. 3.4.2 приведена схема вертикальной пропитки.

Пучок, состоящий из заданного числа волокон, проходит через ванну с расплавленным металлом, пропитывается им и поступает в формирующее отверстие, где ВМКМ принимает требуемую форму.

При изготовлении прутков пучку волокон при его вытягивании сообщают различную степень закрутки, которая приводит к спиральной укладке внешних волокон и возникновению поперечных сжимающих напряжений ВМКМ. Степень закрутки можно изменять в широких пределах.

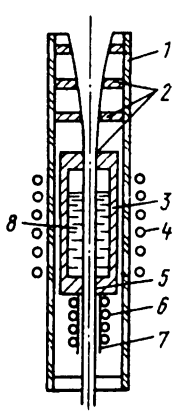


Рис. 3.4.2. Схема установки для вертикальной непрерывной пропитки пучка волокон [3]:
1 – кварцевая труба; *2* – коллиматоры волокна; *3* – тигель, *4* – индуктор; *5* – формирующее отверстие; *6* – холодильник, *7* – трубка кристаллизатора, *8* – расплав

Свойства ВМКМ в значительной мере зависят от равномерности распределения волокон по сечению. Непосредственное касание волокон приводит к неравномерному распределению нагрузки на них и снижению прочности композита в целом.

Если через расплавленный матричный металл пропускать пучок неразобщенных волокон, то получается композиция, состоящая из кольцевого слоя матричного металла, внутри которого расположены контактирующие между собой волокна. Прочность такого ВМКМ низка.

Для получения качественных композиций как при горизонтальном, так и при вертикальном способах непрерывной пропитки необходимо перед входом в жидкий металл волокна разобщать. Степень их разобщения определяется вязкостью и температурой расплава, смачиваемостью и взаимодействием компонентов. Разобщение волокон осуществляется при помощи распределителя – специальной плиты со сквозными отверстиями, число которых равно числу волокон в пучке. Оси отверстий расположены по образующим конусов, углы при вершине которых находятся на входе в кристаллизатор (рис. 3.4.3).

Методом непрерывной пропитки получают разнообразные профили. В единую технологическую цепочку с непрерывной пропиткой может быть включено нанесение покрытий на волокна, которые разупрочняются при контакте с жидкой матрицей. В частности, разработан промышленный метод получения непрерывной ленты из алюминия, армированного борными волокнами, используемой в качестве полуфабриката для изготовления изделий. Метод включает предварительное нанесение покрытия из нитрида бора на борные волокна, защищающего волокна от взаимодействия с жидким алюминием, и последующую пропитку алюминием. Монослойная бороалюминиевая лента шириной 6,35 мм с объемной долей 0,65...0,75 покрытых нитридом бора борных волокон диаметром 142 мкм выпускается под маркой нитборал.

В качестве матрицы используется высокопрочный литейный алюминиевый сплав следующего состава, % (масс.): Cu – 5; Ag – 1; Mg – 0,3; Ti – 0,2, остальное – алюминий. Этот сплав хорошо смачивает борные волокна, покрытые нитридом бора, и позволяет получать материалы с повышенными механическими свойствами. Временное сопротивление ленты нитборал составляет 1190...1220 МПа при объемной доле волокон V_f = 0,48 и 1630...1760 МПа при V_f = 0,75. Средние модули упругости равны соответственно 223 и 304 ГПа. Сечения большого размера могут формироваться жидкофазным соединением набора лент (пропусканием их через ванну с расплавленным металлом).

Разновидностью метода непрерывной пропитки является дополнительная пластическая деформация получаемого ВМКМ в волоке непосредственно после пропитки, за счет которой осуществляется сварка материала покрытия и волокон и образование композиционного материала. Применение этого способа для получения композиций Al – 12Х18Н10Т позволило улучшить структуру матричного материала и качество поверхности профилей из ВМКМ.

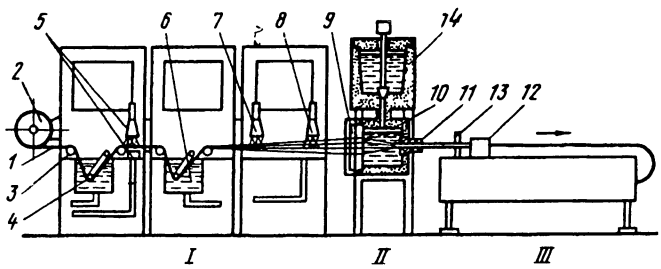


Рис. 3.4.3. Схема горизонтальной установки для получения армированных ВМКМ методом непрерывной пропитки:

I – узел очистки волокон, *II* – узел подготовки расплава, *III* – тянущая клеть; *1* – волокна, *2* – барабан; *3* – направляющие ролики; *4* – ванна обезжиривания; *5* – ванна промывки; *6* – ванна травления, *7* – ванна холодной промывки, *8* – ванна горячей промывки, *9* – ванна флюсования, *10* – металлоприемник, *11* – кристаллизатор; *12* – тянущее устройство, *13* – отрезной круг; *14* – плавильная печь

Метод непрерывной пропитки позволяет использовать пропиточные камеры любых размеров, получать изделия различного сечения практически неограниченной длины (прутки, трубы, листы, швеллеры, тавры, двутавры и др.), регулировать в широких пределах время контакта волокон с расплавленным матричным металлом, распределять их заданным образом по сечению, получать предварительно напряженный композит путем применения противонатяжения волокон. Метод отличается экономической эффективностью, высокой производительностью, устойчивостью, легко поддается механизации и автоматизации. Однако широкое применение метода сдерживается сравнительно узкой номенклатурой используемых матричных сплавов; не все из них способны хорошо смачивать волокна. Поэтому не удается использовать такие распространенные алюминиевые сплавы, как Al-2024 (Al–4,5Cu–1Mg) и Al-6061 для получения ВМКМ непрерывной пропиткой.

Вакуумная пропитка является разновидностью пропитки под давлением, при которой в качестве движущей силы процесса используют атмосферное давление. Вакуумирование позволяет защитить волокна или пористые каркасы от окисления, как правило, улучшает смачивание, позволяет уменьшить время контакта волокон с жидким металлом.

Пропиткой в вакууме пучка вольфрамовых волокон расплавленными суперсплавами на Ni–основе получают жаропрочные ВМКМ. В полость цилиндрической трубы из жаропрочного сплава укладывают очищенные отрезки вольфрамовой проволоки. Один торец трубы герметизируют сваркой мембраной из сплава нимокаст-58, а другой присоединяют к вакуумному насосу. Предварительно вакуумированную трубную заготовку нагревают до 1373...1423 К и погружают заваренным концом в тигель с расплавом нимоник-258. Мембрана расплавляется, и жидкий металл из тигеля устремляется в зазоры между волокнами, заполняя полностью полость трубы. После охлаждения оболочку удаляют механической или химической обработкой, но часто ее оставляют, используя как защиту от высокотемпературного окисления.

Аналогичный метод используют для получения армированных ВМКМ на основе алюминия и никеля (рис. 3.4.4). Применяют два варианта с нижним и верхним расположением тигля. Технологически удобнее вариант с нижним

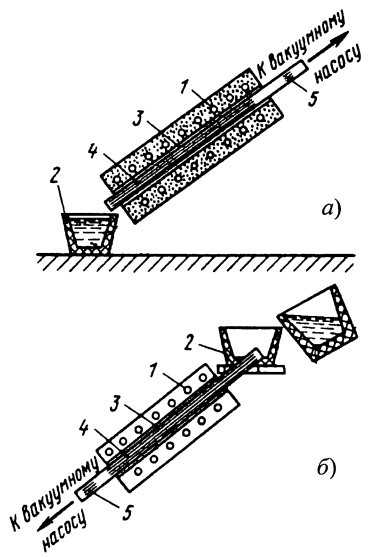


Рис. 3.4.4. Схема получения армированных ВМКМ вакуумной пропиткой с нижним (*а*) и верхним (*б*) расположением тигля:
1 – печь сопротивления, *2* – тигель, *3* – металлическая форма; *4* – волокна; *5* – пористая пробка

расположением тигля, так как он не требует дополнительного заливочного тигля (рис. 3.4.4, *б*). Недостаток этого варианта – ограниченная длина получаемых изделий. Вариант с верхним расположением тигля лишен этого недостатка, так как длина пропитываемого изделия не ограничивается высотой подъема расплава и может быть практически неограниченной. Движение жидкого металла происходит под воздействием не только атмосферного давления, но и массы столба жидкости, что позволяет получать стабильные по качеству материалы. Обычно этот вариант применяют для изготовления деталей и полуфабрикатов малого сечения с большой длиной, например, спиралей.

Разновидностью вакуумной пропитки является принудительная пропитка в вакуумной камере. Пропитываемый пористый каркас или пучок волокон помещают в керамический или графитовый стакан и устанавливают в вакуумной камере, в которой находится тигель с матричным сплавом. После вакуумирования камеры, прогрева стакана до заданной температуры и расплавления матричного сплава стакан опускают открытым концом в расплавленный

металл, а в камеру впускают воздух. Под действием атмосферного давления жидкий металл заполняет пустоты в пропитываемом каркасе. С помощью последующего охлаждения усадочную раковину выводят из рабочей зоны изделия.

Принудительная пропитка в вакуумной камере может осуществляться и сверху. При этом стакан с пористой заготовкой устанавливают вниз дном, сверху помещают матричный сплав, камеру вакуумируют, нагревают. После расплавления матрицы открывают вентиль, соединяющий внутреннюю полость камеры с атмосферой, и жидкий металл под атмосферным давлением пропитывает заготовку. Этот метод позволяет получать плотные, без усадочных раковин изделия, форма которых полностью соответствует конфигурации внутренней полости стакана.

Вакуумное всасывание происходит с большой скоростью, и в ряде случаев поток жидкого металла может вызывать эрозионное разрушение поверхности волокон. Чтобы избежать этого, необходимо регулировать скорость пропитки. Предложено осуществлять такую регулировку путем торможения потока расплавленного металла электромагнитным полем. Чтобы обеспечить требуемую скорость пропитки, одновременно включают электромагнитный *2* и вакуумный *7* насосы (рис. 3.4.5). При этом для питания электромагнитного насоса подают такое напряжение, при котором электромагнитные силы компенсируют силы разрежения.

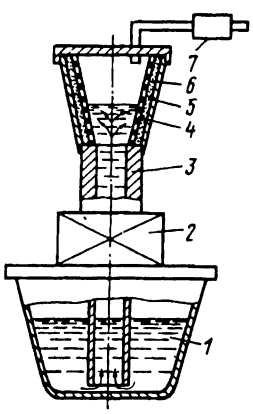


Рис. 3.4.5. Схема установки для совместной электромагнитной и вакуумной пропитки

Металл, поступающий из емкости разрежения *1* в электромагнитный насос *2*, удерживается в нем до окончательного удаления воздуха из полости формы *6*, в которой установлен подлежащий пропитке каркас *5*. Затем постепенно снижают напряжение, подаваемое на электромагнитный насос, и металл по трубопроводу *3* плавно поступает в вакуумную форму *6*. Подвод металла к каркасу осуществляется в радиальном направлении через отверстия в обечайке *4* по мере повышения уровня металла в форме *6*. После завершения кристаллизации отливки включают вакуумный насос *7*, и избыток металла удаляется по трубопроводу *3* в емкость *1*.

Метод саморегулируемой вакуумной пропитки для получения ВМКМ, в которых пропитывающим материалом служит магний или его сплавы, основан на активном взаимодействии магния с основными компонентами воздуха – азотом, кислородом и углекислым газом.

Закрытый с одного торца контейнер, в котором размещены волокна или уложен пористый каркас, погружается открытым торцом в расплавленный магний. В результате взаимодействия последнего с воздухом образуются твердые оксиды, нитриды и карбонаты, что приводит к снижению давления газа в контейнере и заполнению его жидким магнием. Реакция идет практически до полного связывания воздуха, в контейнере образуется вакуум, причем имевшиеся на начальной стадии пропитки поры заполняются матричным металлом, поскольку в процессе пропитки происходит непрерывное удаление воздуха из пор.

Метод позволяет без применения вакуумного оборудования получать отливки сложной формы с тонкими стенками.

3.4.3. ПРОЦЕССЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПРОПИТКИ

Характерной чертой методов принудительной пропитки является использование в них дополнительного воздействия, чаще механического, обусловливающего интенсификацию процесса течения расплава в порах пропитываемого каркаса и взаимодействие компонентов. Есть способы, в которых это воздействие приложено к частицам наполнителя, – замешивание частиц или коротких волокон в матричный расплав, однако наиболее распространены способы, когда внешнее воздействие приложено к матричному расплаву [3].

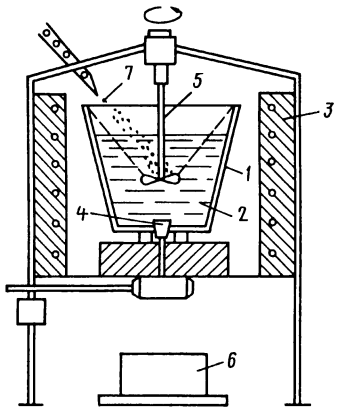


Рис. 3.4.6. Схема установки для композиционного литья (обозначения в тексте). Штриховой линией показана свободная поверхность расплава при замешивании

Композиционное литье. Способ заключается в введении порошковых частиц в матричный расплав при энергичном перемешивании (рис. 3.4.6). Установки для осуществления процесса включают в себя тигель *1* с матричным расплавом *2*, установленный в печи *3* и снабженный донным стопором *4*. В тигель погружен импеллер *5*, а под тиглем находится литейная форма *6*. Армирующие частицы *7* вводят засыпкой на лопасти вращающегося импеллера при медленном понижении температуры таким образом, чтобы суммарное количество твердой фазы (частиц и затвердевшей матрицы) не превышало 20...30 % и чтобы сохранялась достаточная жидкотекучесть получаемой жидкометаллической суспензии. После подготовки суспензии открывают донное отверстие и заливают ее в форму. На качество ВМКМ в этом случае влияет скорость вращения импеллера, отношение геометрических размеров импеллера тигля, температура расплава и порошка, состав матричного сплава и другие параметры. При оптимальном режиме частицы попадают на обнаженные части лопастей импеллера и внедряются ими в расплав, в котором не должно быть ни застойных, ни вихревых зон. Указанным способом обычно изготовляют ВМКМ на основе алюминиевых сплавов с армирующими короткими волокнами или частицами оксидов, карбидов и других соединений, а также частицами твердых смазок (графит). Объемная доля вводимого наполнителя не превышает обычно 0,12...0,14, оптимальная объемная доля 0,04...0,08.

Вакуумная и компрессионная пропитка. Рассматриваемые способы включают в себя цикл подготовительных операций (подготовку армирующего каркаса намоткой, выкладкой, предварительным уплотнением и другими способами, подготовку матричного сплава – плавку и нагрев, введение в контакт матрицы и наполнителя), цикл основных операций (принудительное заполнение пустот армирующего каркаса матричным расплавом и выдержку для обеспечения требуемого взаимодействия компонентов) и охлаждение, при котором осуществляется фиксация свойств материала и изделия – внешней конфигурации, внутреннего армирующего каркаса, требуемой прочности связи компонентов и отсутствия незаполненных зон [1].

Подготовительные операции классифицируют по следующим признакам: по отношению к нагреву матрицы и наполнителя (введение компонентов в контакт до и после нагрева наполнителя), по состоянию матрицы во время введения компонентов в контакт (твердая или жидкая), по взаимному расположению матрицы и литейной формы (матрица в форме либо форма погружена в матрицу), а также по наличию или отсутствию защитной атмосферы или вакуума. Схемы некоторых вариантов осуществления подготовительных операций приведены на рис. 3.4.7. Процессы с нагревом матрицы и армирующего каркаса до их совмещения являются более производительными и поддающимися механизации и автоматизации, однако точность фиксации температурных параметров пропитки в этом случае ниже, чем при совместном нагреве. Наибольшая точность фиксации температурных параметров обеспечивается при погружении формы в матричный расплав, но при этом требуется тщательная противопригарная обработка формы или же возможно изготовление деталей только простой конфигурации.

Основные операции принудительной пропитки классифицируют по следующим признакам: по способу подачи усилия пропитки (с помощью рабочего тела – твердого, жидкого или газообразного, либо с помощью силы, созданной за счет электромагнитного утяжеления, центробежных сил и т.п.), по конструкции пресс-формы (герметичная либо негерметичная по отношению к матричному расплаву; силовая, т.е. воспринимающая давление пропитки, либо несиловая).

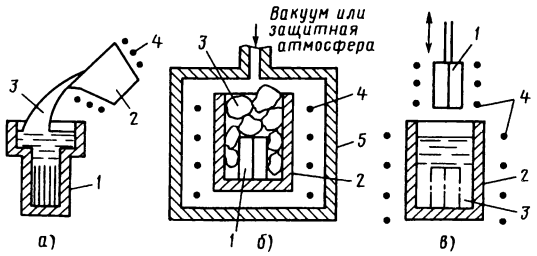


Рис. 3.4.7. Схемы подготовительных операций компрессионной пропитки:
а – введение компонентов в контакт до нагрева наполнителя, при жидком состоянии матрицы, матричный сплав в пресс-форме, *б* – введение компонентов в контакт до нагрева наполнителя при твердом состоянии матрицы, при наличии защитной атмосферы, пресс-форма в матричном сплаве; *в* – введение компонентов в контакт после нагрева наполнителя при жидком состоянии матрицы, *1* – пресс-форма; *2* – тигель, *3* – матричный расплав; *4* – нагреватель; *5* – автоклав

Схема одного из вариантов осуществления пропитки с использованием твердого рабочего тела приведена на рис. 3.4.8. ВМКМ изготовляют следующим образом: наполнитель в виде порошковых частиц, нитевидных кристаллов или коротких волокон укладывают в рабочую полость пресс-формы (*а*) и уплотняют плунжером (*б*); пресс-форму с наполнителем нагревают до температуры, на 100...200 К ниже ликвидуса матричного сплава, заливают в нее матричный расплав, перегретый на 150... 250 К выше ликвидуса (*в*), и посредством плунжера создают давление 5...10 МПа, для осуществления пропитки (*г*). Давление поддерживают до конца затвердевания матричного сплава, что не только обеспечивают устранение усадочных и газовых дефектов, но и улучшает структуру матрицы ВМКМ. Рассмотренный процесс обычно называют компрессионным литьем.

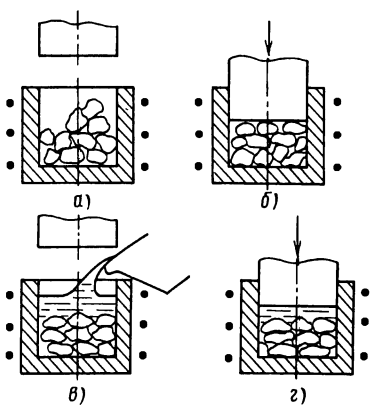


Рис. 3.4.8. Схема пропитки в герметичной силовой пресс-форме с использованием плунжера; матричный сплав в пресс-форме

Варианты способа определяются различным осуществлением отдельных операций: 1) укладка несвязанного либо агрегатированного наполнителя, локальное либо полнообъемное армирование; 2) наличие либо отсутствие предварительного уплотнения; 3) нагрев пресс-формы на отдельной позиции или на позиции пропитки с использованием встроенного нагревателя; 4) схема "матрица в пресс-форме" (см. рис. 3.4.8) или "пресс-форма в матрице" (рис. 3.4.9).

Способы с расположением матричного расплава в полости герметичной силовой пресс-формы и подачей давления поршнем характеризуются тем, что пресс-форма в этом случае одновременно выполняет функции инструмента и технологического аппарата. Конструкция пресс-формы при этом усложняется, но зато появляется возможность использования для пропитки стандартного оборудования – обычных печей, простых систем подачи давления и вакуумирования. Основным недостатком этих способов является трудность обеспечения стационарного температурного режима из-за

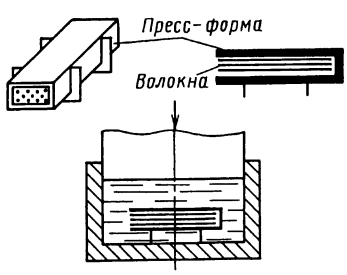


Рис. 3.4.9. Схема пропитки в герметичной несиловой пресс-форме с использованием плунжера; пресс-форма в матричном сплаве

прессования "холодным" поршнем, а также сложность вакуумирования и изготовления изделий сложной конфигурации.

Указанные недостатки в меньшей степени присущи способам с использованием газообразного рабочего тела. Различают способы вакуумной и вакуумно-компрессионной пропитки под газовым давлением. Комппрессионную пропитку осуществляют обычно с использованием твердого рабочего тела (рис. 3.4.9).

При вакуумной пропитке движущей силой течения расплава является атмосферное давление. Установка для вакуумной пропитки (рис. 3.4.10) включает печь *1* для нагрева матричного расплава *2*, устройство *3* для нагрева формы *4* с уложенным в нее каркасом из наполнителя и вакуумную систему *5*. После нагрева формы с наполнителем и матричного расплава до требуемой температуры, обычно на 50...150 К выше ликвидуса сплава, погружают литниковую систему *6* формы в матричный расплав и начинают вакуумирование. Часто в литниковой системе устанавливают плавкую мембрану *7*, в этом случае расплав поступает в форму после ее расплавления, обеспечивая дополнительное время для вакуумирования каркаса. От попадания расплава в вакуумную систему предохраняет пористая вставка *8* с повышенным гидродинамическим сопротивлением. Используют установки вакуумного всасывания двух типов: с нижним и верхним забором расплава (см. рис. 3.4.10).

Для металлов с повышенной химической активностью (например, магниевых сплавов) предложен метод самогенерирующегося вакуума [8]: закрытый с одного конца контейнер с уложенным в него армирующим каркасом погружается открытым торцем в расплав, взаимодействие которого с воздухом внутри контейнера приводит к образованию твердых соединений и к снижению давления газа в контейнере, в результате чего и осуществляется пропитка.

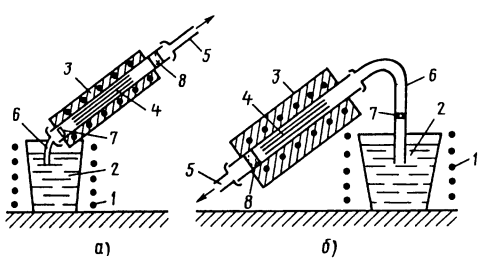


Рис. 3.4.10. Схема установки для вакуумного всасывания с нижним (*а*) и верхним (*б*) забором расплава

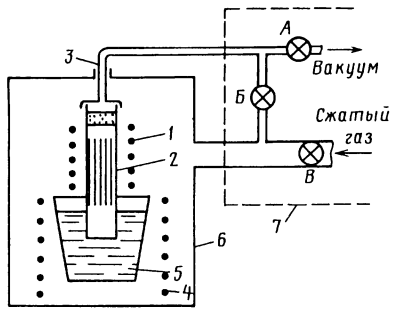


Рис. 3.4.11. Схема установки для вакуумно-компрессионной пропитки с совмещением во времени операций вакуумирования и пропитки

Вакуумно-компрессионная пропитка реализуется различными способами. Их основное отличие – совмещение или последовательность во времени операций вакуумирования и пропитки. Установка с совмещением во времени указанных операций (рис. 3.4.11) включает в себя устройство *1* для нагрева формы *2* с уложенным в нее каркасом из наполнителя, механизм перемещения формы *3*, печь *4* для подготовки матричного сплава *5*, корпус *6*, способный выдержать давление пропитки, и вакуумно-газовую систему *7*. В процессе нагрева формы и матричного сплава осуществляют вакуумирование системы (открыты краны *А* и *Б*); после достижения требуемой температуры форма погружается открытым торцем в расплав, кран *Б* перекрывается, а через кран *В* в рабочее пространство автоклава подают давление инертного газа. После окончания пропитки выводят форму из зоны нагрева и охлаждают (при этом может поддерживаться давление, обеспечивающее снижение усадочных и газовых дефектов в материале).

На установках с последовательным осуществлением рассматриваемых операций форма после вакуумирования погружается в матричный расплав, после чего на зеркало расплава подают инертный газ под давлением. Примером этого типа является установка (рис. 3.4.12), в которой с целью повышения производительности, снижения расхода сжатого газа и улучшения качества получаемых изделий предусмотрено осуществление процесса в трех основных узлах.

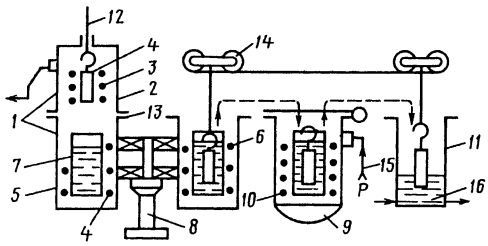


Рис. 3.4.12. Схема установки для вакуумно-компрессионной пропитки с последовательным осуществлением операций вакуумирования и пропитки

Установка содержит вакуумно-нагревательный узел *1*, состоящий из верхней части *2* с нагревателем *3* для формы *4* и нижней части *5* с нагревателем *6* для матричного расплава *7*, установленном на поворотной колонне *8*, автоклав *9* (компрессионный узел) с нагревателем *10* и узел охлаждения *11*. Процесс начинается с подвески формы на шток *12* механизма перемещения, установки тигля в вакуумно-нагревательный узел и стяжки верхней и нижней его частей захватами *13*. После вакуумирования и достижения требуемой температуры форму погружают под зеркало матричного расплава, вводят в узел атмосферный воздух, разводят захваты и перемещают нижнюю часть узла вместе с тиглем в зону, обслуживаемую транспортным устройством *14*, которое используется для перемещения тигля с погруженной в матричный расплав пресс-формой в компрессионный узел и на позицию охлаждения. После замера температуры расплава и термостатирования формы в автоклав через трубопровод *15* подают инертный газ под давлением, выдерживают в течение требуемого промежутка времени, а затем с помощью устройства *14* извлекают из тигля форму с пропитанным каркасом, устанавливают на позиции охлаждения и производят подачу охлаждающей жидкости *16* (воды) для обеспечения направленного затвердевания матричного сплава. Установки такого типа целесообразно использовать для изготовления ответственных деталей из ВМКМ с жесткими ограничениями допускаемого взаимодействия компонентов. Наряду с положительными свойствами (точность выдерживания температурно-временных параметров) рассматриваемые установки имеют недостатки, связанные со сложностью и громоздкостью узлов и с невысокой производительностью.

Из способов принудительной пропитки с использованием массовых сил наиболее приемлемым сейчас является способ центробежного литья, особенно для получения изделий, имеющих форму тел вращения. Каркас помещают во вращающуюся форму, в которую заливают матричный расплав. Высокий коэффициент использования металла, точность получаемых размеров и достаточная производительность обеспечивают перспективность этого способа [5].

Пропитка несмачиваемых каркасов может осуществляться лишь тогда, когда внешнее давление превосходит статическое сопротивление течению, определяемое величиной капиллярного давления и называемое обычно первым критическим давлением, т.е. при

$$p > p_{\text{кр 1}} = \frac{2\sigma_{\text{ж-2}}/\cos\theta}{r_{\text{эфф}}},$$

где $\sigma_{\text{ж-2}}$ – поверхностное натяжение расплава на границе с газовой фазой; θ – краевой угол смачивания в системе матрица–наполнитель; $r_{\text{эфф}}$ – эффективный радиус капилляра в армирующем каркасе. Для одномерной плотной упаковки одинаковых волокон круглого сечения с радиусом r_f эффективный радиус определяют по формуле

$$r_{\text{эфф}} = r_f / 2\,\frac{1-V_f}{V_f},$$

где V_f – объемная доля волокон. Зависимость величины $P_{\text{кр 1}}$ для этого случая от содержания и размеров волокон показана на рис. 3.4.13.

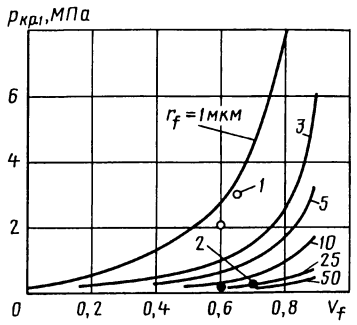


Рис. 3.4.13. Зависимость минимального давления $p_{\text{кр.1}}$, обеспечивающего пропитку от объемной доли V_f и размера волокон для алюминиевых расплавов и систем с краевым углом смачивания 120°. Экспериментальные точки:
1 – система Al–C, r_f = 3 мкм,
2 – система Al–B, r_f = 50 мкм

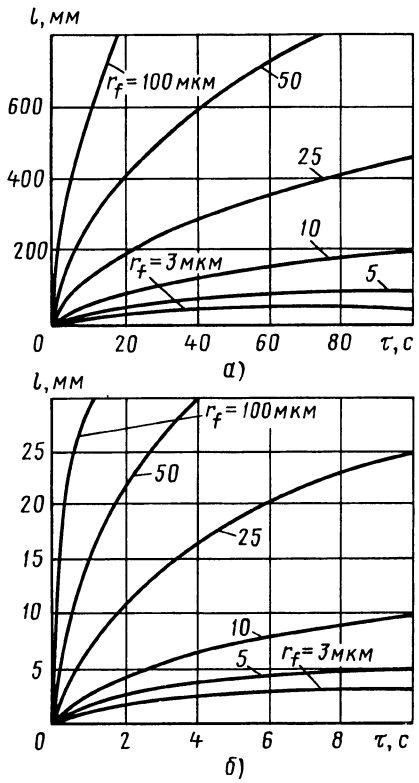


Рис. 3.4.14. Кинетические кривые принудительной пропитки в зависимости от объемной доли и размеров волокон для алюминиевых расплавов и систем с краевым углом смачивания 120° при V_f = 0,6 (*а*); V_f = 0,9 (*б*)

Кинетика пропитки определяется выражением $l = a\tau^{0,5}$, где l – длина пропитанного участка; τ – время пропитки; $a \sim (P - P_{кр.1})^{0,5}$ – кинетический коэффициент пропитки (соответствующие графики для некоторых режимов пропитки показаны на рис. 3.4.14).

При внешних давлениях, превосходящих второе критическое значение $p_{кр\,2}$, определяемое реологическими свойствами пропитываемого каркаса, резко изменяется механизм пропитки: на первой стадии расплав разбивается на потоки, движущиеся по наиболее крупным капиллярам, а на второй – происходит поперечная пропитка незаполненных ранее зон. Если объемная доля элементов наполнителя достаточно велика (более 0,40 волокон радиусом 3...5 мкм, более 0,50 волокон радиусом 40...60 мкм), то после окончания пропитки восстанавливается их равномерное распределение, при меньших содержаниях в ВМКМ имеет место неравномерное распределение элементов наполнителя, обусловленное деформацией каркаса при пропитке. Время пропитки при этом уменьшается в десятки раз; например, время пропитки однонаправленного каркаса из углеродных волокон ($r_f \sim 3$ мкм, $V_f \sim 0,55$) длиной 300 мм составляет менее 2 с.

Методы вакуумной, вакуумно-компрессионной и центробежной пропитки используют главным образом для изготовления ВМКМ с матрицей из легких и легкоплавких сплавов, армированной волокнами, нитевидными кристаллами или частицами углерода, бора, оксидов, карбидов и др. В последние годы широко используют вакуумно-компрессионную пропитку для изготовления ВМКМ с матрицей из интерметаллидных сплавов системы Ni–Al [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заболоцкий А.А.** Композиционные материалы с металлической матрицей. Итоги науки и техники. Сер ."Композиционные материалы". Т. 3. ВИНИТИ АН СССР, 1988. 108 с.

2. **Композиционные материалы:** Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса, Киев: Наукова Думка, 1985. 592 с.

3. **Матусевич А.С.** Композиционные материалы на металлической основе. Минск: Наука и техника. 1978, 216 с.

4. **Смитлз К.Г.** Металлы: Справочное издание. Пер. с англ., Мир, 1980. 477 с.

5. **Тучинский Л.И.** Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. М.: Металлургия, 1986. 208 с.

6. **Ghosh P.K., Ray S., Rohatgi P.K.** Trans. Jap. Jnst. Metals, 1984, 25, N 6, P. 440 – 444.

7. **Nourbakhsh S., Liang F. L., Margolin H.** Adv. mater. and Manuf. Process, 1988, 3, № 1, С. 57 – 78.

Глава 3.5

ЭЛЕМЕНТЫ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

3.5.1. КРИТЕРИИ РАЗРАБОТКИ ПРОЦЕССОВ

Процессы производства и дальнейшей обработки ВМКМ требуют учета не только параметров изделий, технологических факторов и конструктивных параметров технологической оснастки, но и параметров внутреннего строения композиций. В силу этого обстоятельства, а также неоднозначного влияния технологических факторов (например, повышение температуры и длительности воздействия на заготовку облегчает пластическое течение матричной составляющей при твердофазных процессах или повышает ее жидкотекучесть при жидкофазных процессах; в то же время возрастает опасность объемного химического взаимодействия составляющих, вызывающего, химическую деградацию волокон; повышение давления в твердофазном процессе облегчает образование прочного соединения составляющих ВМКМ, но при этом возрастает опасность разрушения волокон) повышенная сложность проектирования процессов, изделий, оснастки в единой системе обусловливает необходимость разработки САПР ТП. В этом направлении достигнуты первые успехи – созданы теоретические основы деформирования ВМКМ [2, 5, 6], разработаны системы комплексных расчетов параметров внутреннего строения ВМКМ, рабочих деталей оснастки, технологических режимов, изделий [5, 6], – на основе которых стало возможным создание элементов САПР ТП.

Базой для создания процессов и систем их автоматизированного проектирования является система критериев, состоящая из так называемых критериальных выражений, представляющих собой равенства или неравенства, в которые входят параметры процесса (рабочей детали оснастки) и параметры ВМКМ (или составляющей ВМКМ). Критериальные выражения проистекают из требований к качеству конструкционных ВМКМ – компактное состояние (строение), прочное соединение матричной составляющей и волокон без образования продуктов химического объемного взаимодействия, разрушения волокон и их термического ослабления. Введение критериального выражения в уравнение теории процесса позволяет установить предельное значение искомого параметра. Критерии подразделяют на универсальные и частные. Универсальные критерии твердофазных процессов рассмотрены ниже.

Критерий полного уплотнения. Для большинства процессов он выражается равенством

$$\varepsilon_{\text{ф к}} = k_{\text{нп}},$$

где $\varepsilon_{\text{ф к}}$ – степень деформации заготовки в безразмерном выражении; $k_{\text{нп}}$ – коэффициент неплотности заготовки (отношение суммарного объема неплотностей к объему, ограниченному контуром заготовки). В сечении ВМКМ можно выделить множество идентичных элементов, называемых элементарными ячейками ВМКМ [6], которые представлены на рис. 3.5.1. Величина $k_{\text{нп}}$ рассчитывается:

для ячейки, представленной на рис 3.5.1, *а*,

$$k_{\text{нп}} = d_f(4S - \pi d_f)/4(d_f + h_{0i})S,$$

где h_{0i} – толщина матричного плотного слоя;

для ячейки, представленной на рис. 3.5.1, *б*,

$$k_{\text{нп}} = p_m(4Sh_{\text{л}} - \pi d_f^2)/4S(h_{\text{л}} + h_{\text{ф}}),$$

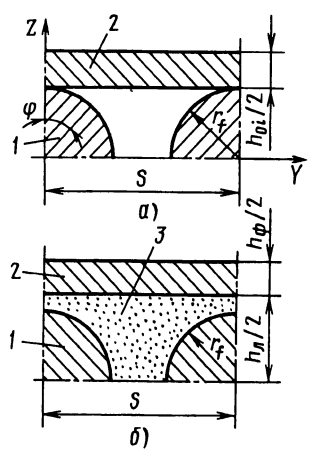


Рис. 3.5.1. Схема ячейки ВМКМ:
а – ячейка заготовки из волокон (*1*) и фольговых матричных слоев (*2*); *б* – ячейка заготовки из плазменных лент (*3*) с волокнами и фольговых матричных слоев

где $h_л$ и $h_ф$ – толщины соответственно пористой ленты с волокнами и фольги; p_m – пористость ленты в безразмерном выражении. Рассматриваемый критерий характеризуется еще одним выражением

$$p \geq \sigma^*_{sci},$$

где p – давление; σ^*_{sci} – среднее напряжение течения матричной составляющей в ячейке. Для определения последнего устанавливают главные напряжения по осям (рис. 3.5.2).

Расчет наибольшего главного нормального напряжения в ячейке $\sigma_{z\varphi}$ проводится по формуле

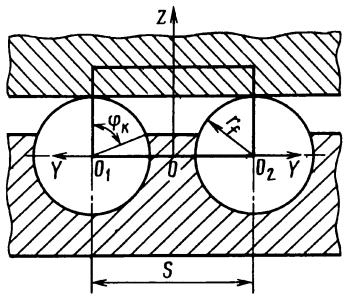


Рис. 3.5.2. Схема к аиализу напряженного состояния в ячейке композиционного материла

$$\sigma_{z\varphi} = 2\sigma_{sm} \sin r_f A + \sigma_{sm} A',$$

где σ_{sm} – предел текучести матричной составляющей; A и A' – показатели, равные:

$$A = \frac{1}{2r_f}\ln(S - 2r_f \sin\varphi) + \frac{1}{2S}\ln\left(\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\right) + \frac{2r_f}{S}\frac{1}{\sqrt{S^2 - 4r_f^2}}\operatorname{arctg}\left[\left(S\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2} - 2r_f\right) / \sqrt{S^2 4r_f^2}\right];$$

$$A' = 1 - 2r_f\left[\frac{1}{2r_f}\ln(S - 2r_f \sin\varphi_н) - \frac{1}{2S}\ln\left(\operatorname{tg}\frac{\varphi_н}{2}\right) + \frac{2r_f}{S}\frac{1}{\sqrt{S^2 - 4r_f^2}}\operatorname{arctg}\left(\frac{S\operatorname{tg}\frac{\varphi_н}{2} - 2r_f}{\sqrt{S^2 - 4r_f^2}}\right)\right],$$

где φ – текущее значение угловой координаты в ячейке ($\varphi_к$ – максимальное значение φ, равное π / 2); $\varphi_н = \arccos(1 - \sigma_{sm} / E^*_f)$; $\varphi_н$ – начальное значение угловой координаты; E^*_f – модуль упругости волокон при поперечном сжатии при температуре процесса.

После определения $\sigma_{z\varphi}$ и связанного с ним условием пластичности $\sigma_{y\varphi}$ легко устанавливается σ^*_{sci}.

Критерий сохранения сплошности волокон. Выражение для композиций с хрупкими волокнами представляет собой неравенство

$$p < \sigma^*_f,$$

где σ^*_f – сопротивление волокна разрушению при поперечном сжатии; для композиций с проволочными (нехрупкими) волокнами целесообразнее пользоваться неравенством

$$p < \sigma^*_{sf},$$

где σ^*_{sf} – предел текучести материала волокон при поперечном сжатии при температуре, соответствующей температуре процесса.

Критерий формирования прочного соединения составляющих композиционного материала. Время деформирования заготовки $t_д$ должно быть не меньше времени образования прочного соединения $t_с$, т.е.

$$t_д \geq t_с.$$

В общем случае формирование соединения характеризуется стадиями образования полного физического контакта (время $t_{ф\,к}$), активации соединяемых поверхностей ($t_а$) и химической реакции ($t_р$). При получении конструкционных ВМКМ сопротивления деформации матричной составляющей и волокон

различаются, как минимум, на порядок, поэтому в инженерных расчетах временем $t_{ф\,к}$ пренебрегают, а формирование продуктов реакции считают недопустимым, тогда критериальное выражение приобретает вид $t_д \approx t_a$. Последнюю величину рассчитывают по формуле [6]:

$$t_a = -\frac{1}{\nu}\ln\left(1-\frac{N}{N_0}\right)\exp\frac{E_{эфф}}{kT_д},$$

где ν – частота колебаний атомов в решетке деформируемого металла при температуре процесса $T_д$; k – постоянная Больцмана, число разрывов связей N_0 связано с числом образующихся связей N на единице поверхности соотношением $N \approx 0{,}9N_0$; $E_{эфф}$ – эффективная энергия образования связи, $E_{эфф} = E_a - \omega\tau_к$ (E_a – энергия активации формирования единичной связи; ω – показатель структурного фактора; $\tau_к$ – контактное касательное напряжение, практически равное $0{,}5\sigma_{sm}$).

Оптимальная длительность деформирования $t_д$ может устанавливаться на основании теоретических и экспериментальных данных по определению кинетического увеличения прочности $\bar{\tau}_{12}$ соединения из уравнения

$$\frac{\bar{\tau}_{12}}{(\bar{\tau}_{12})_{max}} = 1-\exp(-Kt_д^n),$$

где $(\bar{\tau}_{12})_{max}$ – максимальная прочность соединения; $K = Z_0K_ф K_з K_р$ – константа скорости взаимодействия [Z_0 – фиксированное число зародышей с прочной связью; $K_ф$, $K_з$ и $K_р$ – соответственно константы скоростей образования физического контакта, зарождения очагов взаимодействия и их увеличения до слияния]; n – показатель степени, характеризующий порядок реакции.

Критерий предупреждения термического разупрочнения волокон выражается неравенством

$$T_д < T_{н\,р},$$

где $T_{н\,р}$ – температура начала активного разупрочнения волокон. В большинстве случаев это температура, соответствующая снижению (по сравнению с исходной прочностью, т.е. при комнатной температуре) прочности на 5 % (иногда на 10 %). Для определения этого критериального условия выполняют серию температурных испытаний волокон на растяжение до разрыва.

3.5.2. МОДЕЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

ВМКМ являются гетерогенными материалами, в состав которых входят компоненты с различными физико-химическими и механическими свойствами. К деформационным процессам производства изделий из ВМКМ предъявляют особые требования. Они должны обеспечивать компактное строения ВМКМ, прочное соединение компонентов, сохранение сплошности и исходной прочности волокон, равномерное распределение компонентов в материале. Специфика строения и состава ВМКМ в сочетании с требованиями к технологии производства определяют особый подход к построению моделей деформационных процессов. Целью моделирования является оценка влияния технологических параметров процесса на свойства ВМКМ и изучение возможностей регулирования в компактируемой заготовке напряженно-деформированного состояния при допустимых температурно-скоростных условиях процесса. Разработка модели деформационного процесса ВМКМ прежде всего определяется уровнем различия свойств компонентов, типом заготовки, степенью ее неплотности. В случае возможности создания условий, при которых материалы матрицы и волокон приобретают близкие по величине характеристики пластичности, компоненты ВМКМ могут подвергаться совместной пластической деформации, что благоприятно сказывается на образовании прочного соединения компонентов, сохранении сплошности волокон. Деформация подобных гетерогенных материалов мало отличается от пластического формоизменения гомогенных материалов, т.е. реальных материалов и сплавов. Поэтому при построении моделей деформационных процессов пользуются традиционными методами моделирования, применяемыми в обработке металлов давлением [3, 4] с учетом особенностей строения материала. К числу ВМКМ, обладающих возможностью пластической деформации, относят материалы на основе меди,

никеля, титана, армированные проволокой из вольфрама, тантала, молибдена и др. Обязательным условием для осуществления процессов является высокая температура деформации. Хотя некоторое различие в характеристиках компонентов остается, волокна деформируются в благоприятных условиях, находясь в оболочке пластичной матрицы.

Особый подход к построению моделей деформационных процессов применяют, если невозможно обеспечить условия совместного пластического формоизменения компонентов ВМКМ (если в качестве упрочнителя применяют хрупкие или малопластичные волокна). В этом случае имеет место принцип однокомпонентной деформации матричной составляющей. Деформационный процесс представляет собой компактирование неплотной заготовки, которое осуществляется за счет пластического течения матричной составляющей в зазор между волокнами с последующим деформированием уплотненного материала или с последующей его выдержкой под давлением с целью создания прочного соединения компонентов. Для построения моделей подобных процессов очаг деформации рассматривается как совокупность "элементарных ячеек" ВМКМ, которые представляют собой локальные очаги деформации, где соседние волокна играют роль "внутреннего инструмента". На первом этапе анализа строится модель деформационного процесса на уровне "элементарной ячейки" ВМКМ, т.е. рассматривается процесс заполнения зазора между волокнами материалом матрицы (рис. 3.5.3). На втором этапе моделирования очаг деформации изучается в целом.

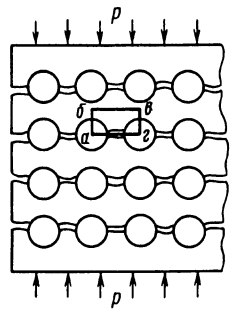


Рис. 3.5.3. Заполнение "элементарной ячейки" материалом матрицы при компактировании ВМКМ. Контуром *а-б-в-г* выделена одна ячейка

Для возможности обобщения результатов первого этапа моделирования, т.е. в рамках "элементарной ячейки", очаг деформации исследуют с целью определения закономерностей распределения послойных контактных деформаций и "оптимизации" конструкции заготовки. Под "оптимизацией" конструкции подразумевается корректировка толщин матричных слоев заготовки в зависимости от распределения послойных, контактных деформаций [5].

Процесс заполнения "элементарной ячейки" материалом матрицы представляет собой типичную для обработки металлов давлением задачу. Модель этого процесса может быть получена как экспериментальными, так и аналитическими методами.

Одна из моделей для ячейки, изображенной на рис. 3.5.4, *а*, получена методом совместного решения уравнений равновесия и условия пластичности. Она представляет собой

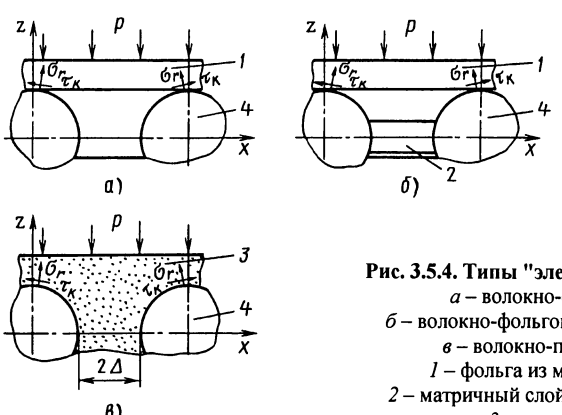


Рис. 3.5.4. Типы "элементарных ячеек" ВМКМ:
а – волокно-фольговая матрица;
б – волокно-фольговая и плазменная матрицы;
в – волокно-порошковая матрица;
1 – фольга из матричного материала;
2 – матричный слой, нанесенный плазменным напылением; *3* – порошковая матрица; *4* – волокна

систему уравнений, позволяющих расчетным путем получать значения главных и межкомпонентных напряжений, действующих в "элементарной ячейке", в зависимости от свойств матричной составляющей, геометрических характеристик ячейки и стадии компактирования:

$$\sigma_r = \sigma_z - \sigma_{sm}(1 - \mathrm{ctg}\varphi/2);$$

$$\tau_к = \mu\sigma_r; \qquad (3.5.1)$$

$$\sigma_x = \sigma_z - \sigma_{sm},$$

где σ_{sm} – предел текучести материала матрицы; μ – коэффициент трения на границе волокно–матрица.

Значения напряжения σ_z подсчитывают по формуле (3.5.1).

Расчетные значения относительных напряжений приведены на рис. 3.5.5. Представленная модель может использоваться для процессов, сопровождающихся изменением шага укладки волокон в ВМКМ (например, прокатка листов в поперечном относительно укладки волокон направлении). В этом случае дополнительно используются экспериментальные данные по динамике изменения шага укладки волокон при компактировании ВМКМ. Характер изменения напряжения σ_z определяют уровень напряжения течения материала матрицы в ячейке ВМКМ σ^*_{sci}. Поэтому, если при компактировании заготовки ячейки заполняются аналогично, т.е. используется "оптимизированная" заготовка, значения σ^*_{sci} могут быть использованы для определения деформационных параметров процесса в целом.

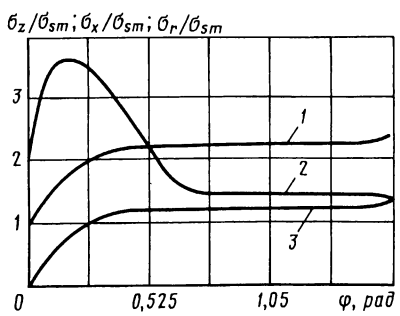


Рис. 3.5.5. Динамика изменения относительных напряжений при заполнении "элементарной ячейки":
1 – σ_z/σ_{sm}; *2* – σ_x/σ_{sm}; *3* – σ_r/σ_{sm}

Математическая модель процесса компактирования ВМКМ может быть реализована численными методами. В случае вязкопластического течения матричной составляющей система уравнений, описывающая течение материала матрицы в "элементарной ячейке" рассмотренного выше типа (см. рис. 3.5.1, *а*) в изотермических условиях процесса, состоит из:

дифференциального уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0;$$

условия пластичности Мизеса-Сен-Венана

$$S_{ij} = \frac{2T}{H}\dot{\varepsilon}_{ij};$$

кинематического соотношения

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i});$$

условия несжимаемости

$$v_{i,j} = 0;$$

реологических уравнений

$$T = T(H, \lambda, \theta)$$

и граничных условий.

В представленных уравнениях под T и H приняты интенсивности соответственно касательных напряжений и скоростей деформаций; λ – накопленная степень деформации сдвига; θ – температура процесса. Индекс после запятой означает дифференцирование по соответствующему индексу.

При решении системы уравнений методом конечных элементов в качестве неизвестных приняты компоненты скоростей перемещений v и средние напряжения σ_0. После их нахождения определяются значения напряжений в каждом элементе по формуле

$$\sigma_{i,j} = \delta_{ij}\sigma_0 + \mu(v_{ij} + v_{ji}),$$

где δ_{ij} – символ Кронеккера; $\mu = T/H$ – коэффициент вязкости.

Результаты расчетов удельного усилия компактирования P, полученные в результате моделирования по приведенной методике, представлены на рис. 3.5.6.

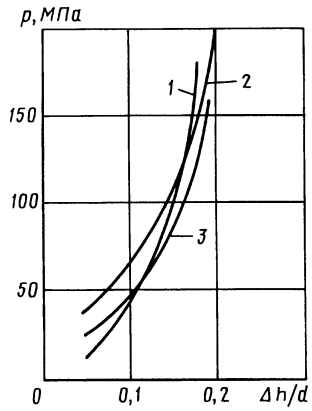


Рис. 3.5.6. Зависимость среднего давления компактирования от перемещения верхней границы ($\Delta h/d$) очага деформации при различных скоростях деформирования:
1 – $v_0 = 10^{-5}$ м/с; *2* – $v_0 = 10^{-6}$ м/с, *3* – $v_0 = 10^{-7}$ м/с

Модель процесса заполнения "элементарной ячейки" для случая использования наряду с компактными матричными элементами ленточных армированных полуфабрикатов (см. рис. 3.5.4, *б*) должна учитывать наличие пористых участков матричной составляющей. Компактирование ячейки рассматривается как двухстадийный процесс. На первой стадии происходит заполнение матричным материалом межволоконного пространства, на второй – уплотнение пористого матричного элемента. Принимается, что первоначально пористость p_m равномерно распределена по всему объему элемента *2* (см. рис. 3.5.4, *б*), а компактная матричная составляющая деформируется как жесткопластическая. Описанная модель реализована методом линий скольжения [8], в результате чего получены расчетные формулы для определения напряжений в ячейке ВМКМ:

$$\sigma_z = 0{,}5\sqrt{\frac{2}{3}}\frac{(1-p_m)^{2/3}}{p_m^{0,5}}\sigma_{smn};$$

$$\sigma_x = 0{,}5\sqrt{\frac{2}{3}}\frac{(1-p_m)^{2/3}}{p_m^{0,5}}\left(1-\frac{3}{2}p_m\right)\sigma_{smn},$$

где p_m и σ_{smn} – соответственно пористость и предел текучести пористого матричного материала. Их значения могут быть получены на основе реологических исследований.

Особый подход разработан для моделирования процесса компактирования в случае применения порошковой матрицы. Ее течение считается вязким, в исходном состоянии "элементарная ячейка" равномерно заполнена матричной составляющей, имеющей пористость p_m (см. рис. 3.5.4, *в*). В начальной стадии процесса, когда матричная составляющая находится в упругой области, соотношения между напряжениями и деформациями определяются в соответствии с законом Гука. Для моделирования последующих стадий компактирования используется гидродинамическая аналогия теории упругости, с помощью которой осуществляется переход к зависимостям между скоростью уплотнения и напряжением. Переход к скоростям деформаций осуществляется на основании аналогии между упругими характеристиками матрицы и коэффициентами объемной вязкости ξ и сдвиговой вязкости η пористого тела. Значение среднеквадратичного напряжения $\overline{\sigma}_\Delta$, действующего в "элементарной ячейке" на участке Δ (рис. 3.5.4, *в*), можно подсчитать по формуле

$$\overline{\sigma}_\Delta = \frac{3}{2}p\sqrt{\frac{p_{m\Delta}}{(1-p_{m\Delta})^3}D_{2\Delta}},$$

где p – внешнее давление; $p_{m\Delta}$ – пористость матрицы на участке Δ;

$$D_{2\Delta} = \sqrt{2D_{1\Delta}^2 - 3p_{m\Delta}(2-3p_{m\Delta})\left(\frac{1}{\mu_1\mu_2}-\frac{1}{\mu_1^2}\right)};$$

$$D_{1\Delta} = \frac{2-3p_{m\Delta}}{2}\frac{1}{\mu_2}+\frac{3}{2}p_{m\Delta}/\mu_1,$$

μ_1 и μ_2 – коэффициенты, учитывающие геометрические размеры очага деформации.

Таким образом, моделирование процессов компактирования ВМКМ, как правило, проводится в два этапа. Первоначально строится модель процесса заполнения материалом матрицы "элементарной ячейки", на основании которой оценивается напряженно-деформированное состояние при компактировании. При расчетах на основании критериальной системы (3.5.1) определяются наиболее благоприятные температурно-скоростные условия компактирования. На втором этапе на основании экспериментальных исследований течения матричной составляющей при деформации ВМКМ

корректируется "конструкция" заготовки. В результате этого достигается равномерное распределение напряженно-деформированного состояния по всему объему заготовки, а результаты первого этапа моделирования используются для всего деформируемого объема ВМКМ.

3.5.3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ САПР ТПП В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

3.5.3.1. ЛИСТЫ

Для решения задачи уплотнения матрицы в листовых волокнистых композитах с учетом особенности ее течения в межволоконном пространстве перспективным является применение современных численных методов [4], ориентированных на использование ЭВМ и создание на их основе достаточно полных математических моделей процесса компактирования.

На основе исследования процесса уплотнения и соединения волокна с матрицей разработан алгоритм и программа для расчета на ЭВМ параметров компактирования листов из ВМКМ горячей прокаткой (рис. 3.5.7). Исходными величинами для расчета по программе служат: параметры технологического оборудования, информация об исходных компонентах, параметры пакетной заготовки и технические требования к материалу. Среди них можно выделить параметры, варьируемые при разработке технологического режима, и жестко заданные параметры.

На первом этапе проводится выбор необходимых конструктивных элементов пакетной заготовки с целью обеспечения полного ее уплотнения. При этом выбирается объемная доля волокна и горизонтальный шаг укладки, а геометрические размеры определяются числом монолент в ней и вертикальным шагом укладки волокна. На втором этапе рассчитываются основные параметры процесса компактирования: суммарная относительная и абсолютная степень деформации, длительность прокатки с учетом времени образования соединения, распределения обжатий по проходам. Здесь вначале проводится проверка возможности прокатки за один проход, исходя из сохранения целостности волокна и длительности процесса, обеспечивающей образование необходимого уровня соединения волокна с матрицей. При несоблюдении хотя бы одного из условий процесс прокатки проводят за несколько проходов,

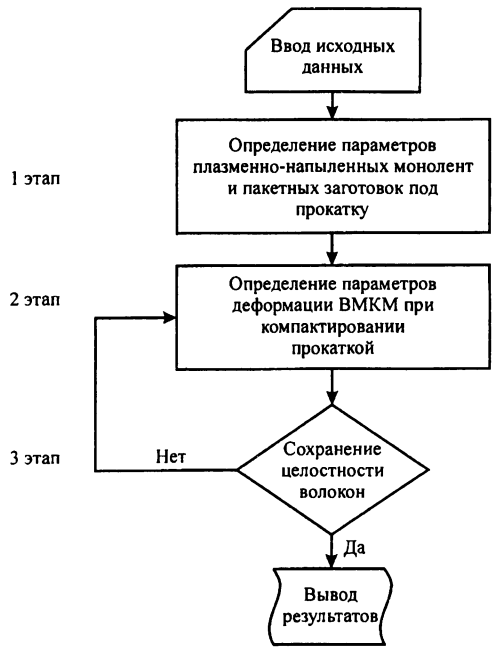


Рис. 3.5.7. Структурная схема алгоритма САПР процесса компактирования листов прокаткой

для этого предварительно рассчитывают необходимое их количество и параметры обжатия. При этом суммарная длительность всех проходов прокатки должна быть не меньше времени, необходимого для формирования соединения.

Значимость варьируемых факторов можно представить (в порядке убывания) следующим образом: объемная доля армирующих волокон, радиус валков прокатного стана, конечная толщина листа из ВМКМ, скорость прокатки, исходная прочность волокна и горизонтальный шаг его укладки в пакетной заготовке.

3.5.3.2. ТРУБЫ

Трубы из ВМКМ нашли широкое применение среди других видов изделий из композитов в качестве силовых элементов конструкций. Это в немалой степени объясняется, с одной стороны, эффективной работой композиционных труб, относящихся к изделиям с замкнутым контуром, с другой стороны, – относительно простой технологией их производства по сравнению с другими видами силовых элементов из ВМКМ. Возможность широкого применения труб из композиционных материалов может быть достигнута при наличии разнообразного их типоразмера с заранее заданным сочетанием структуры и свойств

ВМКМ. Для их производства необходима разработка большого количества подобных технологических процессов, т.к. компактирование трубных заготовок может осуществляться по аналогичным деформационным схемам с изменением лишь количественных показателей технологических процессов. Разработка технологии производства труб из ВМКМ осуществляется по хорошо формализованной схеме, которая базируется на рассмотренной критериальной системе (п. 3.5.3.1). В подобных случаях эффективно применение системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП). Прикладное программное обеспечение системы строится на основе алгоритма, представленного на рис. 3.5.8.

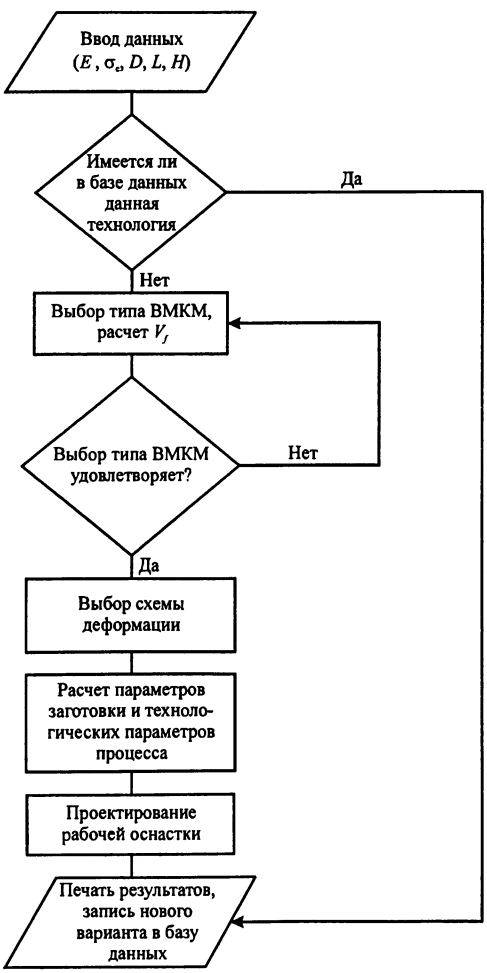


Рис 3.5.8. Структурная схема алгоритма работы САПР технологических процессов производства труб из ВМКМ

Первоначально пользователь в режиме диалога задает необходимые характеристики изделия, может определить тип ВМКМ. К числу задаваемых параметров изделия, как правило, относят механические характеристики материала (прочность и жесткость ВМКМ в абсолютном (σ_c и E), либо в удельном выражении), геометрические размеры готовой трубы (D, L, H). По заданным характеристикам изделия в базе данных ЭВМ проводится проверка наличия среди ранее разработанных технологических процессов проектируемого. При отрицательном результате проверки подбирается (в случае необходимости) тип ВМКМ.

Определяются объемные доли компонентов материала и подсчитываются параметры трубной заготовки. Трубы из композиционных материалов, работающие в качестве силовых элементов конструкций, армируются в продольном направлении (рис. 3.5.9).

Объемная доля волокон в материале подсчитывают с помощью правила смеси:

$$V_f = (\sigma_c - \sigma_m)/(\sigma_f - \sigma_m).$$

Расчет параметров заготовки проводят в зависимости от ее конструкции и схемы деформации. Компактирование трубы может осуществляться путем перемещения рабочего инструмента либо с внешней стороны заготовки (рис. 3.5.10, *а*), либо с внутренней (рис. 3.5.10, *б*), либо с обеих сторон одновременно (рис. 3.5.10, *в*). Первую схему применяют, главным образом, при производстве труб малого диаметра, вторую – для получения труб большого диаметра, третью можно использовать для компактирования толстостенных заготовок. Кроме того,

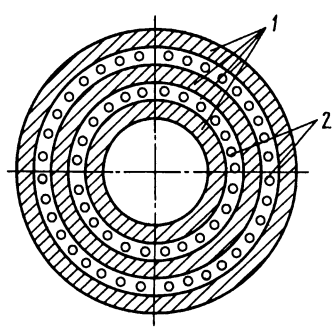


Рис. 3.5.9. Строение трубной заготовки:
1 – фольговые матричные слои;
2 – слои плазменных лент-полуфабрикатов

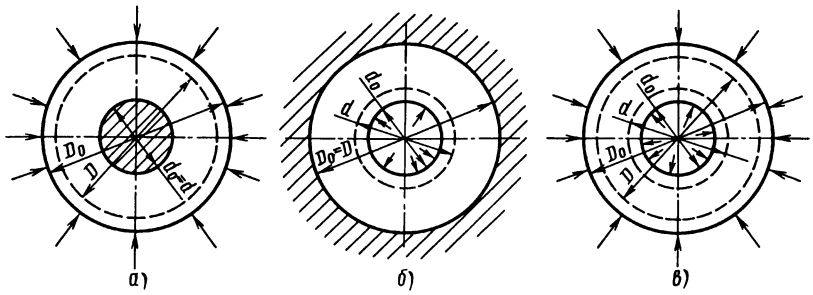


Рис. 3.5.10. Схемы деформации заготовки при приложении активной нагрузки с внешней стороны заготовки (*а*), с внутренней (*б*), с внешней и внутренней одновременно (*в*)

последняя схема дает возможность регулировать положение срединной линии трубной заготовки при ее компактировании.

Параметры заготовки, состоящей из чередующихся слоев плазменных лент-полуфабрикатов и фольговых прослоек (см. рис. 3.5.9) определяют решением системы уравнений:

$$V_f = (n\pi r_f^2) / \left[n\left(\pi r_f^2 + h_л S p_m\right) + (n+1) h_ф S\right];$$

$$\Delta h_r = n h_л + (n+1) h_ф - H; \quad d = D - 2H,$$

$$k_{нп} = \frac{(h_л S - \pi r_f^2) p_m}{(h_л + h_ф) S}; \quad H_0 = n h_л + (n+1) h_ф.$$

В случае применения первой схемы деформации трубы (см. рис. 3.5.10, *а*) система дополняется уравнениями:

$$D_0 = \sqrt{\frac{(D^2 - k_{нп} d^2)}{(1 - k_{нп})}};$$

$$\Delta h_r = (D_0 - D)/2.$$

Для второй схемы дополнительные уравнения имеют вид:

$$d_0 = \sqrt{\frac{(d^2 - k_{нп} D^2)}{(1 - k_{нп})}};$$

$$\Delta h_r = (d - d_0)/2$$

и для третьей:

$$D_0 = \sqrt{\frac{(D^2 - d^2 + d_0^2 (1 - k_{нп})}{(1 - k_{нп})}};$$

$$\Delta h_r = \left[(D_0 - D) + (d - d_0)\right]/2;$$

$$\Delta h_r = \left[(D_0 - d_0)/2\right] - H,$$

где n – число слоев плазменных армированных полуфабрикатов; p_m – пористость плазменных армированных полуфабрикатов; S – шаг укладки волокон; H – толщина стенки готовой трубы; Δh_r – абсолютная деформация заготовки в радиальном направлении; $k_{нп}$ – коэффициент неплотности; D_0 и d_0 – соответственно внешний и внутренний диаметры заготовки; D и d – то же, трубы; H_0 – толщина стенки заготовки.

Искомыми параметрами заготовки являются внешний либо внутренний ее диаметры (в зависимости от схемы), абсолютная деформация Δh_r, коэффициент неплотности заготовки, число слоев плазменных лент-полуфабрикатов, толщина стенки заготовки, толщины фольговых прослоек и плазменных лент. Система уравнений решается методом итераций, причем из базы данных ЭВМ используется информация о параметрах компонентов ВМКМ.

Следующим этапом работы системы является проектирование технологических параметров деформационного процесса, которые определяют на основании критериальной системы. Продольно армированные трубы, как правило, получают в условиях изостатической деформации за один цикл нагружений. Поэтому для достижения компактного состояния заготовки величина рабочего хода инструмента должна быть достаточной, чтобы выполнялось первое критериальное выражение ($k_{нп} \to 0$). Компактное состояние будет достигнуто, если абсолютная деформация заготовки составит величину Δh_r, которая находится при решении

вышеприведенных систем уравнений. Время компактирования определяется из второго критериального выражения (гл. 5.3.1) с учетом температурно-скоростных условий процесса. Компактное состояние заготовки достигается за время $t_ф = \Delta h_r / v_u$, где v_u – скорость деформирования заготовки.

Стадия активации поверхностей компонентов протекает в процессе выдержки заготовки под давлением в течение времени t_a. Суммарное время деформации составляет $t_д = t_ф + t_a$.

При компактировании заготовки волокна в радиальном направлении испытывают сжимающую нагрузку. После достижения компактного состояния трубы дальнейшая ее деформация приводит к значительному росту в материале гидростатических давлений. Появляется течение матричной составляющей в осевом направлении на граничных участках заготовки. Для сохранения сплошности волóкна не должны испытывать нагрузок, превышающих допустимое значение сопротивления деформации. Связь между степенью деформации заготовки и величиной межкомпонентных напряжений может быть получена с помощью математического моделирования либо экспериментальным путем. На основании этих данных оценивается динамика изменения нагрузки волокон на стадии компактирования, напряжение течения матричного материала в ВМКМ $\sigma^*_{ст}$, общее усилие деформации, предельно допустимое превышение величины деформации заготовки. Если на стадии компактирования волокна испытывают нагрузку, превышающую предельно допустимую, алгоритм расчета должен обеспечивать корректировку параметров процесса путем изменения температурно-скоростных условий деформации в пределах допустимого температурного интервала. Если уровень напряжений, действующих на волокна, не снижается до допустимых значений, ЭВМ сообщает о невозможности осуществления данного процесса. При благоприятных условиях пользователь получает информацию о допустимых интервалах параметров деформационного процесса и их оптимальных значениях.

Завершающий этап проектирования посвящен конструированию либо подбору оснастки деформационной установки. Размеры рабочих элементов установки определяются с учетом разности коэффициентов объемного термического расширения ВМКМ и материала оснастки.

Характер приложения нагрузки при компактировании трубных заготовок может быть различным. Если деформация осуществляется механическим перемещением рабочих элементов оснастки (рис. 3.5.11), возможность их движения в радиальном направлении определяется величиной зазора, который в процессе компактирования заготовки уменьшается. Для обеспечения равномерного нагружения заготовки по всей ее поверхности при наличии зазоров применяют технологические оболочки, которые размещают между заготовкой и рабочими элементами оснастки. Технологические оболочки выполняют из пластичного материала, их основные функции:

обеспечение равномерного распределения нагрузки по поверхности заготовки;

компенсация отклонений фактических параметров заготовки и процесса от расчетных путем частичного истечения материала технологической оболочки в зазоры между рабочими элементами оснастки;

предохранение заготовки от захолаживания и воздействия контактного трения на поверхности заготовка – инструмент.

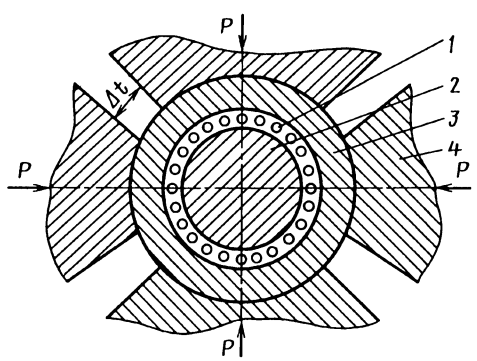


Рис. 3.5.11. Схема компактирования трубной заготовки при механическом перемещении рабочих элементов оснастки:
1 – заготовка ВМКМ, *2* – оправка, *3* – технологическая оболочка; *4* – рабочие элементы оснастки

Равномерность распределения напряженно-деформированного состояния на поверхности заготовки зависит от толщины технологической оболочки, геометрических размеров и формы зазоров между рабочими элементами оснастки. Зазоры выполняют роль, подобную облойным полостям, применяемым при объемной штамповке. Их протяженность в радиальном направлении определяют по формуле

$$b = \left\{2\mu\sigma^{*}_{sci}\Delta t - \sigma_s\Delta t\left[1 - 2\mu - \ln(1/2\mu)\right]\right\}/2\mu\sigma_s,$$

где μ – коэффициент трения на поверхности контакта технологической оболочки с рабочими элементами оснастки; σ_s – предел текучести материала технологической оболочки; σ^{*}_{sci} – напряжение течения матрицы ВМКМ.

При компактировании толстостенных труб размеры технологической оболочки и облойной полости определяют на основании математического моделирования [7].

Результатом проектирования является информация о составе и строении заготовки, размерах ее компонентов, технологических параметрах процесса, данные о конструкции деформационной установки. САПР работает по итерационной схеме. Оптимизация технологических параметров и определение допустимых интервалов их изменений осуществляется с помощью выражений критериальной системы, которые играют роль своеобразных целевых функций.

Рассмотренная САПР может использоваться отдельно либо как составная часть общей системы проектирования изделий из ВМКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арефьев Б.А.** Физико-химические основы компактирования волокнистых композиционных материалов. М.: Металлургия, 1988. 192 с.

2. **Волокнистые** композиционные материалы с металлической матрицей / Под ред. М.Х. Шоршорова, М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

3. **Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В.** Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. Киев: Наукова думка, 1986. 240 с.

4. **Гун Г.Я.** Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением, М.: Металлургия, 1983, 352 с.

5. **Колпашников А.И., Арефьев Б.А., Мануйлов В.Ф.** Деформирование композиционных материалов. М.: Металлургия, 1982. 247 с.

6. **Композиционные** материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

7. **Мануйлов В.Ф., Смирнов В. И., Галкин В.И.** Расчеты процессов деформации композиционных материалов. М.: Металлургия, 1992. 208 с.

8. **Ренне И.И.** Порошковая металлургия, 1985, № 5. С. 13 – 16.

Глава 3.6

ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВМКМ

3.6.1. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПАКТНЫХ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Процессы формовки применяют для одновременного компактирования и формообразования профильных изделий с незамкнутым контуром сечений из ВМКМ (совмещенные или одностадийные), а также для формообразования изделий из предварительно компактированных плоских заготовок. В этом случае формовка является вторичной переработкой компактных ВМКМ, такие процессы в целом можно рассматривать как двухстадийные.

Плоские заготовки предварительно компактируют в статических (прессование) или динамических (прокатка) условиях. На второй стадии изготовления компактные заготовки перерабатывают в профили гибкой в штампах на гидравлических или механических прессах, формовкой на профилегибочных роликовых машинах. Кроме того, из компактных плоских заготовок формуют изделия типа обечаек сверткой на валковых машинах.

3.6.1.1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИБКИ ВОЛОКНИСТЫХ ВМКМ

Профили в процессе эксплуатации подвергаются преимущественно растяжению, сжатию и изгибу. Указанные условия нагружения предопределяют продольное направление армирования профилей.

Процесс гибки плоских заготовок характеризуется наличием зон растяжения и сжатия. Допустимое формоизменение ограничивается уровнем тангенциальных (окружных) растягивающих напряжений на поверхности растяжения заготовки, вызывающим трещинообразование [6].

Специфика строения ВМКМ определяется, главным образом, наличием в пластичной матрице высокопрочных, малопластичных или хрупких упрочняющих волокон, этим же обусловлены и особенности деформационного поведения структурно-неоднородного материала при гибке.

Необходимое формоизменение достигается только благодаря пластическому течению материала матричной составляющей. Так как матрица ВМКМ занимает лишь часть объема заготовки, деформации матричной составляющей фактически больше деформаций, определяемых по изменению формы и размеров очага деформации заготовки в целом. Наличие нелинейных межкомпонентных границ обусловливает значительную неравномерность распределения напряжений и деформаций матричной составляющей в "ячейках" ВМКМ. В связи с этим нормальный ход процесса определяется запасом пластичности матричной составляющей ВМКМ, а также прочностью соединения матрицы и волокон. Поскольку в конструкционных ВМКМ применяют высокопрочные волокна и пластичные матрицы, при гибке профилей определяющим является фактор прочности соединения компонентов. Поэтому нарушение сплошности листовой заготовки из ВМКМ при гибке инициируется разрушением соединения на межкомпонентной границе и развивается, в отличие от монометаллических заготовок, в виде внутренней трещины, выходящей на поверхность растяжения при изгибе. Так как растягивающие межкомпонентные напряжения максимальны в диаметральной плоскости ячеек ближнего к поверхности растяжения ряда волокон в заготовке, разрушение инициируется на межкомпонентных границах именно этого участка очага деформации. Вероятность разрушения возрастает с понижением пластичности матрицы, ослаблением прочности соединения компонентов, а также с уменьшением радиуса изгиба.

Условие, при котором максимальная деформация матричной составляющей в "ячейках" ВМКМ превышает деформацию на поверхности растяжения армированной заготовки, определяется следующим соотношением:

$$\frac{h'_m}{h} \le \frac{d_f}{2S}, \qquad (3.6.1)$$

где d_f – диаметр волокон; S – шаг укладки волокон ВМКМ; h – толщина заготовки; h'_m – расстояние от поверхности растяжения заготовки до диаметральной плоскости волокон ближнего к ней ряда.

При выполнении соотношения (3.6.1) критерием оценки допустимой степени формоизменения ВМКМ при гибке являются признаки внутреннего трещинообразования.

Расчет величин главных и межкомпонентных напряжений, действующих в "ячейках" ближнего к наружной поверхности ряда волокон (рис. 3.6.1), при изгибе листов из ВМКМ с учетом параметров их строения выполняется по формулам [6], приведенным ниже.

Зона растяжения:

$$\sigma_{\rho\varphi} = \sigma_{\rho i} \frac{S}{S - d_f \sin\varphi} \exp(-B), \quad \text{где} \qquad (3.6.2)$$

$$\sigma_{\rho i} = -\sigma_{\tau m} \ln \frac{r/h+1}{r/h+1-h_m/h-d_f/2h(1-\cos\varphi)} - \frac{A}{n+1}\left\{\left(\ln\frac{r/h+1}{r/h+1/2}\right)^{n+1} - \right.$$

$$\left. - \left[\ln\frac{r/h+1-h_m/h-d_f/2h(1-\cos\varphi)}{r/h+1/2}\right]^{n+1}\right\}; \qquad (3.6.3)$$

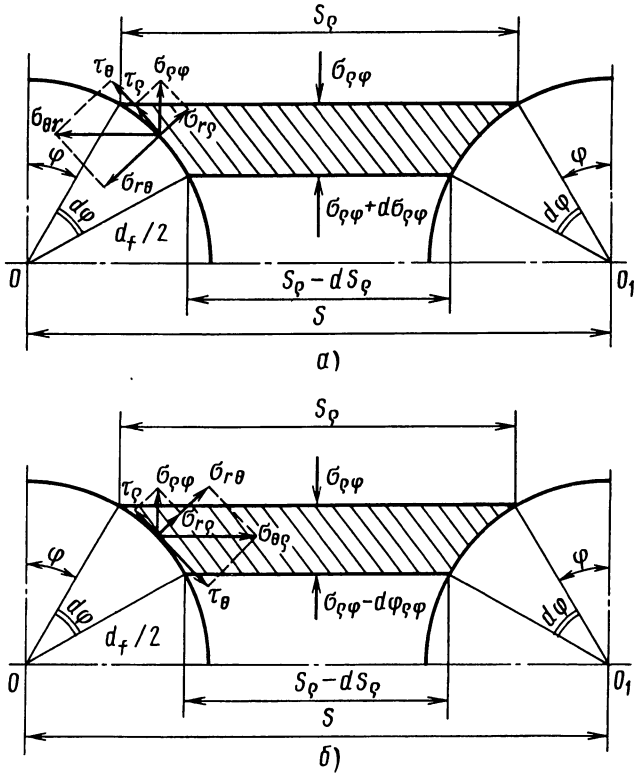


Рис. 3.6.1. Схема напряжений, действующих в элементарной "ячейке" ВМКМ при гибке:
а – зона растяжения; *б* – зона сжатия

$$B = \frac{2d_f}{\sqrt{S^2 - d_f^2}} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}\sqrt{S^2 - d_f^2}}{S - d_f \operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}}; \qquad (3.6.4)$$

$$\sigma_{\theta\varphi} = \sigma_{\tau m} + A\left\{\ln\left[1 + \frac{S}{S - d_f \sin\varphi}\,\frac{1 - 2h_m/h - d_f/h(1-\cos\varphi)}{2r/h + 1}\right]\right\}^n + \sigma_{\rho i}\frac{S}{S - d_f\sin\varphi}\exp(-B);$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\tau m}\sin\varphi + A\sin\varphi\left\{\ln\left[1 + \frac{S}{S - d_f \sin\varphi}\,\frac{1 - 2h_m/h - d_f/h(1-\cos\varphi)}{2r/h + 1}\right]\right\}^n +$$

$$+ \sigma_{\rho i}\frac{S(\sin\varphi + \cos\varphi)}{S - d_f\sin\varphi}\exp(-B).$$

Зона сжатия:

$$\sigma_{\rho\varphi} = \sigma_{\rho i}\frac{S - d_f\sin\varphi}{S}\exp(B),$$

где

$$\sigma_{\rho i} = -\sigma_{\tau m} \ln \frac{r/h + h_m/h + d_f/2h(1-\cos\varphi)}{r/h} - \frac{A}{n+1}\left\{\left(\ln\frac{r/h+1/2}{r/h}\right)^{n+1} - \right.$$

$$\left. - \left[\ln\frac{r/h+1/2}{r/h + h_m/h + d_f/2h(1-\cos\varphi)}\right]^{n+1}\right\};$$

$$\sigma_{\theta\varphi} = -\sigma_{\tau m} - A\left\{\ln\left[1 + \frac{S}{S - d_f\sin\varphi}\,\frac{1 - 2h_m/h - d_f/h(1-\cos\varphi)}{2r/h+1}\right]\right\}^n + \sigma_{\rho i}\,\frac{S - d_f\sin\varphi}{S}\exp(B);$$

$$\sigma_{r\varphi} = -\sigma_{\tau m}\sin\varphi - A\sin\varphi\left\{\ln\left[1 + \frac{S}{S - d_f\sin\varphi}\,\frac{1 - 2h_m/h - d_f/h(1-\cos\varphi)}{2r/h+1}\right]\right\}^n +$$

$$+ \sigma_{\rho i}\,\frac{(S - d_f\sin\varphi)(\sin\varphi + \cos\varphi)}{S}\exp(B),$$

где $\sigma_{\rho\varphi}$ – радиальные сжимающие напряжения в "ячейках" ВМКМ обеих зон; $\sigma_{\theta\varphi}$ – тангенциальные растягивающие (в зоне растяжения) и сжимающие (в зоне сжатия) напряжения в "ячейках" ВМКМ; $\sigma_{r\varphi}$ – радиальные (по отношениям к волокнам) напряжения, действующие по межкомпонентным границам в "ячейках" ВМКМ, растягивающие (в зоне растяжения) и сжимающие (в зоне сжатия); $\sigma_{\rho i}$ – радиальные сжимающие напряжения, действующие в материальных слоях зон растяжения и сжатия с текущей координатой ρ_i при изгибе однородного (свободного от волокон) материала матрицы и соответствующие рассматриваемым слоям в "ячейках" ВМКМ с той же координатой; S – шаг волокон; φ – текущее значение угловой координаты в "ячейках" ВМКМ; r – внутренний радиус изгиба; h – толщина листа; h_m – толщина наружных слоев матрицы.

В анализе процесса использована степенная аппроксимация кривой упрочнения матричного материала в виде

$$\sigma_{sm} = \sigma_{\tau m} + A\delta^n,$$

где $\sigma_{\tau m}$ – предел текучести материала матрицы; δ – истинная (логарифмическая) деформация матрицы в "ячейках" ВМКМ; A и n – параметры упрочнения.

Распределение деформаций матричной составляющей в "ячейке" ВМКМ определяется выражением

$$\delta = \ln\left\{1 + \frac{S[1 - 2h_m/h - d_f/h(1-\cos\varphi)]}{(S - d_f\sin\varphi)(2r/h+1)}\right\}. \qquad (3.6.5)$$

Максимальная деформация матричной составляющей соответствует $\varphi = \pi/2$, т.е. имеет место в диаметральной плоскости волокон.

В наиболее жестких условиях при гибке листов из ВМКМ находятся "ячейки", расположенные в зоне растяжения ближнего к наружной поверхности ряда волокон, где действуют максимальные тангенциальные растягивающие напряжения $\sigma_{\theta\varphi}$ и соответствующие им межкомпонентные напряжения отрыва $\sigma_{r\varphi}$, стремящиеся нарушить связь между матрицей и волокнами, т.е. в реальных разработках процессов формообразования гибкой профилей из ВМКМ одним из ведущих критериев является соотношение прочности соединения матрицы и волокон на отрыв σ_{mf} и максимальных растягивающих напряжений $\sigma_{r\varphi}$ ($\varphi = \pi/2$), действующих в диаметральной плоскости указанного ряда волокон:

$$\sigma_{\substack{r\varphi\,\max \\ (\varphi=\pi/2)}} \le \sigma_{mf}. \qquad (3.6.6)$$

На основании анализа процесса гибки волокнистых ВМКМ расчеты допустимых параметров формоизменения (r/h), параметров строения ВМКМ, выбор матричных материалов и т.п. рекомендуется проводить в соответствии с условием (3.6.6) по приведенным ниже выражениям.

1. Свободный изгиб:

а) листы из ВМКМ с однородной матрицей:

$$\sigma_{\tau m} + A\delta^n + \sigma_{\rho i}\frac{S}{S-d_f}\exp(-B) \le \sigma_{mf},$$

где $\sigma_{\rho i}$, B и δ определяют по формулам соответственно (3.6.3), (3.6.4), (3.6.5) и при $\varphi = \pi/2$. При параметре $h_m/h \le 0{,}1$ величиной $\sigma_{\rho i}$ можно пренебречь и расчет требуемых параметров производить в соответствии с выражением

$$\sigma_{\tau m} + A\left\{\ln\left[1+\frac{S[1-2h_m/h-d_f/h]}{(S-d_f)(2r/h+1)}\right]\right\}^n \le \sigma_{mf},$$

отсюда

$$\frac{r}{h} \ge \frac{S(1-2h'_m/h)}{2(S-d_f)(\mathrm{e}^m-1)} - \frac{1}{2},$$

где $m = \left(\dfrac{\sigma_{mf}-\sigma_{\tau m}}{A}\right)^{1/n}$, $h'_m = h_m + d_f/2$.

При данных r/h и характеристиках материала матрицы определяются значения параметров h'_m/h и S.

$$\frac{h'_m}{h} \ge \frac{1}{2} - \frac{(\mathrm{e}^m-1)(S-d_f)(2r/h+1)}{2S};$$

$$S \ge \frac{d_f(2r/h+1)(\mathrm{e}^m-1)}{(1-2h'_m/h)+(2r/h+1)(\mathrm{e}^m-1)};$$

б) листы из ВМКМ с комбинированной матрицей.

Листовые заготовки выполнены с наружными неармированными зонами из более прочных сплавов по сравнению с основным материалом матрицы. Расчеты необходимо вести с учетом дополнительных радиальных напряжений, вносимых при изгибе более прочной неармированной матричной составляющей в соответствии с выражением

$$\sigma_{\tau m} + A\left\{\ln\left[1+\frac{S[1-2h'_m/h}{(S-d_f)(2r/h+1)}\right]\right\}^n +$$

$$+(\sigma'_{\rho i}+\Delta\sigma_{\rho i})\frac{S}{S-d_f}\exp(-B) \le \sigma_{mf},$$

где $\sigma'_{\rho i}$ – радиальное сжимающее напряжение, действующее на границе неармированной зоны с основным матричным материалом,

$$\sigma'_{\rho i} = -\sigma'_{\tau m}\ln\frac{r/h+1}{r/h+1-h_m/h} - \frac{A'}{n'+1}\left[\left(\ln\frac{r/h+1}{r/h+1/2}\right)^{n'+1} - \left(\ln\frac{r/h+1-h_m/h}{r/h+1/2}\right)^{n'+1}\right]; \quad (3.6.7)$$

$\Delta\sigma_{\rho i}$ – радиальное напряжение, действующее в рассматриваемом слое основного матричного материала без учета наружной неармированной зоны,

$$\sigma'_{\rho i} = -\sigma'_{\tau m}\ln\frac{r/h+1-h_m/h}{r/h+1-h'_m/h} - \frac{A'}{n+1}\left[\left(\ln\frac{r/h+1-h'_m/h}{r/h+1/2}\right)^{n+1} - \left(\ln\frac{r/h+1-h'_m/h}{r/h+1/2}\right)^{n+1}\right]; \quad (3.6.8)$$

B – определяется по формуле (3.6.4), характеристики $\sigma'_{\tau m}$, A', n' относятся к материалу наружных зон.

Специфика напряженно-деформированного состояния ВМКМ, расчеты и экспериментальные данные свидетельствуют, что свободный изгиб является практически неприемлемым для изготовления элементов жесткости (профилей сложных сечений), где требуются соизмеримые с гибкой традиционных листовых материалов радиусы изгиба. Тем не менее, формообразование ВМКМ в условиях свободного изгиба может быть рекомендовано для изготовления целого ряда деталей с незначительной кривизной переходов. При обработке малопластичных листовых материалов приложение дополнительных нагрузок при изгибе является эффективным средством интенсификации процесса. Одним из таких способов является радиальное воздействие на очаг деформации. Положительное действие радиального подпора заключается в увеличении доли сжимающих напряжений в "ячейках" ВМКМ, что обусловливает (в соответствии с условием

пластичности) снижение уровня тангенциальных и межкомпонентных растягивающих напряжений, облегчает задачу сохранения связи между волокнами и матрицей в процессе деформации.

2. Изгиб с радиальным подпором:

а) листы из ВМКМ с однородной матрицей:

$$\sigma_{тm} + A\delta^n + (\sigma_{\rho i} + \sigma_п)\frac{S}{S - d_f}\exp(-B) \le \sigma_{mf},$$

где $\sigma_п$ – напряжение радиального подпора; δ, $\sigma_{\rho i}$ и B определяются по формулам соответственно (3.6.5; 3.6.3; 3.6.4) при $\varphi = \pi/2$;

б) листы из ВМКМ с комбинированной матрицей:

$$\sigma_{тm} + A\delta^n + (\sigma'_{\rho i} + \Delta\sigma_{\rho i} + \sigma_п)\frac{S}{S - d_f} \times \times \exp(-B) \le \sigma_{mf},$$

где $\sigma'_{\rho i}$, $\Delta\sigma_{\rho i}$, δ и B определяются по формулам соответственно (3.6.7; 3.6.8; 3.6.5; 3.6.4) при $\varphi = \pi/2$.

По указанным выражениям рассчитывают допустимые параметры гибки (r/h), параметры строения листовых заготовок и т.д., а также минимальную величину требуемого радиального подпора $\sigma_п$, обеспечивающую проведение процесса без нарушения связи между компонентами.

Таким образом, основными факторами, влияющими на возможности процесса пластического изгиба плоских заготовок из ВМКМ, являются природа матричного материала, прочность связи компонентов, диаметр и шаг укладки волокон (объемная доля), глубина залегания волокон и величина радиального подпора.

Приведенные ниже расчетные значения допустимых относительных радиусов изгиба относятся к ВМКМ системы алюминий–бор. В расчетах принята величина прочности соединения компонентов ВМКМ на отрыв (σ_{mf}), равная 0,9 прочности менее прочной составляющей – матрицы.

Расчетные значения r/h при свободном изгибе листовых заготовок из ВМКМ АД1-В, 1201-В, АМг61-В и АД1-В с утолщенными наружными зонами из сплава 1201 (комбинированная матрица) представлены в табл. 3.6.1.

Показатель технологической пластичности бороалюминия (относительный радиус изгиба при заданном угле изгиба $\pi/2$) в зависимости от величины V_f представлен на рис. 3.6.2.

3.6.1. Расчетные значения r/h

Материал	Объемная доля волокон, V_f	h'_m / h	S, мкм	r/h
АД1-В	0,10	0,28	340	14
	0,20	0,15	320	22
	0,30	0,10	300	28
	0,40	0,07	270	34
	0,50	0,06	240	42
1201-В	0,30	0,10	300	55
	0,40	0,07	270	64
АМг61-В	0,30	0,10	300	117
1201-АД1-В	0,30	0,22	270	21
		0,23		15
		0,35		9

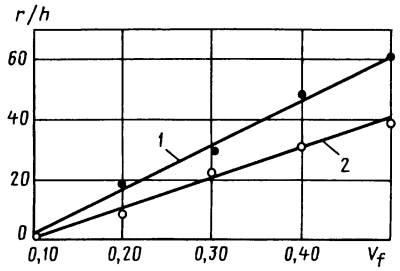


Рис. 3.6.2. Влияние объемной доли волокон и состояния ВМКМ АД1-В на допустимый радиус изгиба листовых компактных заготовок:
1 – горячедеформированный материал;
2 – отожженный материал

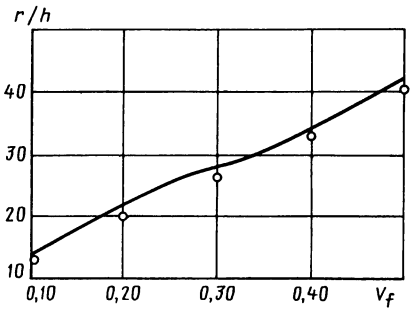


Рис. 3.6.3. Допустимые радиусы изгиба листовых заготовок из ВМКМ АД1-В в отожженном состоянии в зависимости от объемной доли волокон:
— – расчетные данные, ○ – экспериментальные данные

Оценку допустимой степени формоизменения проводят по двум критериям: признакам разрушения (трещины) на наружной поверхности образцов и признакам внутреннего трещинообразования. Расчетная методика обеспечивает надежные для реального производства данные (рис. 3.6.3).

Влияние параметра h'_m / h на r/h отражено на рис. 3.6.4 по результатам расчетов и испытаний на примере ВМКМ 1201-АД1-В с различной толщиной наружной зоны при фиксированной объемной доле волокон армированной области.

Расчетные значения r/h при гибке с радиальным подпором листовых заготовок из ВМКМ различного состава приведены в табл. 3.6.2. Числовые результаты получены методом последовательных приближений.

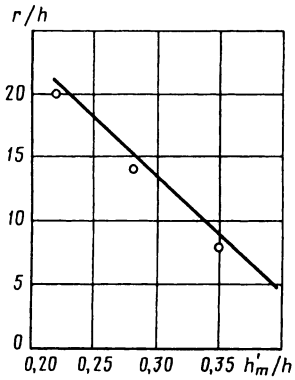


Рис. 3.6.4. Влияние параметра h'_m/h на допустимый радиус изгиба листовых заготовок из ВМКМ с комбинированной матрицей 1201-АД1-В в отожженном состоянии:
— – расчетные данные; ○ – экспериментальные данные

3.6.2. Расчетные значения параметров r/h

Материал	S, мкм	h'_m / h	V_f	$\sigma_п$, МПа					
				10	20	30	40	50	60
				r/h					
АД1-В	300	0,10	0,30	17,0	10,8	7,0	4,6	3,2	2,0
	270	0,07	0,40	21,4	14,1	9,6	6,7	4,7	3,4
	240	0,06	0,50	28,0	17,3	13,6	9,8	7,3	5,3
АМг61-В	300	0,10	0,30	87,4	66,1	50,6	39,2	30,7	24,3
	270	0,07	0,40	107,1	82,7	64,7	51,1	40,8	32,8
1201-В	300	0,10	0,30	37,9	26,7	19,3	14,4	10,7	8,1
	270	0,07	0,40	44,9	34,0	25,3	19,1	14,5	11,4

2.6.3. Влияние h_m/h на величину r/h

S, мкм	h_m/h	V_f	$\sigma_п$, МПа								
			10	15	20	25	30	35	40	50	60
270	0,17	0,30	12,5	–	7,8	–	4,9	–	3,0	1,7	0,9
240		0,35	15,6	–	10,4	–	7,0	–	4,7	3,2	2,3
270	0,23	0,27	8,8	–	5,1	3,8	2,8	1,9	0,3	*	–
240		0,31	11,4	–	7,3	5,8	4,6	3,7	2,5	–	*
270	0,30	0,24	4,2	2,5	*	–	–	–	–	–	–
240		0,28	6,3	4,7	3,4	2,3	*	–	–	–	–

Примечание. * – означает, что любое $r/h \geq 0$ удовлетворяет решению.

Согласно расчетным данным воздействие радиального подпора приводит к резкому уменьшению допустимых радиусов изгиба армированных листов указанных составов. На величину r/h (в заданном интервале $\sigma_п$) оказывает влияние объемная доля волокон. С увеличением V_f (уменьшением S и h'_m/h) допустимый радиус изгиба во всех случаях возрастает. Кроме того, величина r/h в значительной степени зависит от механических свойств и характеристик деформационного упрочнения материала матрицы.

Влияние параметра h_m/h на технологическую пластичность при изгибе с радиальным подпором отражено в табл. 3.6.3 на примере расчета r/h для ВМКМ АД1-В с наружными зонами из сплава 1201.

3.6.1.2. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ГИБКЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ВМКМ, УПРОЧНЕННЫХ НЕПРЕРЫВНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Пластические свойства листовых полуфабрикатов ВМКМ при гибке зависят от двух групп факторов: структурных и технологических. К структурным факторам можно отнести физико-химические и механические свойства компонентов ВМКМ, их геометрические параметры и распределение армирующих компонентов в объеме ВМКМ, к технологическим – совокупность условий изготовления листовых ВМКМ и их переработки в деталь. Только комплексный учет структурных и технологических факторов на этапах изготовления собственно ВМКМ и изготовления детали позволяет обеспечить необходимую пластичность и получение требуемой формы детали без повреждения структуры ВМКМ.

Обеспечение пластичности листовых ВМКМ достигается:

1) разработкой процессов, учитывающих требования их последующего деформирования (прочность связей на границе волокно–матрица, близкая к прочности наиболее слабого компонента; обеспечение ресурса термовременного воздействия на заготовку; обеспечение минимальной величины дефектности матричного сплава);

2) созданием специальных структур КМ (использование матричных сплавов, обладающих высокой пластичностью; использование плакирующих слов конструкционного и функционального назначения; формирование конструкций ВМКМ, обеспечивающих заданное распределение пластических свойств);

3) обеспечением оптимальных условий деформирования заготовок (управление схемами нагружения заготовок, использование нагрева и термической обработки для понижения пластичности матричного сплава).

На этапе изготовления листовых ВМКМ определяющими являются технологические факторы, обеспечивающие получение бездефектной структуры и достаточную степень

пластичности. Одним из основных факторов является выбор компонентов ВМКМ и обеспечение совместимости волокон с матричными сплавами с точки зрения образования качественного соединения на граничной поверхности.

Для ВМКМ системы Al-B влияние на сохранение прочности на границе волокно–матрица оказывает появление на граничной поверхности химического соединения (диборида алюминия) [1, 7, 8]. Его образование вызывает появление полостей в зоне контакта волокон бора с металлической матрицей. На рис. 3.6.5 показана зависимость относительной прочности соединения компонентов ВМКМ ($\tau_{ск} / \tau_т$) и относительного количества атомов контактной поверхности (N / N_0), вступивших в химическую связь, от температуры получения композиционного материала.

Рост толщины химической прослойки зависит от основных параметров технологического процесса изготовления материала: температуры, давления и времени.

Существенным для композиционных материалов, изготовляемых из плазменно-напыленных полуфабрикатов, является получение структуры матричного материала, обладающего достаточной пластичностью. Так, плазменно-напыленный слой матрицы в моноленте имеет пористую структуру (об. доля пор 25 %) и высокое содержание оксидов алюминия.

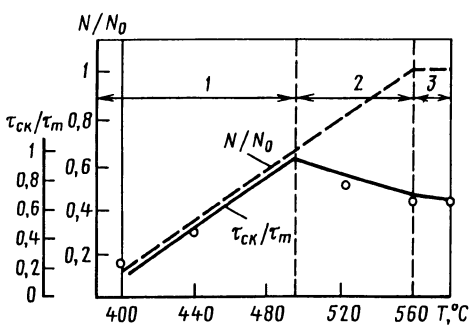


Рис. 3.6.5. Зависимость взаимодействия борного волокна с матрицей от температуры:
1 – интерметаллидов нет;
2 – появление и рост интерметаллидов;
3 – сплошной слой интерметаллидов

В процессе прессования ВМКМ пористость уменьшается до 3...5 %. Вследствие наличия остаточной пористости и высокого содержания Al_2O_3 для различных алюминиевых сплавов существует тенденция увеличения предела текучести на 50...80 %, предела прочности на 25...40 % и снижения относительного удлинения на 25...35 % [3, 4] .

Наряду с обеспечением максимальной прочности соединения на граничной поверхности на этапе изготовления ВМКМ следует предусматривать резерв ресурса термовременного воздействия, обеспечивающий проведение последующих операций деформирования при гибке полуфабриката и термической обработки:

$$\Phi_0 - \Phi_{изд} \geq \Phi_п + \Phi_{экспл},$$

где $\Phi_0 = f(T, \tau, p)$ – полный ресурс термовременного воздействия на ВМКМ; T – температура; τ – время; p – давление; $\Phi_{изд}$ – ресурс, израсходованный на изготовление ВМКМ; $\Phi_п$ – ресурс, израсходованный на изготовление детали из ВМКМ; $\Phi_{экспл}$ – ресурс, необходимый для функционирования детали из ВМКМ в изделии.

Наличие резерва термовременного воздействия обеспечивает гибкость процесса изготовления деталей путем введения дополнительных операций рекристаллизационного отжига для увеличения ресурса пластичности, закалки, нагрева и др.

Процессы изготовления листовых ВМКМ должны также обеспечить минимальное число вторичных фаз, уменьшающих пластические свойства ВМКМ вследствие образования пор, концентраторов напряжений и т.д.

Использование в структуре ВМКМ более пластичных матриц обеспечивает соответственно более высокую пластичность композита ВМКМ. Если для рассматриваемого процесса пластичность оценивать ее технологической характеристикой – минимальным радиусом гибки, то он увеличивается в среднем в 2 раза при использовании в качестве матрицы сплава АД33 и в 4 – 5 раз – сплава АМг61 по сравнению с алюминиевой матрицей АД1 (рис. 3.6.6).

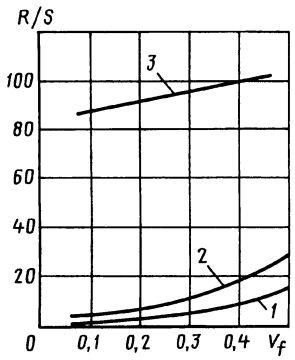


Рис. 3.6.6. Зависимость относительного минимального радиуса гибки от объемной доли волокон бора для ВМКМ на основе сплавов:
1 – АД1, *2* – АД33; *3* – АМг61

Минимальный радиус гибки листовых ВМКМ зависит также от расположения армирующих компонентов и толщины плакирующих слоев. Для неизменной объемной доли волокон и тетрагональной схемы расположения волокон в ВМКМ имеется бесчисленное множество комбинаций структуры, ограниченных следующим соотношением:

$$Sb = \frac{\pi d_f^2}{4V_f} = \text{const},$$

где S – шаг волокон; b – толщина монослоя; d_f – диаметр волокон; V_f – объемная доля волокон композиционного слоя.

Изменение параметра S элементарной ячейки влечет за собой изменение параметра b, поэтому целесообразно ввести относительную величину – приведенный параметр ячейки, который является геометрической характеристикой структуры армирования ВМКМ:

$$h = b / S$$

и описывается выражением

$$h = \frac{\pi}{4V_f}\left(\frac{d_f}{S}\right)^2.$$

Зависимость структуры армирования ВМКМ от объемной доли волокон для волокон диаметром 0,14 мм показана на рис. 3.6.7.

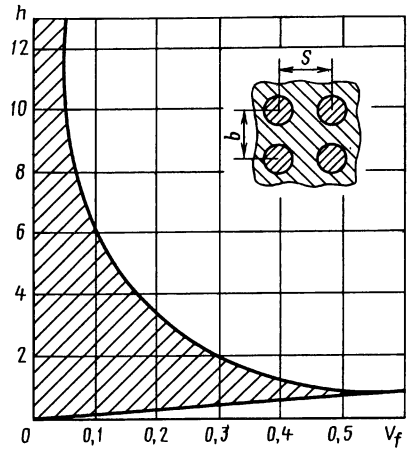


Рис 3.6.7. Изменение параметра h в зависимости от объемной доли волокон в композиционном слое при прямоугольной укладке волокон

Кривая зависимости имеет характерную форму с пиком для теоретически максимальной объемной доли около 0,60, соответствующей тетрагональной укладке волокон с учетом минимальных зазоров между волокнами, обеспечиваемых технологией изготовления ВМКМ. С уменьшением объемной доли волокон увеличивается число вариантов структуры. Нижняя кривая, ограничивающая область возможных комбинаций структур, определяет варианты с максимальным значением шага волокон в монослое, верхняя – с минимальным.

На рис. 3.6.8 представлены зависимости относительного минимального радиуса гибки листового ВМКМ марки ВКА-2 от объемной доли волокон и приведенного структурного параметра армирования. Огибающая $h_{\min}$ (штриховая линия) определяет минимальный достижимый радиус гибки для данной объемной доли волокон. Величина $h_{\max}$ ограничивает максимальные значения радиуса для данной объемной доли и толщины заготовки. При увеличении толщины плакирующего слоя зона возможных вариантов структур ВМКМ сужается, а относительный минимальный радиус для материалов с равной объемной долей волокон уменьшается. Этот факт подтверждают также зависимости, представленные на рис. 3.6.9.

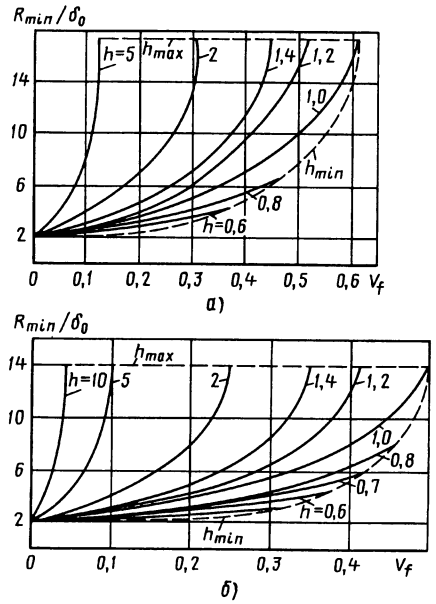


Рис. 3.6.8. Зависимость относительного минимального радиуса гибки от объемной доли волокон и параметра ячейки ВМКМ:
а – без плакирующего слоя; $\delta_n/\delta_0 = 0$;
б – с плакирующим слоем,
имеющим относительную толщину 0,16

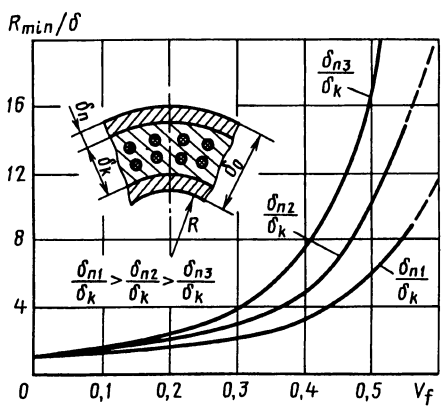


Рис. 3.6.9. Зависимость относительного минимального радиуса гибки от объемной доли волокон и толщины плакирующего слоя

Уменьшение минимального радиуса гибки происходит вследствие перераспределения деформаций в изогнутой заготовке при использовании односторонней внешней плакировки и снижения показателя жесткости схемы НДС в крайнем монослое волокон вследствие действия дополнительных радиальных сжимающих напряжений.

Введение плакирующих слоев в качестве конструкционных дополнительно увеличивает поперечную прочность и сдвиговые характеристики материала, однако снижает эффективность деталей из ВМКМ по массе. Это следует учитывать при конструировании ВМКМ и, в случае неприемлемости такого варианта повышения технологической пластичности использовать другие методы.

Одним из них является локальная оптимизация конструкции заготовки, которая заключается в повышении технологической пластичности ВМКМ в зонах сосредоточения максимальных деформаций при формообразовании. Минимальная ширина зоны со специальной структурой составляет $b = 2(R + \delta)$. Единственным ограничением при реализации специальных структур является относительно высокая трудоемкость их изготовления, которая минимальна для равномерных структур и более высока для локального армирования. Поэтому при их применении требуется дополнительно проводить как технический, так и экономический анализ.

Эффективным является также управление параметрами процесса формоизменения для увеличения технологической пластичности листового полуфабриката из ВМКМ. Существуют два принципиально различных направления: регулирование напряженно-деформированного состояния путем выбора рациональных схем нагружения заготовки и увеличение пластичности материала матрицы применением термического воздействия.

Влияние технологических параметров процесса деформирования на величину R_{min}/δ листов ВМКМ в зависимости от объемной доли волокон бора в ВМКМ марки ВКА-2 показано на рис. 3.6.10.

Значения относительного радиуса при свободной гибке описываются кривой *1*, положение которой определяется структурными характеристиками материала и его компонентов, а также свойствами, полученными на эта-

пе изготовления ВМКМ. При изменении схемы НДС возможно получение меньшей величины R_{min}/δ вследствие уменьшения зоны растяжения или снижения уровня напряжений растяжения на граничной поверхности волокно–матрица. Так, кривая *2* иллюстрирует уменьшение R_{min}/δ при наложении радиального сжатия на зону гибки заготовки. Дальнейшее уменьшение можно достичь путем тангенциального сжатия области деформирования заготовки.

Деформирование при повышенных температурах позволяет значительно уменьшить минимальные радиусы гибки ВМКМ путем повышения пластичности сплава матрицы. Значениям достигаемого минимального радиуса гибки при нагреве заготовки и тангенциальном сжатии зоны деформирования соответствует кривая *3* (см. рис. 3.6.10).

Область, заключенная между кривыми *1* и *3* (см. рис. 3.6.10), охватывает множество комбинаций факторов, воздействующих на заготовку в процессе изготовления детали: радиального и тангенциального сжатия, термической обработки, нагрева заготовки и др. Эти кривые ограничены структурными параметрами материала заготовки: верхняя – пластичностью матрицы при нормальных условиях деформирования, а нижняя – предельным взаимодействием структурных армирующих компонент, как правило, в области сжатия. Типовые схемы рассмотрены ниже.

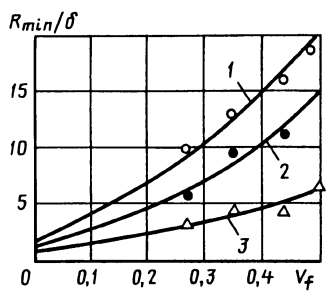


Рис. 3.6.10. Влияние параметров процесса на относительный минимальный радиус гибки для ВМКМ системы АД33-В в зависимости от объемной доли волокон:
1 – свободная гибка; *2* – гибка в эластичную среду (полиуретан СКУ-7Л); *3* – гибка с нагревом и тангенциальным сжатием

3.6.1.3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ ГИБКИ

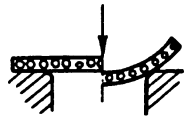
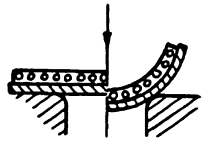
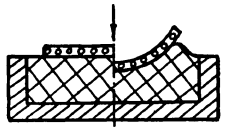
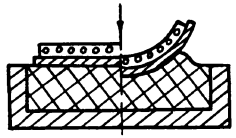
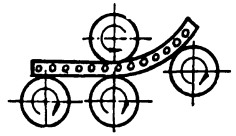
Систематизация типовых схем деформирования и технологических факторов, повышающих пластичность ВМКМ, приведена в табл. 3.6.4. Наименьшую трудоемкость имеет гибка в холодном состоянии – гибка в штампах и в валковых машинах. Однако эти схемы обеспечивают минимальное формоизменение заготовки при гибке. Так, при свободной гибке ВМКМ системы Al-B непосредственно после прессования минимальный относительный радиус составляет 20,0...21,0 (рис. 3.6.11).

Для уменьшения радиусов кривизны путем изменения схемы НДС применяют гибку в эластичную среду с жесткими подкладками, специальные схемы нагружения, а также сочетания различных методов наложения давления. Гибка в эластичную среду (например, полиуретан) путем наложения радиального давления на заготовку позволяет уменьшить минимальный радиус гибки на 15...18 % по сравнению со свободной гибкой (см. рис. 3.6.11). Для реализации этой схемы применяют штампы, в которых в качестве матрицы используется эластичная подушка. Такие штампы наиболее эффективно применять на гидравлических прессах.

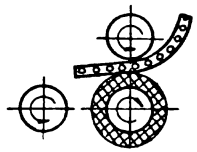
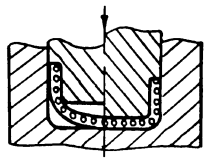
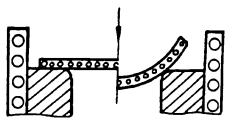
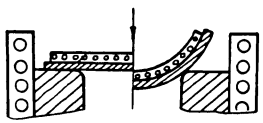
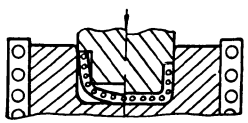
При гибке в эластичную среду необходимо обеспечить уменьшение контактного трения между заготовкой и эластичной средой, так как в противном случае вследствие течения полиуретана возрастают тангенциальные растягивающие напряжения на внешней поверхности заготовки. Уменьшение контактного трения достигают нанесением на заготовку слоя смазки.

Гибка с подкладками позволяет обеспечить практически такие же значения минимальных радиусов кривизны, что и при гибке в эластичную среду. При гибке подкладки располагают со стороны поверхности растяжения в заготовке ВМКМ и деформируют их вместе с заготовкой. В качестве подкладок можно использовать листы из различных материалов – алюминиевых сплавов, сталей. Толщину подкладки выбирают обычно исхода из величины давления радиального сжатия. Для этого можно использовать тарировочные кривые (рис. 3.6.12).

3.6.4. Типовые схемы и факторы повышения пластичности листов ВМКМ при гибке

Обозначение схемы гибки (см рис 3.6.13)	Условия гибки	Схема гибки	Факторы повышения пластичности	Оснастка	Оборудование
X_1	Свободная		Нет	Инструментальные штампы	Листогибочные и листоштамповочные кривошипные и гидравлические прессы
X_2	С подкладками		Радиальное и тангенциальное сжатие		
X_3	В эластичную среду		Радиальное сжатие	Штампы с эластичной подушкой	Листогибочные и листоштамповочные гидравлические прессы
X_2X_3	В эластичную среду с подкладками				
X_4	В валках		Нет	Не используется	Машины листогибочные трех- и четырехвалковые

Продолжение табл. 3.6.4

Обозначение схемы гибки (см рис 3.6 13)	Условия гибки	Схема гибки	Факторы повышения пластичности	Оснастка	Оборудование
X_5	В валках с эластичным покрытием		Радиальное сжатие		Машины одно- и двухвалковые с эластичным элементом
X_6	Стесненная		Тангенциальное сжатие	Специальные штампы	Листогибочные и листоштамповочные гидравлические прессы
X_1H	Свободная с нагревом		Нагрев	Специальные нагреваемые штампы, штампы с устройствами для электроконтактного, индукционного нагрева	Листогибочные и листоштамповочные кривошипные и гидравлические прессы
X_2H	С подкладками и нагревом		Нагрев с радиальным и тангенциальным сжатием		
X_6H	Стесненная с нагревом		Нагрев с тангенциальным сжатием		Листогибочные и листоштамповочные гидравлические прессы

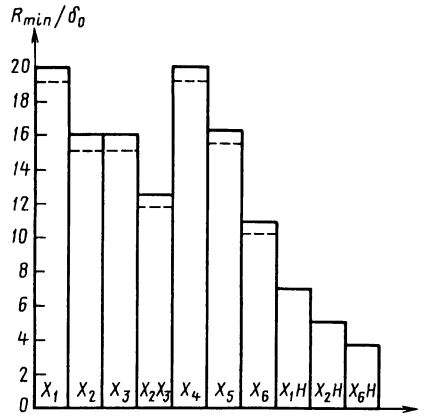


Рис. 3.6.11. Зависимость относительного минимального радиуса R/δ_0 от методов и факторов гибки:
—— – лист в состоянии поставки,
- - - - - – лист после отжига, обозначения X_1, ..., X_6H соответствуют табл. 3.6.4

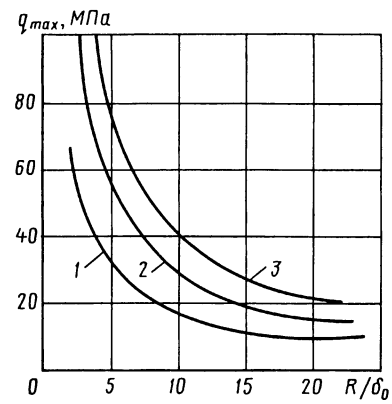


Рис. 3.6.12. Зависимость максимального радиального давления на деформируемую заготовку от относительного радиуса гибки:
1 – подкладка из сплава АМцМ; *2* – подкладка из сплава Д16АМ, *3* – подкладка из стали 45

Необходимым условием реализации этого метода является взаимодействие заготовки ВМКМ с подкладкой, обеспечиваемое силами трения. В отличие от гибки в эластичную среду в данном случае силы трения стремятся уменьшить величину тангенциальных деформаций на внешней поверхности заготовки из ВМКМ, обеспечивая тангенциальное сжатие.

Для увеличения эффективности гибки с помощью взаимодействия заготовки с подкладкой в ряде случаев их соединяют по контактной поверхности методами склеивания, пайки, сварки. Этот случай соответствует варианту, аналогичному структурному воздействию на заголовку, – за счет плакирующих слоев технологического назначения. При этом расчет технологических и деформационных параметров можно выполнять как для слоисто-волокнистых ВМКМ. Гибка в эластичную среду с подкладками является комбинацией рассмотренных схем и позволяет существенно (на 40...45 %) уменьшать относительные радиусы кривизны по сравнению со свободной гибкой. Используют преимущественно подкладки из легких алюминиевых сплавов Д16АМ, АМг6 и др. толщиной на 10...40 % больше толщины заготовки.

Гибка в жестких валках и валках с эластичным покрытием обеспечивает получение относительных радиусов кривизны, близких к получаемым методам свободной гибки и гибки в эластичную среду. При изготовлении деталей цилиндрической или конической формы гибка в валках наиболее производительна.

При деформировании в холодном состоянии изгиб с тангенциальным сжатием очага деформации обеспечивает получение наименьших радиусов кривизны. При этой схеме деформирования требуются создание специальных штампов, высокая точность исходных заготовок ВМКМ, и реализуется она на гидравлических прессах.

Для уменьшения радиусов кривизны применяют также методы, повышающие пластичность матрицы, – предварительную разупрочняющую термическую обработку и нагрев очага деформирования. При этом проведение разупрочняющей термической обработки позволяет уменьшить относительный радиус свободной гибки на 17,5...18,0 %. Нагрев заготовки осуществляется по режимам, соответствующим полному отжигу сплава матрицы ВМКМ. Так, для отжига ВМКМ системы Al-B используют нагрев до 653...693 К. Выдержку и охлаждение выбирают в соответствии с матричным сплавом. Ограничения на режимы накладываются из условия взаимодействия структурных компонентов ВМКМ.

На рис. 3.6.13 представлена зависимость минимально достижимого радиуса гибки заготовок в состоянии поставки и после отжига. Повышение пластичности матричного слоя в результате отжига ВМКМ уменьшает значения относительного радиуса гибки на 30...40 %. При этом происходит стабилизация свойств деформируемого материала.

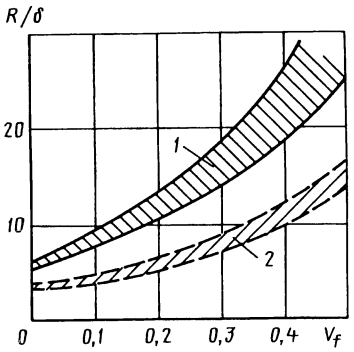


Рис. 3.6.13. Зависимость минимально достижимого относительного радиуса гибки от объемной доли волокон и термической обработки ВМКМ (*1*, *2* – лист бороалюминиевого ВМКМ соответственно в состоянии поставки и после отжига). Кривыми ограничены заштрихованные области, определяющие разброс экспериментальных значений

Для наиболее эффективного увеличения технологической пластичности при гибке заготовку нагревают, а интервал температурного деформирования выбирают из условия получения максимальной пластичности сплава матрицы ВМКМ. Так, для ВМКМ системы Al-B этот интервал составляет 693...723 К. Общее время выдержки при этой температуре не должно превышать 30 мин. Благодаря увеличения пластичности матрицы при горячем деформировании значения максимальных относительных радиусов свободной гибки уменьшаются до 6,5...7,0 для ВМКМ с объемной долей волокон 0,45...0,5.

Использование подкладок при горячей гибке позволяет получать детали с относительными радиусами 4,5...5,0. Толщину подкладок выбирают в пределах 1,0...1,5 толщины заготовки ВМКМ.

После изготовления деталей, технологический процесс которых включает операции нагрева, для получения максимальных показателей прочности и жесткости готовой детали проводят закалку по режиму закалки сплава матрицы.

При изготовлении деталей гибкой с нагревом следует учитывать остаточный ресурс термовременного воздействия с учетом этапов изготовления ВМКМ.

Важнейшее значение имеет подготовка поверхностей заготовки и инструмента перед деформированием, поскольку силы контактного трения, возникающие между рабочими поверхностями инструмента и деформируемой заготовки ВМКМ, приводят к увеличению тангенциальных напряжений растяжения на поверхности заготовки и минимальных радиусов гибки. Для уменьшения сил трения следует использовать смазку, наносимую между контактными поверхностями.

При холодной гибке используют традиционные для алюминиевых сплавов смазки [7], позволяющие уменьшить коэффициент трения в 2 – 2,5 раза: технический вазелин; 50 % окисленного петролатума + 50 % масла вапор; 50 % хозяйственного мыла + 50 % воды. Перед нанесением смазки поверхность заготовки обезжиривают.

При повышении температуры контактных поверхностей коэффициент трения увеличивается, и роль смазки возрастает. При горячей гибке можно применять следующие смазки: графитовый коллоидный водный препарат B_0 или B_1; двухсернистый молибден марки ВНИИНП-229. Смазку наносят на обезжиренную поверхность заготовки и рабочую поверхность инструмента.

На качество деталей из ВМКМ, изготовляемых методами гибки, существенное влияние оказывает состояние краевой зоны листовой заготовки, определяемое операцией раскроя. Наличие в этой зоне концентраторов напряжений в виде расслоений, сколов, трещин при проведении пластического деформирования приводит к образованию дефектных зон значительной протяженности, что вызывает необходимость введения дополнительных операций обрезки, снижает КИМ и увеличивает трудоемкость изготовления детали. Поэтому проведение разделительных операций с использованием ножниц, штампов, предшествующих гибке, не рекомендуется.

Для уменьшения вероятности образования краевых дефектов при гибке ВМКМ марки ВКА-2 резку материала на заготовки следует производить методами механической обработки с использованием алмазного инструмента или методами электроэрозионной обработки.

3.6.1.4. ПРОЦЕССЫ, ОСНАСТКА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Для рассмотрения процессов гибки листовых ВМКМ разделяют их на три группы в зависимости от предельных деформаций, необходимых для изготовления деталей (рис. 3.6.14).

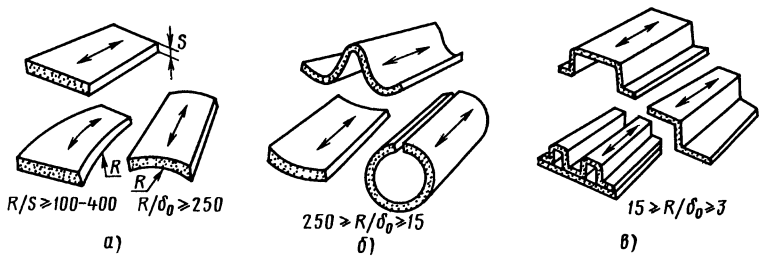


Рис. 3.6.14. Типизация форм деталей, изготовленных из листов ВМКМ (стрелками указано направление расположения волокон):
а – детали плоские и малой кривизны вдоль и поперек волокон; *б* – детали с зоной изгиба в направлении поперек волокон; в – детали, сочетающие зону изгиба в направлении поперек волокон и плоские поверхности

Первая группа (рис. 3.6.14, *а*) включает детали, гибка которых осуществляется с малыми упругопластическими деформациями в сечении. Средняя равномерная деформация во внешних (плакирующих) слоях достигает 0,2 %, в межволоконном пространстве – 1...1,5 %. Конструктивно эта группа ограничивается относительным радиусом гибки R / δ_0, значение которого больше 250 толщин материала δ_0. Их деформирование сопровождается значительным пружинением заготовки после снятия нагрузки.

Вторая группа (рис. 3.6.14, *б*) содержит детали, при гибке которых максимальная деформация матрицы в крайних монослоях не превышает величины, близкой к предельно допустимой, и составляет 20...25 %. Средняя деформация во внешнем плакирующем слое при этом не превышает 3,5...4 %. Конструктивное ограничение для таких деталей выражается соотношением $250 \geq R/\delta_0 \geq 15$.

К третьей группе (рис. 3.6.14, *в*) относят детали, при гибке которых в матрице монослоев волокон деформации превышают предельно допустимые значения, а радиусы гибки меньше 15 толщин материала.

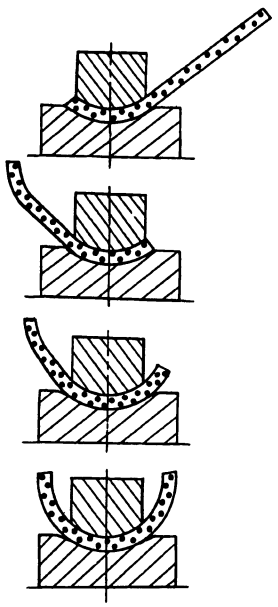
Детали первой группы наиболее эффективно изготовлять гибкой в валках. Для этого используют листогибочные валковые машины с жесткими и эластичными валками.

После выполнения гибки вследствие пружинения происходит уменьшение кривизны, и конечное ее значение отличается от требуемого. Величина пружинения нестабильна и зависит от отклонений толщины заготовки, объемного содержания волокон, механических свойств ВМКМ и др. Необходимая точность изготовления достигается с помощью стабилизации механических свойств ВМКМ путем проведения предварительной термической обработки; многопроходной гибки на одинаковых режимах настройки оборудования; настройки оборудования на увеличенный начальный радиус гибки.

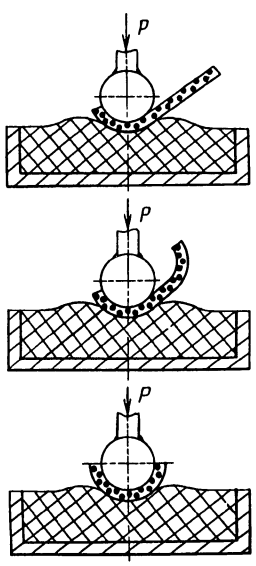
При гибке не допускается включение в технологический процесс операций обратной разгибки материала, которые приводят к разрушению ВМКМ. Поэтому коррекция радиуса гибки при настройке листогибочных машин должна быть односторонней.

Детали, отнесенные к первой группе, могут быть изготовлены также гибкой в штампе. Однако для деталей значительных габаритных размеров (более 1...2 м) использование этого способа оказывается экономически неэффективно. Последнее объясняется в основном присущим ВМКМ пружинением, которое необходимо учитывать для достижения необходимой точности контура деталей. Корректировка рабочей поверхности оснастки в большинстве случаев является малоэффективной, так как в отличие от гомогенных материалов струкура ВМКМ вносит дополнительные погрешности в ее расчет вследствие статистического разброса механических свойств листов. Избежать этого можно путем термической обработки заготовок или деформирования их при повышенных температурах.

Готовыми представителями деталей второй группы являются трубчатые элементы открытого и закрытого контура. Их изготовляют гибкой в штампах, обычно с использованием эластичной подушки или на листогибочных машинах с эластичным валком.



а)



б)

Рис. 3.6.15. Многопереходная штамповка деталей постоянной кривизны из ВМКМ в жестких штампах (*а*) и с применением эластичной среды (*б*)

Несмотря на более высокие значения степени деформаций при формообразовании деталей второй группы пружинение после гибки оказывается значительным. Поэтому при изготовлении деталей открытого контура используют корректировку рабочего контура оснастки, предварительную термическую обработку. При этом для деталей открытого контура с относительной толщиной стенки (δ / R) более 0,55 – 0,070 целесообразно использование инструментальных штампов, которые обеспечивают деформирование краевых зон.

Если радиус имеет постоянное значение, возможно использование упрощающих схем, представленных на рис 3.6.15, *а*. Такие схемы снижают стоимость оснастки, а процесс выполняется в несколько переходов пошаговой гибкой.

Для деталей с относительной толщиной стенки (δ / R) менее 0,055 – 0,070 более эффективна гибка в эластичную среду, осуществляемая в несколько переходов (рис. 3.6.15, *б*). При этом достигается значительное упрощение оснастки. Для получения деталей различной конфигурации требуется только изготовление соответствующих пуансонов.

Обычно последовательность переходов при гибке следующая: подгибаются краевые зоны, а затем центральная часть заготовки. Шаг подгибки при деформировании в универсальном инструментальном штампе определяется габаритными размерами его матрицы таким образом, что каждый последующий шаг подгибки должен обеспечивать перекрытие соседних изогнутых зон.

При гибке в эластичную среду давление со стороны эластичной матрицы распределяется по поверхности детали неравномерно (рис. 3.6.16). Поэтому полное обжатие заготовки по пуансону обеспечивается выбором шага подгибки краевых зон в зависимости от глубины внедрения пуансона в эластичную среду:

$$l_к = (0{,}5 - 0{,}7)(R + \delta)\arccos\frac{R - H_0}{R + \delta},$$

где $l_к$ – расстояние от кромки заготовки до линии приложения усилия; R – радиус пуансона; δ – толщина изгибаемого материала; H_0 – заданная глубина внедрения пуансона в эластичную среду.

После подгибки кромок осуществляют деформирование заготовки с шагом $2l_к$.

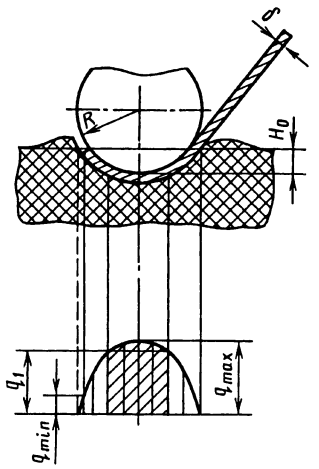


Рис. 3.6.16. Распределение давления от эластичной матрицы по поверхности заготовки

Глубина внедрения пуансона зависит от упругих свойств эластичной среды, прочности и жесткости технологической оснастки для осуществления гибки.

К деталям трубчатой формы, изготовляемым гибкой, как правило, предъявляют более высокие требования по форме и соблюдению размеров, поскольку последующей операцией обычно является сварка. Основные требования при этом: отклонение от параллельности линии стыка кромок образующей поверхности детали не должна превышать ±0,3 мм на длине 1000 мм; величина пружинения по наружному диаметру не должна превышать 2 – 3; угол $\alpha = \pm 7°$ (рис. 3.6.17).

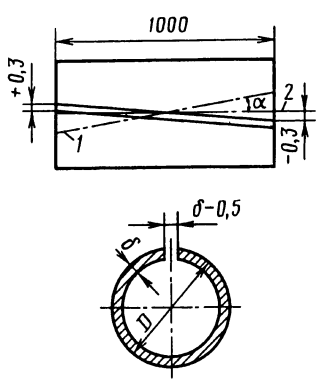


Рис. 3.6.17. Схема к основным требованиям по точности изготовления труб из листов для последующей сварки:
1 – направление расположения волокон;
2 – ось трубы

Такие требования к точности определяют необходимость формообразования трубчатых заготовок из ВМКМ за две операции – предварительной гибки листового ВМКМ и последующей калибровки трубчатой заготовки. Схему гибки выбирают в зависимости от геометрических параметров детали и пластических свойств ВМКМ, которые в первую очередь зависят от объемной доли волокон. Типовые схемы, обеспечивающие параллельность образующей направлению армирующих волокон, показаны на рис. 3.6.18.

При гибке в штампе (рис. 3.6.18, *а*) заготовка, поданная до упора в рабочую зону штампа, сначала подвергается предварительной гибке между матрицей *1* и оправкой *2*. Затем подвижная полуматрица *3* подгибает левую, а неподвижная *4* – правую полки заготовки. При нижнем положении ползуна пресса происходит окончательная гибка (сжатие) заготовки полуматрицами на оправке.

Для уменьшения степени пружинения гибку призводят в штампах с перемещением полуматриц *4*, осуществляющих окончательную гибку от клина *5* (рис. 3.6.18, *б*) или в штампе с качающимися полуматрицами-кулачками (рис. 3.6.18, *в*). В штампе на рис. 3.6.18, *в* предварительно изготовленная заготовка укладывается на поверхность кулачков (полуматриц) *6*. При опускании верхней части штампа,

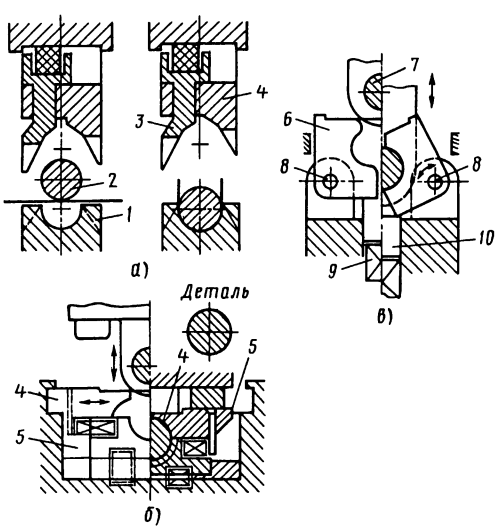


Рис. 3.6.18. Типовые схемы гибки заготовок ВМКМ в штампах

а значит, и гибочного пуансона *7* вначале заготовка получает V-образную форму, а затем кулачки поворачиваются на осях *8* и осуществляют окончательную гибку. При подъеме верхней части штампа кулачки возвращаются в исходное положение пружиной *9* через толкатель *10*.

Наряду с известными преимуществами штампов их использование имеет следующие недостатки при изготовлении трубчатых заготовок из ВМКМ: большая стоимость изготовления и повышенный износ подвижных частей при гибке толстых и жестких материалов (к которым относятся и ВМКМ), наличие операции, при которой происходит свободная гибка заготовки из листа ВМКМ без дополнительного радиального или тангенциального нагружения, что ограничивает применимость схем ввиду низкой пластичности материала; для деталей больших габаритных размеров (длиной более 500 мм) оснастка становится громоздкой, трудоемкой в изготовлении и эксплуатации. Поэтому для мелкосерийного производства предпочтение отдают универсальной оснастке.

Комплект универсальной оснастки для операций гибки листовых заготовок при изготовлении трубчатых деталей закрытого контура включает контейнер с эластичной подушкой *1* и пуансон *2* (рис. 3.6.19, *а*). Для выполнения операции гибки используют универсальные листогибочные прессы с гидравлическим приводом.

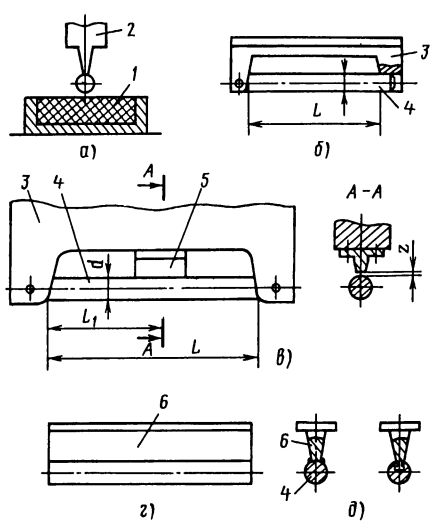


Рис. 3.6.19. Оснастка и примеры выполнения гибочного пуансона

Такую оснастку обычно используют для изготовления широкой номенклатуры деталей как по длине, так и по диаметру. Габаритные размеры ее рабочей зоны устанавливают исходя из максимальных геометрических параметров деталей. Для переналадки оснастки проводят замену формующих элементов пуансонов, при этом контейнер остается неизменным.

Типовые конструкции пуансонов показаны на рис. 3.6.19, *б – г*. Для гибки трубчатых деталей с относительной длиной (l/d) менее 5 – 6 возможно выполнение пуансона по схеме балки (рис. 3.6.19, *б*). Это позволяет легко снимать полученную трубную заготовку с пуансона после гибки. Конструкция пуансона должна предусматривать шарнирное соединение одного конца пуансона и быстроразъемное соединение другого конца с рамкой для возможности удаления изогнутой заготовки.

При длине изгибаемых трубчатых деталей, равной более 6 диаметров, в конструкции пуансона используют промежуточные опоры для устранения прогиба пуансона в процессе формовки. Число промежуточных опор устанавливается из условия, что длина свободных участков формирующего элемента – не более 5 – 6 его диаметров. В случае отсутствия промежуточных опор происходит прогиб формующего элемента, что приводит к искажению формы трубчатой детали, которая приобретает бочкообразную форму, в ряде случаев – к излому волокон. Промежуточные опоры (рис. 3.6.19, *в*) жестко соединяются с силовой рамой *3* пуансона и свободно располагаются относительно формующего элемента *4* с зазором или без него. Максимальная величина зазора не должна превышать 10 % толщины материала заготовки ВМКМ. Разъемное соединение промежуточных опор *5* с формующим элементом *4* необходимо для удобства снятия готовой детали после штамповки.

В ряде случаев удобно использовать для поддержки пуансона непрерывную опору *6*, как это показано на рис. 3.6.19, *г*. Такая опора обеспечивает жесткость формующего элемента при выполнении процесса гибки. Она может неразъемно, например, сваркой, соединяться с формующим элементом, а также, в отдельных случаях, образовывать разъемное соединение (см. рис. 3.6.19, *д*).

Ширина опорных элементов *5* и *6* в зоне контакта с формующим элементом *4* определяет зазор на стыке изготовляемой детали – недоформовку детали. Эта величина должна

быть минимальной и выбираться из условия прочности на смятие контактных поверхностей опорных и формующих элементов. Величина недоформовки и наличие пружинения заготовки определяют необходимость использования калибровочного перехода.

В процессе калибровки осуществляется обжатие заготовки в ограниченном объеме жесткого штампа.

Типовые схемы калибровочных штампов показаны на рис. 3.6.20. Калибровочный штамп состоит из верхней *1* и нижней *2* полуматриц, а также съемной жесткой оправки *3*, располагаемой в рабочей полости штампа. Рабочий контур полуматриц выполнен в соответствии с наружным, а жесткая оправка – с внутренним диаметром детали. Заготовка помещается в полость, образуемую рабочими поверхностями полуматриц *1*, *2* и оправки *3*.

В случае необходимости получения зазора под последующую сварку продольного шва труб используют промежуточные элементы: свободный вкладыш *5* и встроенный упор *6*, ширина которых определяет зазор под сварку. Использование встроенного упора *6* обеспечивает также формирование требуемого направления расположения стыка относительно образующей детали.

Отличие процессов изготовления деталей третьей группы, характерными представителями которой являются профили, обусловлено сочетанием в конструкции деталей криволинейных и прямолинейных участков, а значение радиусов кривизны этих участков соизмеримо с их минимально допустимыми значениями для соответствующих металлических КМ.

Процессы гибки профилей можно разделить в зависимости от условий реализации на три категории, определяемые формой детали и объемным содержанием волокон в ВМКМ: первая – гибка в холодном состоянии в эластичную среду; вторая – гибка в холодном состоянии в инструментальных штампах; третья – гибка в горячем состоянии.

Общим для первых двух категорий является типовое построение процесса, включающего, например, для ВМКМ с алюминиевой матрицей операции: полного отжига листовой заготовки; гибки заготовки с увеличенными радиусами $l \approx (1{,}3\ldots1{,}2)\,R_{\min}$; неполного отжига; гибки заготовки с окончательными радиусами до $R \approx (1{,}0\ldots0{,}8)R_{\min}$; окончательную термическую обработку – закалку и старение.

В ряде случаев закалка выполняется перед окончательной операцией формообразования, которая проводится непосредственно после термообработки. В дальнейшем заготовка подвергается искусственному старению. Такое совмещение операций термической обработки уменьшает эффект термовременно́го воздействия на заготовку.

При изготовлении профилей наиболее характерно использование процессов с промежуточной термической обработкой для гибки в эластичную среду, что приводит к универсальности и малой стоимости используемой оснастки.

При изготовлении профилей в штампах процесс желательно вести в одну операцию, а технологичными являются конструкции, имеющие радиусы кривизны $R > R_{\min}$.

Для процессов второй и третьей групп деталей используют инструментальные штампы как без нагрева, так и с нагревом. Общим для этих штампов является построение контура рабочих частей для различных конструкций профилей.

Профили уголковой формы изготовляют, как правило, методами свободной гибки (без калибровки или с калибровкой).

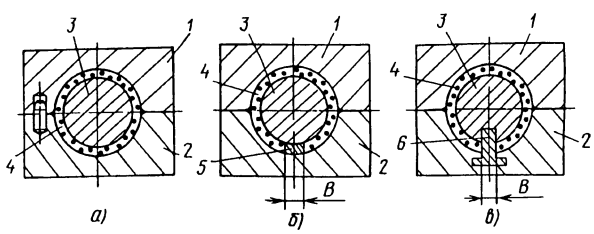


Рис. 3.6.20. Типовые схемы калибровочного штампа:
а – для калибровки без зазора, *б*, *в* – для калибровки с зазором под последующую сварку

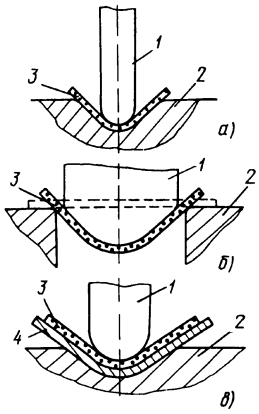


Рис. 3.6.21. Схемы использования штампов для свободной гибки, в которых форма детали задается матрицей (*а*), пуансоном (*б*), через подкладку (*в*):
1 – пуансон, *2* – матрица; *3* – заготовка, *4* – подкладка

Процесс гибки без калибровки используют, когда к деталям не предъявляется высоких требований по точности геометрических размеров. На рис. 3.6.21 приведены схемы свободной гибки уголковых профилей. Носителями формы детали является матрица (рис. 3.6.21, *а*) или пуансон (рис. 3.6.21, *б*), поэтому их взаимной подгонки не требуется.

Для гибки ВМКМ такой процесс используется в большинстве случаев, когда предусматривается применение подкладок. Его удобство заключается в том, что изменение толщины подкладок практически не влияет на точность изготовления деталей.

При гибке профилей уголковой формы с калибровкой весьма важен правильный выбор конструкции штампа. Так, если к прямолинейности полок не предъявляются повышенные требования, размеры рабочей полости матрицы (рис. 3.6.22) можно рассчитать следующим образом. Радиус пуансона r назначается в соответствии с внутренним радиусом детали, а радиус матрицы определяется из выражения:

$$R = (0{,}90\ldots1{,}05)\,(r + \delta).$$

В этом выражении коэффициент изменения радиуса матрицы берется бóльшим, чем для гомогенных материалов, для уменьшения возможности появления растяжения заготовки в угловой зоне.

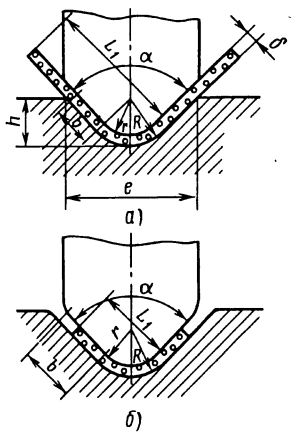


Рис. 3.6.22. Расчетные геометрические параметры пуансона и матрицы при гибке с калибровкой

Габаритные размеры полости матрицы получены из следующих геометрических соотношений:

ширина $l = 2b\sin\dfrac{\alpha}{2}$;

глубина $h = b\cos\dfrac{\alpha}{2} - R_1\left(\dfrac{1}{\sin\dfrac{\alpha}{2}} - 1\right)$.

При необходимости получения прямолинейных полок у изгибаемых деталей рабочую полость штампа необходимо выполнять так, как это показано на рис. 3.6.22, *б*. В этом случае величина b должна быть больше длины полки.

При использовании для гибки технологических подкладок размеры полости матрицы R, l и h корректируются с учетом ее толщины.

В зависимости от соотношения размеров полок профилей гибку следует производить в штампах (рис. 3.6.23). Для гибки профилей, имеющих одинаковую длину полок, применяют схемы (рис. 3.6.23, *а*, *б*). Штамп состоит из пуансона *1*, матрицы *2* и упора *4*, к которому прижимается заготовка профиля *3*. Для изготовления профилей длиной до 1000 мм используют гидравлические прессы, а для изготовления профилей большей длины – листогибочные гидравлические прессы, имеющие малую скорость хода ползуна – до 15 мм/с.

На рис. 3.6.23, *в* показана схема рабочих частей штампа с поворотными формующими

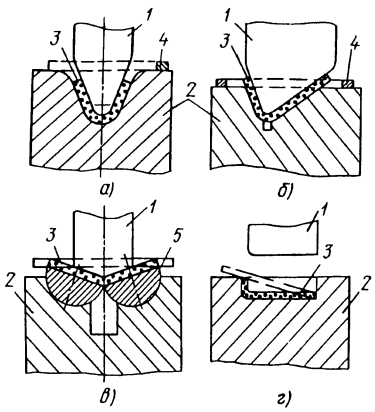


Рис. 3.6.23. Типовые схемы оснастки для получения профилей уголковой формы

элементами *5*. Преимущество гибки в таком штампе заключается в том, что в процессе деформирования подгибаемые полки заготовки всей своей поверхностью постоянно соприкасаются с рабочей поверхностью формирующих элементов. Это позволяет при гибке с подкладками более равномерно распределить радиальное давление от их взаимодействия по поверхности заготовки.

При гибке деталей с различной длиной полок (рис. 2.6.23, *в*, *г*) следует обеспечить фиксацию заготовки, предотвращающую ее смещение от несимметричного нагружения со стороны пуансона.

Изготовление Z-образных профилей рекомендуется выполнять методом одноугловой гибки в два перехода (рис. 3.6.24, *а*, *б*).

В этом случае процесс сводится сначала к гибке уголкового профиля (рис. 3.6.24, *а*). На втором переходе (рис. 3.6.24, *б*) используют те же приемы и оснастку. Изготовление профиля за один переход (рис. 3.6.24, *в*) сопровождается появлением дополнительных напряжений растяжения в зоне гибки в средней зоне профиля. Это приводит к разрушению при гибке профилей с радиусами кривизны, близкими к минимальным, вследствие низкой пластичности ВМКМ при растяжении. Рассматриваемую схему выполнения рабочих частей штампа можно использовать при радиусах гибки полок профиля, бóльших 1,5 R_{min}, при которых напряжения растяжения не оказывают влияния на процесс гибки. Для всех схем необходимо предусматривать обязательное базирование заготовки по упорам.

Изготовление профилей П-образной формы методом одноугловой гибки осуществляется за два перехода по обычной схеме. Более производительной является схема однопереходной гибки. Однако в этом случае необходимым является наличие дополнительных напряжений радиального сжатия, воздействующих на донную часть заготовки, что достигается установкой прижима в полости матрицы (рис. 3.6.25, *а*). При отсутствии прижима или при недостаточной степени сжатия происходит образование прогиба в зоне действия максимального изгибающего момента (рис. 3.6.25, *б*), что приводит к знакопеременному нагружению заготовки и возможному ее разрушению. Для уменьшения сил трения зазор между матрицей и пуансоном для заготовок из ВМКМ должен быть в пределах $1{,}05\delta_{max} \le Z \le 1{,}15\delta_{max}$, где δ_{max} – максимальное статистическое значение толщины заготовки.

Для уменьшения пружинения и получения точных деталей применяют схему гибки с выпуклой формой дна заготовки (рис. 3.6.26, *а*). В этом случае обязательно применение прижима с рабочей поверхностью, эквивалентной контуру пуансона. Геометрические параметры рабочей части пуансона подбирают экспериментально.

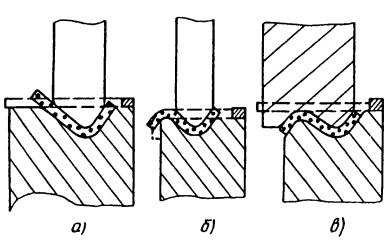


Рис. 3.6.24. Схемы изготовления профилей *Z*-образного сечения, с радиусами кривизны, равными примерно 1,5 R_{min}:
а – одноугловая гибка, *б*, *в* – двухугловая гибка соответственно за два и один переход

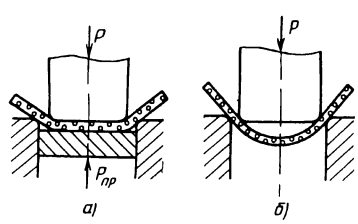


Рис. 3.6.25. Схема изготовления П-образного профиля в один переход:
а – с донным прижимом;
б – без подпора донной части заготовки

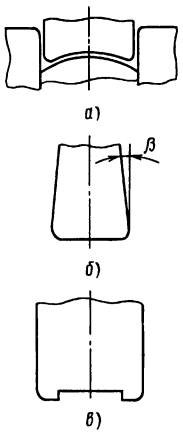


Рис. 3.6.26. Возможные варианты выполнения пуансона для обеспечения точности угловых размеров профиля

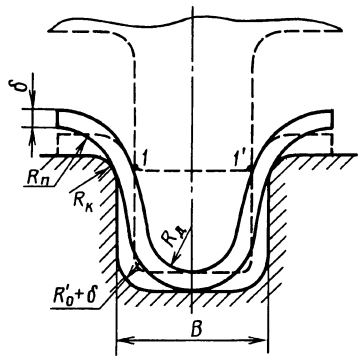


Рис. 3.6.27. Совмещенная работа калибровки профиля в два перехода:
$R_п$, $R_д$ – параметры гибочного штампа первого перехода, B, $R_к$, $R'_0+\delta$ – параметры калибровочного штампа

Эффективно также использование для гибки пуансонов с доработанными боковыми рабочими поверхностями с учетом угла пружинения (рис. 3.6.26, *б*).

Использование типовых пуансонов (рис. 3.6.26, *в*) с чеканящими кромками нецелесообразно ввиду возможного дробления армирующих волокон вследствие высокого давления в зонах чеканки.

Существенные особенности имеют процессы гибки профилей с радиусами, сопоставимыми с предельно допустимыми радиусами гибки для ВМКМ, например, для профилей из бороалюминия с объемной долей волокон 45...55 % и радиусом гибки полок менее 5...10 толщин заготовки. В этом случае эффективными схемами гибки являются те, которые совмещают факторы нагрева и воздействия дополнительного нагружения в тангенциальном направлении на деформируемую зону заготовки.

Процесс в этом случае ведут в два периода. На первом осуществляют предварительный набор материала по плавносопрягаемому контуру, на втором – окончательное формирование контура детали. Тангенциальное сжатие материала при калибровке обеспечивают с помощью несколько увеличенной длины развертки заготовки, получаемой на первом переходе.

На рис. 3.6.27 приведена совмещенная схема расположения профилей первого и второго перехода в калибровочном ручье штампа.

При перемещении пуансона вниз после касания заготовки в точках *1*, *1'* происходит калибровка стенок профиля по рабочей поверхности матрицы с одновременным перемещением части материала к ее донному участку за счет сил трения. При дальнейшем перемещении пуансона происходит формирование и калибровка детали в целом, а избыток материала обеспечивает создание напряжений тангенциального сжатия в зонах радиуса сопряжения донной части со стенками детали.

Оптимальную степень тангенциального сжатия устанавливают экспериментально в зависимости от системы ВМКМ и объемной доли волокон. Так, для заготовок из листа ВМКМ системы Al-B с долей волокон 45...50 % для условий горячей деформации интервал значений степени сжатия составляет 3,2...4,3 %.

Увеличение длины развертки рассчитывают для участка, подвергаемого тангенциальному сжатию. Этот участок включает в себя зону профиля, расположенную между точками *1* и *1'* (см. рис. 3.6.27).

Для построения профиля первого перехода рекомендуется назначать радиусы сопряжений в следующих пределах:

донного участка профиля

$$0{,}4B \le R_д \le 0{,}45B,$$

где B – ширина донного участка профиля;

сопряжения вертикальной стенки с горизонтальной полкой

$$1{,}6R_к \le R_п \le 2{,}0R_к,$$

где $R_к$ – радиус сопряжения стенки с полкой для детали.

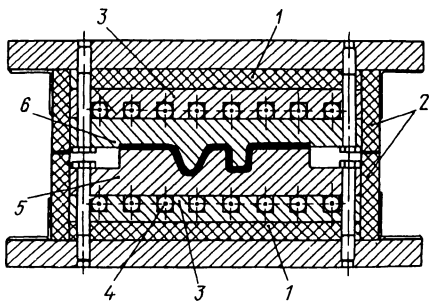


Рис. 3.6.28. Схема штампа для гибки профилей в два перехода с нагревом

Схема штампа для горячей гибки профилей из ВМКМ приведена на рис. 3.6.28. Конструктивно он состоит из двух внешних плит *1*, имеющих боковые пазы для крепления к столу и траверсе пресса. К плитам крепится кожух, состоящий из теплоизоляционных боковых *2* и внутренних *3* плит (например, асбоцементных). В пазах внутренних плит располагаются плиты нагрева *4* с трубчатыми электронагревателями. Для повышения степени теплопередачи и уменьшения коррозии поверхности электронагревателей при контакте с воздухом пазы внутренних плит заполняют смесью порошков графита и меди. На плиты нагрева устанавливается и крепится к блоку болтами рабочий штамповый инструмент – матрица *5* и пуансон *6*. Для контроля температуры в рабочей зоне штампа в матрице и пуансоне предусматривают отверстия, в которые устанавливают термопары.

Нагрев заготовки до температур горячей деформации можно проводить в щелевых печах, индукторах или непосредственно в штампе.

Перспективными для изготовления профилей в условиях холодной и горячей деформации являются специализированные устройства и оснастка для гибки со сжатием. Основным параметром, который должна обеспечить конструкция оснастки, является усилие тангенциального сжатия заготовки, величина которого должна быть строго регламентирована в течение всего процесса деформирования. Вариант реализации процесса гибки со сжатием представлен на рис. 3.6.29, где показан штамп с поворотными полуматрицами (*3*) и регулируемой по усилию связью толкателей (*5*), устанавливающих величину тангенциального сжатия заготовки.

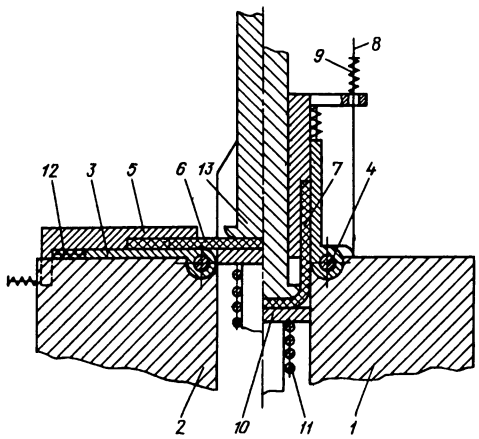


Рис. 3.6.29. Устройство для гибки профилей из ВМКМ со сжатием:
1 – неподвижная полуматрица, *2* – внутренняя полость матрицы; *3* – поворотная полуматрица; *4* – ось поворотной полуматрицы; *5* – толкатель, *6* – заготовка ВМКМ, *7* – готовый профиль из ВМКМ, *8* – ось устройства сжатия; *9* – пружина сжатия; *10* – выталкиватель; *11* – пружина выталкивателя, *12* – регулирующее устройство; *13* – пуансон

Выбор оборудования для осуществления конкретного технологического процесса проводят в соответствии со следующими требованиями:

1. Оборудование должно иметь соответствующие размеры рабочего пространства, достаточную величину перемещения рабочего органа и развивать необходимое для деформирования усилие;

2. Скорость перемещения рабочего органа не должна превышать 15 мм/с;

3. Должна быть обеспечена возможность механизации и автоматизации осуществляемых технологических процессов.

Гидравлические одностоечные прессы используют при изготовлении деталей с максимальным габаритным размером менее 800 мм. Для изготовления длинномерных деталей используют листогибочные кривошипные и гидравлические прессы. Кривошипные прессы используют при свободной гибке в холодном состоянии при минимальных скоростях перемещения ползуна.

При гибке с использованием эластичной среды, тангенциального сжатия, горячей деформации применяют листогибочные гидравлические прессы. При этом возможно изготовление профилей длиной до 8 м. Для осуществления многоугловой гибки используют гидравлические прессы с числовым программным управлением.

Трех- и четырехвалковые листогибочные машины применяют при изготовлении трубчатых заготовок, обечаек, обшивок одинарной кривизны. Это оборудование не обеспечивает высокой точности изготавливаемых деталей, которые в случаях необходимости получения точного геометрического контура требуют дополнительной ручной доводки.

Получение деталей более высокого качества обеспечивается на листогибочных машинах с эластичным покрытием одного из валков. Помимо высокой точности изготовляемых деталей использование эластичного покрытия исключает образование на формуемой поверхности дефектов в виде царапин, микротрещин, расслоений, что гарантирует качество деталей из ВМКМ.

3.6.2. ИМПУЛЬСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ВМКМ

Эффективное использование ВМКМ в конструкциях связано с разработкой технологических процессов образования механических точечных соединений: заклепочных, болтовых и комбинированных (клеезаклепочных, клееболтовых и т.д.) соединений [2].

Для выполнения механического точечного соединения необходимо получить в пакете отверстие, качество которого во многом определит прочность и долговечность конструкции в целом.

Наиболее распространенным способом получения отверстий под механические точечные соединения является сверление.

Однако сверление отверстий имеет существенные недостатки: низкая стойкость сверл и дороговизна их изготовления с алмазным покрытием; необходимость применения охлаждающей среды и специального оборудования; выделение стружкообразных компонентов в окружающую среду; необходимость выполнения процесса в 2 – 3 перехода и применения дополнительных операций зенкования и развертывания; выкрашивание кромок отверстия и разрушение армирующих волокон в зоне реза; появления наплыва по периметру.

Более высокое качество отверстий в бороалюминии получают при использовании электроэрозионной пробивки. Точность отверстий, полученных этим способом, определяется точностью изготовления электродов, а параметры шероховатости поверхности зависят от режимов обработки и изменяются от $Rz20$ до $Rz80$, но при этом не разрушаются армирующие волокна. Вместе с тем процесс электроэрозионной пробивки имеет недостатки: процесс выполняется в охлаждающей среде и сопровождается интенсивным газовыделением; размеры обрабатываемых деталей ограничены габаритными размерами ванны; исключена возможность применения процесса для получения отверстий в процессе сборки.

Динамическая пробивка отверстий (со скоростью деформирования более 15 м/с) в инструментальном штампе при наличии прижима и подпора сопровождается дроблением волокон в пределах зазора. При пробивке отверстий диаметром $(0{,}8\ldots10)\cdot10^{-3}$ м достигается точность в пределах 7...10 квалитетов, параметры шероховатости поверхности разделения для однонаправленной бороалюминиевой композиции $Rz20\ldots Ra2{,}5$.

Долговечность образцов с отверстиями составляет после сверления $0{,}4\cdot10^{6}$ циклов, после динамической пробивки – в 3 – 4 раза выше. Наличие в ВМКМ высокотвердых волокон вызывает при пробивке отверстий значительный износ пуансона и матрицы [2].

Устранение недостатков динамической пробивки отверстий достигается путем совместного использования вязкой среды под высоким давлением и инструмента в процессе разделения.

Гидродинамическая пробивка отверстий. Вязкая среда в процессе пробивки отверстий в заготовках из ВМКМ должна выполнять активную роль, воздействуя на заготовку с целью обеспечения сдвига отделяемого участка материала относительно режущих кромок матрицы, создания объемной схемы напряженного состояния с локализацией зоны деформирования и сведения к минимуму трения между заготовкой и инструментом.

При размещении между пуансоном и прижимом, который является также направляющей вязкой среды, при ударе бойка по пуансону в последнем возникают упругие деформации, имеющие волновой характер. В этом случае диаметр пуансона будет увеличиваться (рис. 3.6.30), а перемещение фронта продольной волны сжатия вдоль пуансона к заготовке вызывает перекрытие зазора между пуансоном и направляющей, т.е. запирание вязкой среды в замкнутом объеме (рис. 3.6.31, *а*) возможно при условии, когда зазор между пуансоном и направляющей (толщина вязкой среды) удовлетворяет условию

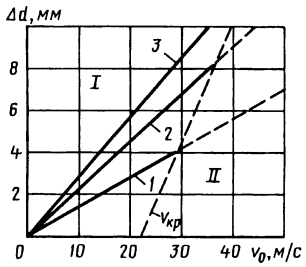


Рис. 3.6.30. Зависимость увеличения диаметра пуансона Δd от скорости соударения v_0 с ударником диаметром 8 мм (диаметр пуансона): *1* – 2 мм, *2* – 4 мм; *3* – 6 мм; I – зона упругих деформаций; II – зона пластических деформаций

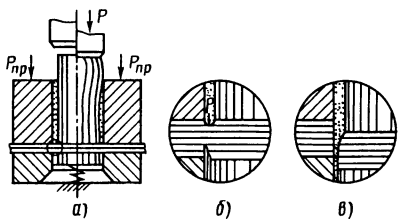


Рис. 3.6.31. Основные этапы разделения заготовки из волокнистого композиционного материала при гидродинамической пробивке отверстий с генерированием упругой волны сжатия в пуансоне

$$\Delta d = \frac{\mu d \rho a}{2E} v_0,$$

где μ – коэффициент Пуассона материала пуансона; d – диаметр пуансона; ρ – плотность материала, a – скорость звука в материале пуансона; E – модуль упругости материала пуансона; v_0 – начальная скорость соударения бойка с пуансоном.

Для упругой деформации пуансона необходимо, чтобы начальная скорость соударения бойка с ним была меньше критической:

$$v_0 < \frac{2\sigma_{0,2}}{\rho a},$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала пуансона.

Отверстие в направляющей необходимо выполнять соосным и равным диаметру отверстия в матрице. При высоких скоростях продольной волны сжатия (более 5000 м/с) и относительно небольших односторонних зазорах $(0{,}02\ldots0{,}03)\cdot 10^{-3}$ м обеспечивается значительное и резкое повышение давления вязкой среды в области между фронтом волны и заготовкой. Импульсное давление вязкой среды на заготовку вызывает осадку отхода и концентрацию напряжений в заготовке со стороны матрицы (рис. 3.6.31, *б*). Затем процесс разделения сопровождается совместным внедрением пуансона (и слоя вязкой среды по его поверхности) в заготовку (рис. 3.6.31, *в*), при этом эффективно снижается трение между заготовкой и инструментом. В результате воздействия на вязкую среду волны сжатия происходит накапливание потенциальной энергии в жидкости. Эта энергия реализуется в виде импульсного давления в зоне разделения, причем разделение осуществляется только относительно режущих кромок матрицы. За счет капельно-ударного воздействия жидкости путем разгона ее до больших скоростей в кольцевом канале между направляющей и пуансоном одновременно достигаются эффект разделения материала заготовки и уменьшение износа инструмента. Схема такого процесса представлена на рис. 3.6.32.

Внутренняя полость прижима *1* перегородкой *2* разделена на две части. В верхней части находится вязкая среда, в нижней – воздух. При импульсном перемещении поршня *3* вниз перегородка *2* раздвигается, и вязкая среда разгоняется в коническом канале между пуансоном *4* и внутренней полостью прижима *1*. Удар (с большей скоростью) вязкой среды по заготовке *5* определяет начало разделения обрабатываемого материала. К этому моменту поршень *3* достигает пуансона *4* и перемещает его относительно заготовки *5*, т.е. происходит процесс дальнейшего разделения и проталкивание отхода в матрицу *6*. За счет движения поршня *3* вязкая среда под большим

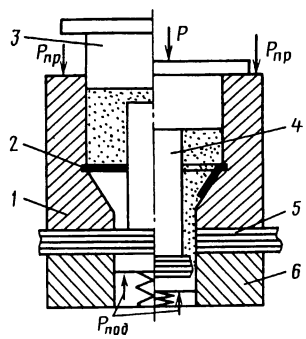


Рис. 3.6.32. Схема процесса гидродинамической пробивки отверстий с разгоном вязкой среды

давлением продолжает поступать в область между пуансоном *4* и поверхностью образуемого отверстия. Это уменьшает давление на пуансон *4* со стороны заготовки *5* и калибрует стенки отверстия по матрице *6*.

Сложность гидродинамических процессов, протекающих за малый промежуток времени (порядка $(100...500)\cdot 10^{-6}$ с) и имеющих ударно-волновой характер, представляет определенные трудности для теоретических расчетов в общем виде. В связи с этим процесс гидродинамической пробивки отверстий разделяется на этапы, позволяющие ввести обоснованные допущения, необходимые для определения параметров гидродинамического устройства.

Первый этап. Разгон ударника и его соударение с поршнем под действием импульсных магнитных полей высокой напряженности (ударник разгоняется до скорости v_0). Его кинетическая энергия должна быть больше величины общей работы процесса гидродинамической пробивки и величины потерь. После соударения система (ударник, поршень и вязкая среда) перемещается со скоростью v_1. Допускается, что происходит абсолютно неупругий удар, при котором тела "сливаются" воедино и движутся с общей для них скоростью. Тогда в соответствии с законом сохранения количества движения:

$$m_y v_0 = m_c v_1,$$

$$m_c = m_y + m_п + m_{вс},$$

где m_y, $m_п$ и $m_{вс}$ – масса ударника, поршня и вязкой среды.

Второй этап Заполнение конической полости вязкой средой. Под действием ударника и поршня, движущихся со скоростью v_1, происходит заполнение вязкой средой конической полости прижима, при этом скорость движения системы замедляется, а скорость движения вязкой среды в сужающейся части канала возрастает. На рис. 3.6.33 в сечении I–I параметры вязкой среды v_2 и p_2; в сечении II–II – v_2' и p_2', в сечении III–III – v_3 и p_3, причем $v_2 < v_2' < v_3$, а $p_2 > p_2' > p_3$.

Кинетическая энергия движения системы будет переходить в потенциальную энергию сжатия вязкой среды в сечении I–I.

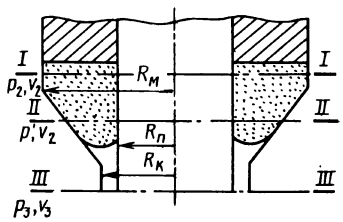


Рис. 3.6.33. Движение вязкой среды в конической части канала

На основании закона сохранения энергии

$$\frac{\rho m_y v_0^2}{m_c m_{вс}} = \frac{\rho m_c v_2^2}{m_{вс}} + p_2. \qquad (3.6.9)$$

Третий этап. Установившееся движение. После полного заполнения вязкой средой конического канала энергия сжатия будет переходить в кинетическую энергию разгона вязкой среды до скорости v_3. Движение вязкой среды на входе в кольцевой канал (сечение III–III) в какой-то малый промежуток времени считаем установившимся. Допускаем (в течение рассматриваемого малого промежутка времени), что вязкая среда представляет собой идеальную несжимаемую жидкость

Скорость движения вязкой среды в кольцевом канале определяется из выражения

$$v_3 = \sqrt{\frac{\dfrac{\rho m_y^2 v_0^2}{m_c m_{вс}} - p_3}{\rho\left[\dfrac{m_c}{m_{вс}}\dfrac{F_3^2}{F_2^2} + \dfrac{1}{2}\left(1 - \dfrac{F_3^2}{F_2^2}\right)\right]}},$$

где ρ – плотность вязкой среды; F_2, F_3 – площади каналов в сечении I–I и III–III, причем

$$F_2 = \pi(R_м^2 - R_п^2); \quad F_3 = \pi(R_к^2 - R_п^2).$$

В результате подстановок в последнее выражение необходимых параметров получаем графическую зависимость скорости движения вязкой среды в кольцевом канале от начальной скорости соударения v_0 (рис. 3.6.34), на основании которой определяем параметры проектируемого устройства для гидродинамической пробивки отверстий и рассчитываем необходимую мощность энергетического оборудования.

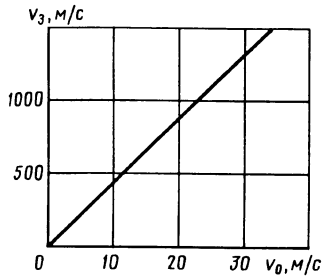


Рис. 3.6.34. Зависимость скорости движения вязкой среды v_3 от скорости ударника v_0 при следующих технологических параметрах: $m_y = 0{,}4$ кг, $m_n = 0{,}04$ г; $m_{вс} = 0{,}001$ кг, $R_м = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $R_n = 2{,}05 \cdot 10^{-3}$ м; $R_к = 2{,}08 \cdot 10^{-3}$ м

Четвертый этап. Движение вязкой среды в кольцевом канале. Для учета величины вязкости среды, применяемой при пробивке отверстий, используется известное в гидродинамике уравнение Навье–Стокса. Максимальная скорость истечения вязкой среды (рис. 3.6.35) определяется выражением

$$v_{max} = \frac{2(R_м^2 - R_п^2)v_2}{R_к^4 - R_п^4 + \dfrac{(R_к^2 - R_п^2)^2}{\ln R_п / R_к}} \times$$

$$\times \left[R_к^2 - \delta + \frac{R_к^2 - R_п^2}{\ln R_к / R_п} \ln \frac{\delta}{R_к} \right].$$

Для определения скорости v_2 в уравнение (3.6.9) вводим значение давления, необходимого для преодоления сил сопротивления в кольцевом канале:

$$\frac{\rho m_y v_0^2}{m_c m_{вс}} = \frac{\rho m_c v_2^2}{m_{вс}} + p_2 + p_c,$$

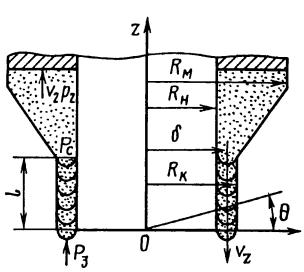


Рис. 3.6.35. Движение вязкой среды в кольцевой части канала

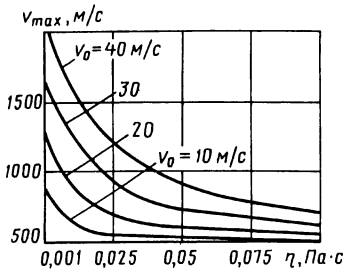


Рис. 3.6.36. Зависимость максимальной скорости истечения вязкой среды v_{max} от коэффициента динамической вязкости η

где p_2 – давление сопротивления кольцевого канала,

$$p_c = \Delta p + p_3 = \frac{8(R_м^2 - R_п^2)v_2 \eta l}{R_к^4 - R_п^4 + \dfrac{(R_к^2 - R_п^2)^2}{\ln R_п / R_к}} + p_3;$$

p_c – атмосферное давление.

Расчет v_2 выполняем по уравнению

$$\frac{\rho}{2}\left(2\frac{m_c}{m_{вс}} + \frac{F_2^2}{F_3^2} - 1\right)v_2^2 +$$

$$+ \frac{8(R_м^2 - R_п^2)\eta l}{R_к^4 - R_п^4 + \dfrac{(R_к^2 - R_п^2)^2}{\ln R_п / R_к}} + \left(2p_3 - \frac{\rho m_y^2 v_0^2}{m_c m_{вс}}\right) = 0.$$

На основании представленных уравнений строим график зависимости максимальной скорости встречи вязкой среды с заготовкой от коэффициента динамической вязкости при заданных параметрах устройства (рис. 3.6.36).

Пятый этап. Соударение вязкой среды с заготовкой. Для оценки максимального давления на "пятне контакта" жидкости с плоской преградой используется выражение из теории одномерного гидравлического удара:

$$p = \alpha \rho a v_{max},$$

где α – поправочный коэффициент; a – скорость звука в жидкости.

При ударе вязкой среды по заготовке из ВМКМ коэффициент α рекомендуется определять с помощью выражения

$$\alpha = \frac{1}{1 + [\rho a / (\rho_c \alpha_c)]},$$

где $\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$; $\alpha_c = \sqrt{E_{22}/\rho_c}$.

Подстрочные индексы "*f*", "*m*" и "*c*" относятся соответственно к волокну, матрице и композиту; V_f – объемная доля волокон; V_m – объемная доля матриц; E_{22} – эквивалентный модуль Юнга в направлении, перпендикулярном к волокнам.

Нормальная сила, которая действует на поверхность разделяемой заготовки из ВМКМ в момент гидравлического удара, определяется выражением

$$p_т = p\pi(R_к^2 - P_п^2).$$

Шестой этап. Процесс разделения заготовки. При встрече подвижной вязкой среды с заготовкой на поверхности последней возникает импульсное давление, вызывающее ударную волну сжатия, которая, распространяясь по толщине заготовки при встрече с режущими кромками матрицы, создает концентратор напряжений (рис. 3.6.37, *а*). Под действием нагрузки, рассредоточенной по площади кольца, происходит сдвиг отделяемого участка материала относительно режущих кромок матрицы с разрушением армирующих волокон (рис. 3.6.37, *б*). Момент сдвига отделяемого участка материала относительно матрицы соответствует моменту начала совместного движения поршня и пуансона (рис. 3.6.37, *в*). В процессе движения пуансона вязкая среда под действием поршня подается под высоким давлением в зону разделения, что гарантирует зазор и обеспечивает принудительный гидродинамический режим трения.

Гидродинамическая пробивка отверстий с разгоном вязкой среды позволяет:

использовать кинетическую энергию вязкой среды для непосредственной обработки поверхности разделения;

изменить напряженно-деформированное состояние материала заготовки, приблизив его к схеме всестороннего неравномерного сжатия;

локализовать зону деформирования;

обеспечить концентратор напряжений со стороны режущих кромок матрицы;

уменьшить контактные нагрузки на режущие кромки пуансона и матрицы;

свести к минимуму трение между заготовкой и инструментом, увеличив таким образом стойкость оснастки и повысив качество пробиваемых отверстий.

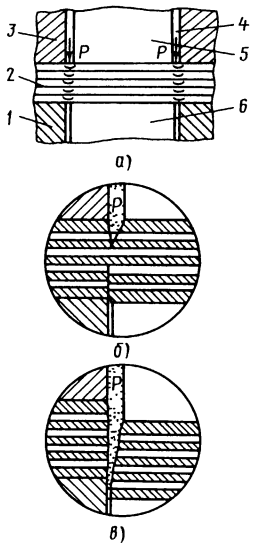


Рис. 3.6.37. Стадии процесса разделения заготовки:
1 – матрица, *2* – заготовка, *3* – прижим, *4* – вязкая среда, *5* – пуансон, *6* – подпор

Износ инструмента при пробивке отверстий в заготовках из ВМКМ. В начальный период эксплуатации инструмента взаимосвязь между площадью износа F и числом пробитых отверстий n выражается параметрическим уравнением степенного типа:

$$F = b_0 b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 n^к,$$

где к – показатель степени (при боковом износе к > 1, при торцевом – к < 1); b_0 – коэффициент пропорциональности, равный 10^{-10} м^2; b_1 – коэффициент, зависящий от режима пробивки; b_2 – коэффициент, зависящий от сечения инструмента; b_3 – коэффициент, зависящий от толщины композиционного материала; b_4 – коэффициент, учитывающий объемную долю волокон; b_5 – коэффициент, зависящий от материала инструмента и его термообработки.

Показатель степени к может быть принят постоянным (к = 1,42).

Коэффициент b_1: для статической пробивки – 1,3; для динамической пробивки – 2,2; для гидродинамической пробивки с генерированием упругой волны сжатия в пуансоне – 0,7; для гидродинамической пробивки с разгоном вязкой среды – 0,1...0,2.

Неравномерность износа инструмента учитывается коэффициентом b_2:

Сечение инструмента, °	0	22,5	45	67,5	90
Значение коэффициента b_2	1,0	0,9	0,75	0,55	0,3

Значение коэффициента b_3 устанавливается по эмпирической зависимости

$$b_3 = 10^{-2} S^{m+1},$$

где S – толщина заготовки, м; m – показатель степени (для статической пробивки – 1,2; для динамической пробивки – 1,3; для гидродинамической пробивки с генерированием волны сжатия в пуансоне – 1,9; для гидродинамической пробивки с разгоном вязкой среды – 1,5).

Коэффициент b_4 учитывает влияние объемной доли армирующих волокон на износ инструмента:

Объемная доля волокон, %	10	20	30	40	50
Значение коэффициента	0,4	0,8	1,7	1,6	2,0

Значения коэффициента b_5 определяется по формуле

$$b_5 = \varepsilon_и / \varepsilon_п,$$

где $\varepsilon_и$ – относительная износостойкость материала (например, сталь У10А), для которого известны параметры износа при пробивке отверстий в заготовках из бороалюминия; $\varepsilon_п$ – относительная износостойкость материала, для которого необходимо определить параметры износа при пробивке отверстий в заготовках из бороалюминия.

Стойкость инструмента при пробивке отверстий (от 7 до 11 квалитетов точности) в бороалюминии при различных режимах разделения описывается выражением

$$N = \exp\left[\frac{1}{к} \ln \frac{z - \Delta c S}{b_0 b_1 b_2 b_3 b_4 b_5}\right],$$

где z – заданная точность отверстий, м; Δc – поправка к значению точности, учитывающая случайные погрешности, м.

Значения Δc изменяются в зависимости от режима пробивки: для статической – $0{,}024 \cdot 10^{-3}$ м; для динамической – $0{,}014 \cdot 10^{-3}$ м; для гидродинамической с генерированием упругой волны сжатия в пуансоне – $0{,}09 \cdot 10^{-3}$ м; для гидродинамической пробивки с разгоном вязкой среды – $0{,}08 \cdot 10^{-3}$ м.

На основании опыта эксплуатации технологической оснастки для пробивки отверстий в заготовках из ВМКМ сложился ряд требований к ней:

значительно более высокая жесткость по сравнению с оснасткой для пробивки однородных материалов;

выполнение исполнительных размеров штамповой оснастки по 4...5 квалитету точности;

наличие в штамповой оснастке направляющей плиты, матрицы, пуансона и подпора;

высота пробивного пуансона не должна превышать критического значения устойчивости, необходимо соблюдение соответствия усилия подпора характеру изменения усилия в процессе разделения ВМКМ, прижим должен быть жестким, а его давление – не более 0,7... 0,9 предела прочности ВМКМ в направлении его толщины;

зазор между пуансоном и направляющей при гидродинамической пробивке отверстий с разгоном вязкой среды после каждого хода инструмента необходимо очищать от вязкой среды;

минимальность объема вязкой среды для уменьшения энергетических затрат при гидродинамической пробивке отверстий с ее разгоном;

начальный зазор между пуансоном и матрицей не должен превышать 1...2 % толщины заготовки; диаметры отверстий в направляющей плите и матрице выполняются соосными и равными;

канал для разгона вязкой среды необходимо выполнять с плавными переходами и последующей полировкой до параметра шероховатости поверхности $Ra = 0{,}1...0{,}05$ мкм.

Невыполнение любого из перечисленных требований сопровождается резким снижением качества пробиваемых отверстий. Например, если не очистить от остатков вязкой среды пространство между пуансоном и направляющей в кольцевой части канала, эффект гидродинамического удара резко снижается или совсем исчезает, так как остатки вязкой среды препятствуют движению вновь подаваемой вязкой среды. Износ инструмента уменьшается на 30...40 %, если после каждого хода пуансона его поворачивать на 5...7°, а матрицу – в противоположном направлении на 4...6°; при этом возрастает геометрическая точность пробиваемых отверстий.

Целесообразно проводить выбор материала для рабочих частей разделительных штампов при пробивке отверстий с учетом .масштабов производства. При единичном и мелкосерийном производстве целесообразно применять менее износостойкие, но более дешевые материалы, например сталь У8А. При крупносерийном и массовом производстве целесообразно применять для пуансона и матрицы материал с более высокой износостойкостью.

Для пробивки отверстий в заготовках из ВМКМ при индивидуальном производстве можно применять сталь марки 40 (после закалки в воде и отпуска).

Применение твердых сплавов не дает желательного эффекта при динамической пробивке отверстий в элементах конструкций из ВМКМ из-за выкрашивания режущих кромок от ударного воздействия. Поэтому твердые сплавы рекомендуется применять при гидродинамической пробивке с разгоном вязкой среды, при этом достигается уменьшение контактных ударных нагрузок на режущих кромках инструмента.

Вязкая среда при гидродинамической пробивке отверстий выполняет две функции: участвует в процессе разделения заготовки и окончательной обработке поверхности отверстия; обеспечивает смазку поверхностей, уменьшает коэффициент трения и значительно снижает износ инструмента. Следовательно, вязкая среда должна обладать высокой разделительной способностью, достаточной текучестью для быстрого проникновения в зону разделения, способностью снижать коэффициент трения и охлаждать режущие кромки инструмента.

Участие вязкой среды в процессе разделения накладывает дополнительные требования: стабильность и изотропность физико-механических характеристик и, в первую очередь, вязкости при изменениях температуры и гидростатического давления; способность к "самозалечиванию" дефектов в виде микротрещин на разделяемом материале; стойкость к изменению внешних условий;

достаточная плотность для ударного воздействия на обрабатываемый материал.

Кроме того, вязкая среда не должна быть токсичной, вызывать коррозию, должна легко удаляться и наноситься, быть дешевой и недефицитной.

При гидродинамической пробивке отверстий вязкая среда работает в следующих режимах:

Контактное давление, МПа ..... 500...1500
Скорость скольжения, м/с ..... 5...40
Скорость движения вязкой среды, м/с ..... 500...2000
Гидростатическое давление, МПа ..... 10...500

В процессе эксплуатации различных вязких сред (смазывающие масла, глицерин, парафин, пластилин, клеи, вода) установлено, что наиболее удобной и эффективной вязкой средой для гидродинамической пробивки с генерированием упругой волны сжатия в пуансоне является смазка ЦИАТИМ-203. Для гидродинамической пробивки с разгоном вязкой среды необходимо применять вязкие среды с минимальной вязкостью. При этом упрощается подача вязкой среды в зону разделения и удаление ее из кольцевого канала, подача вязкой среды в штамп легко автоматизируется.

Для этой разновидности процесса пробивки наиболее целесообразно применение в качестве вязкой среды воды с добавлением антикоррозионных присадок. Если применение воды по каким-либо причинам категорически недопустимо, возможно применение машинных масел тонкой очистки, имеющих динамическую вязкость порядка 0,01...0,02 Па с плотностью 0,8...1,0 кг/м^3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арефьев Б.А.** Физика и химия обработки материалов, № 3, 1983. С. 122 – 130.

2. **Козий С.И., Желтов И.Н., Глущенков В.А.** Динамическая пробивка отверстий в заготовках из композиционных материалов. Куйбышев: ЦНТИ, 1979. Информационный листок № 141– 79. 4 с.

3. **Композиционные материалы:** Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др. Под общ. ред. В.В. Васильева, М.В. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

4. **Композиционные материалы:** Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.

5. **Кудинов В.В.** и др. Механические свойства матрицы АД1, полученной плазменным напылением // Композиционные материалы. М.: Наука, 1981. С. 133 – 136.

6. **Мануйлов В.Ф., Смирнов В.И., Галкин В.И.** Расчет процессов деформации композиционных материалов. М.: Металлургия, 1992. 208 с.

7. **Шоршоров М.Х.** и др. Физика и химия обработки материалов, № 4, 1985. С. 98.

8. **Шоршоров М.Х.** Порошковая металлургия, № 8, 1981. С. 63 – 66.

Раздел 4

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

ВВЕДЕНИЕ

Слоистые металлические композиты известны человеку уже много столетий: медные и бронзовые украшения, покрытые слоем серебра и золота; дамасская сталь, получаемая совместной ковкой пакета из нескольких слоев или проволок железа и стали; двух- и трехслойные клинки и различные инструменты. В конце XIX и начале XX в. началось промышленное производство биметаллов. Один из первых промышленных биметаллов – сталемедная проволока диаметром 1...5 мм, которую использовали вместо медной в слаботочных цепях (телефонных, телеграфных, сигнальных и т.п.). Вскоре началось и промышленное производство биметаллических листов с помощью совместной прокатки разнородных металлов. Биметалл сталь + алюминий (так называемый ферран) и биметалл сталь + никель применяли для изготовления посуды.

В нашей стране промышленное производство биметаллов впервые было освоено на металлургических заводах им. С. Орджоникидзе (г. Кольчугино Владимирской обл.), Нытвенском (г. Нытва Пермской обл.), "Красный Выборжец" (г. Ленинград) и "Серп и Молот" (г. Москва). В 1928 г. было налажено производство сталемедной проволоки покрытием стального стержня жидкой медью с последующей прокаткой и волочением. Позднее (в 1930 г.) начали изготовлять биметаллическую проволоку методом совместной прокатки и волочения. Одновременно развивалось производство биметаллических листов и лент. В 1928 г. начали выпускать листы дуралюмина, плакированные чистым алюминием, в 1931 г. – листы из биметалла сталь + алюминий для изготовления посуды. С 1932 г. в больших для того времени количествах производили биметаллические полосы томпак + сталь + томпак методом горячей совместной прокатки. По заказу электротехнической промышленности был освоен выпуск ленты и проволоки из биметалла сталь + никель, которые стали применять для изготовления анодов радиоламп вместо чистого никеля.

Биметаллические трубы изготовляли с помощью формовки стальной полосы с нанесенным на нее гальваническим способом слоем меди в трубную заготовку и ее последующей раскатки на оправке. Применяли также метод совместной протяжки через волоку биметаллической заготовки, собранной из двух коаксиальных труб.

С помощью горячей совместной прокатки получали термобиметаллы сталь + инвар, томпак + инвар, латунь +инвар и др. Осваивали и методы изготовления биметаллического литья (втулок, подшипников и других деталей) для нужд авиации и автостроения. Был разработан также метод непрерывной заливки баббита и свинцовистой бронзы на стальную ленту. Увеличивался объем производства и расширялся ассортимент биметаллов, росло их народнохозяйственное значение.

В настоящее время многослойные металлы, в том числе биметаллы, важнейшая группа промышленных материалов с широким спектром свойств. Из них делают ленты, листы, прутки, проволоку, трубы, фасонные профили, т.е. почти все виды продукции, изготовляемой из монометаллов и их сплавов.

Применение слоистых композитов позволяет существенно повысить эффективность производства деталей и оборудования для предприятий химического, нефтяного, сельскохозяйственного, транспортного, энергетического и других отраслей машиностроения. К потребителям слоистых композиционных материалов относятся также приборостроение и радиоэлектроника, инструментальная промышленность, предприятия, производящие товары культурно-бытового и хозяйственного назначения.

Разработка эффективных технологий производства слоистых композиционных материалов, расширение их сортамента способны

дать мощный импульс техническому прогрессу. Несмотря на довольно продолжительный опыт создания композитов, они до сих пор не заняли подобающего места в ряду современных конструкционных и функциональных материалов, что можно объяснить отставанием технологической надстройки от экспериментальной и теоретической базы в области твердофазного соединения разных металлов, ограниченным применением многих эффективных процессов, например, холодного плакирования и сварки взрывом.

В настоящее время к главным задачам в области производства и применения слоистых композитов следует отнести расширение сортамента и повышение их качества (увеличение прочности соединения слоев, снижение разнотолщинности, улучшение качества поверхности, стабилизацию механических свойств и структуры и т.д.), а также дальнейшее расширение областей их применения в различных отраслях хозяйства. Последнее должно базироваться на анализе потребности (существующей и перспективной) в различных видах композитов, а также на производственных возможностях действующего технологического оборудования.

Существующая научная и технологическая база, производственные мощности металлургических предприятий вполне могут обеспечить потребности нашей страны в высокоэффективной и экономичной металлопродукции – слоистых композиционных материалах.

Глава 4.1

СПОСОБЫ И ОСНОВЫ ТЕОРИИ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

4.1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Композиционный материалы (КМ) – это материал, состоящий из двух или нескольких компонентов, которые отличаются по своей природе или химическому составу, где компоненты объединены в единую монолитную структуру с границей раздела между структурными составляющими (компонентами), оптимальное сочетание которых позволяет получить комплекс физико-химических и механических свойств, отличающихся от комплекса свойств компонентов [8, 14, 17].

Слоистые композиционные материалы (СКМ) характеризуются тем, что они состоят из компонентов, два размера которых (длина и ширина) значительно превышают третий (толщину), при этом компоненты расположены послойно. На субмикроструктурированном уровне слоистые композиты могут быть получены при осаждении из газовой фазы, на микроструктурированном уровне – в слоистых эвтектических структурах, полученных направленной кристаллизацией. На макроскопическом уровне слоистые композиты реализуют в парах металл + металл, металл + полимер, полимер + полимер и др. Они представляют собой слои разнородных материалов толщиной от 0,1 мм до десятков миллиметров с различной природой границы раздела, при этом связь между слоями должна быть достаточно прочной для исключения взаимного перемещения слоев при воздействии механических нагрузок и температуры.

Выделяют следующие процессы получения композиционных материалов: химические, связанные с химическим, электрохимическим и термохимическим осаждением; газо- и парофазные, связанные с конденсацией из газовой и паровой фазы; жидкостные, связанные с направленной кристаллизацией и (или) пропиткой подготовленных каркасов наполнителем; твердофазные; комбинированные, основанные на сочетании различных процессов.

Классификация композиционных материалов по применению носит условный характер, поскольку КМ обычно являются многоцелевыми. В первом приближении все композиционные материалы можно разделить на конструкционные и функциональные. Конструкционные КМ – материалы для изготовления деталей и конструкций машин и установок, работающих, главным образом, в условиях механических нагрузок. Функциональные материалы – материалы с особыми физическими и специальными свойствами (жаростойкость и жаропрочность, коррозионно- и износостойкость и др.). Однако конструкционные КМ являются одновременно и функциональными, т.е. помимо требуемого комплекса механических свойств должны обладать и комплексом определенных специальных свойств.

Наиболее широкое применение в промышленности получили металлические слоистые композиционные материалы, состоящие из двух или более слоев разнородных металлов, соединенных в монолитную композицию

и сохраняющих надежную связь между составляющими при дальнейшей технологической обработке и в процессе эксплуатации. Основную часть этих материалов представляют биметаллы, состоящие из двух или более слоев двух металлов [21].

Сортамент выпускаемых промышленностью СКМ можно разбить на следующие основные группы:

листовой – листы толстые (толщиной более 4 мм) и тонкие (толщиной ≤ 4 мм), ленты, полосы;

сортовой – в виде простых и фасонных профилей общего и специального назначения;

трубы – круглого поперечного сечения и профильные;

специальный – профили электротехнические, инструментальные, периодические, для теплообменной аппаратуры и др.

По назначению слоистые композиты подразделяют на коррозионно-стойкие, износостойкие, антифрикционные, электротехнические (проводниковые и контактные), инструментальные, термобиметаллы, для глубокой вытяжки, для теплообменной аппаратуры, для строительных конструкций, для бытовых изделий.

К настоящему времени разработано много различных способов производства слоистых композитов, каждый из которых обладает определенными преимуществами и имеет свои недостатки, поэтому они не исключают, а взаимно дополняют друг друга. Знание особенностей и возможностей каждого из них позволяет определить наиболее эффективный способ для производства конкретного вида слоистой металлопродукции, обеспечивающий требуемое качество и высокие экономические показатели ее изготовления.

Известные в настоящее время способы производства слоистых композиционных материалов можно классифицировать по ряду общих признаков. Так, приняв за основу классификации условия протекания процессов на границе соединения составляющих, различают три сочетания агрегатных состояний металлов в зоне контакта: жидкое с жидким, твердое с жидким и твердое с твердым. Некоторые специалисты выделяют две большие группы способов соединения металлов: сварку плавлением и сварку давлением. По наличию или отсутствию пластического деформирования в зоне соединения способы производства СКМ делят на две группы: с применением пластического деформирования хотя бы одной из составляющих (осадка, прокатка, штамповка, прессование, волочение др.) и без пластического деформирования (литье, наплавка, сварка плавлением, напыление, химические и электролитические методы нанесения покрытий, осаждение из газовой фазы и др.).

А.С. Гельман [2] в основу классификации технологических процессов сварки давлением принял пять параметров, управляющих процессами соединения металлов: давление (p-процессы) – холодная сварка; давление и температура (p, T-процессы) – прессовая сварка, стыковая сварка сопротивлением, сварка взрывом; давление, температура, среда (p, T, A-процессы) – сварка оплавлением, сопротивлением и с нагревом токами высокой частоты, в том числе в контролируемых средах; давление, температура, время, среда (p, T, τ, A-процессы) – диффузионная сварка в вакууме; давление, температура, взаимное перемещение (p, T, f-процессы) – сварка трением, ультразвуковая сварка.

Способы и технологии производства слоистых композитов во многом определяются сочетанием соединяемых металлов. По характеру их взаимодействия в зоне контакта слоев можно выделить следующие три большие группы [5, 20]: соединение металлов с ограниченной или полной взаимной нерастворимостью; соединение металлов с хорошей взаимной растворимостью и образующих твердые растворы; соединение металлов, образующих химические и интерметаллидные соединения.

4.1.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАХ

В настоящее время все способы сварки в твердом состоянии разделяют по следующим признакам [7, 17]: по степени завершенности процесса образования сварного соединения; по интенсивности деформации при сварке; по схеме деформирования при сварке.

Процесс образования соединения металлов при любых способах сварки протекает в три основные стадии (рис. 4.1.1):

1. Образование физического контакта, т.е. сближение атомов соединяемых металлов за счет пластической деформации на расстояние, при котором возможно физическое ван-дер-ваальсовское взаимодействие или слабое химическое взаимодействие (t_1 на рис. 4.1.1).

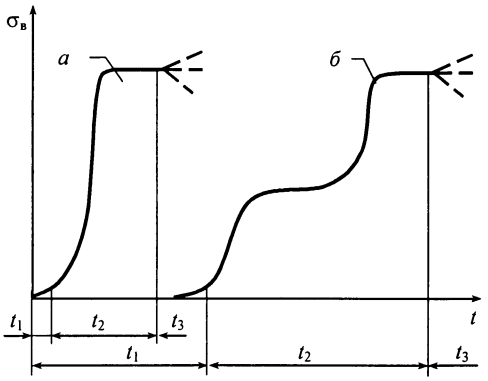


Рис. 4.1.1. Зависимость прочности сварного шва от длительности сварки при быстром (*а*) и медленном (*б*) процессах соединения металлов

2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров) (t_2 на рис. 4.1.1). При сварке разнородных металлов на этой стадии происходит образование активных центров на поверхности более твердого из соединяемых металлов. При сварке однородных металлов первая и вторая стадии практически сливаются в одну.

3. Объемное взаимодействие наступает с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях (t_3 на рис. 4.1.1), при этом происходит развитие взаимодействия соединяемых металлов как в плоскости контакта с образованием прочных связей, так и в объеме зоны контакта. В плоскости контакта оно заканчивается слиянием дискретных очагов взаимодействия, а в объеме – релаксацией напряжений.

При тех способах сварки давлением, при которых температура и длительность сварки такие, что диффузионные процессы не получают развития, образование соединения заканчивается только схватыванием контактных поверхностей, т.е.

$$(Me' - O) + (Me'' - O) = (Me' - Me'') + O,$$

где Me′ и Me″ – атомы металлов двух контактных поверхностей; O – атомы кислорода.

Процесс схватывания двух металлических поверхностей, атомы которых химически адсорбированы атомами кислорода, представляется следующим образом. При сближении поверхностей на некоторое расстояние устанавливается равновесие ван-дер-ваальсовских сил отталкивания и притяжения, т.е. между

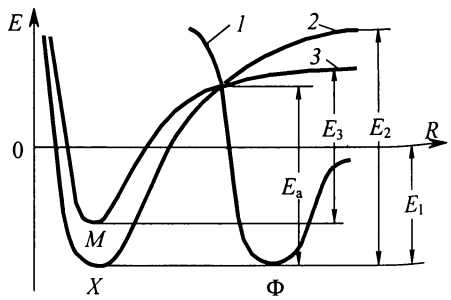


Рис. 4.1.2. Зависимость потенциальной энергии межатомного взаимодействия *E* от межядерного расстояния:
1 – физическая адсорбция атомов кислорода с атомами металла (E_1 – энергия ван-дер-ваальсовской связи Me–O), *2* – химическая адсорбция атомов кислорода с атомами металла (E_2 – энергия химической связи Me–O), *3* – химическое взаимодействие атомов металла одной поверхности с атомами металла другой поверхности (E_a – энергия активации химической адсорбции атомов кислорода с атомами металла)

поверхностными атомами металла образуется физический контакт (рис. 4.1.2). При этом каждый поверхностный атом металла продолжает оставаться связанным с атомом кислорода. Энергия системы металл–кислород, характеризуемая минимальным значением в точке *X*, при некоторой энергетической стимуляции изменяется по правой ветви кривой *2*. Эта энергия расходуется на перераспределение электронной плотности в комплексе Me–O, что физически выражается в ослаблении связей между атомами металла и кислорода. При достижении барьера E_a происходит разрыв связи между атомами металла и кислорода, при этом становится возможным валентное межатомное взаимодействие. Потенциальная энергия вновь образованного комплекса Me–Me изменится по кривой *3*, которая достигает минимального значения в точке *M*. Процесс образования химических связей между поверхностными атомами кристаллов (схватывание) можно считать завершенным.

Образование физического контакта на начальных этапах формирования соединения происходит при преимущественном действии пороговых механизмов микропластической деформации. Залечивание дефектов в зоне сварки в виде пустот на этой стадии идет по механизму их вакансионного растворения. Относительная площадь контакта *F* в зависи-

мости от соотношения характерных размеров дефектов a/b со временем t меняется по закону:

$$F = 1 - 2(a_0/f)\exp(at) \text{ при } a/b >> 1,$$

где f – расстояние между соседними дефектами; a – коэффициент; a_0 – начальный размер дефекта.

Активация контактных поверхностей выражается в разрыве химических связей Ме–О и может происходить по четырем каналам: термическому, дислокационному, механическому и химическому. Анализ модели активного центра, образованного при выходе дислокаций в зону контакта (рис. 4.1.3), показывает, что все атомы на поверхности в поле упругих искажений вокруг дислокаций, энергия которых достигла потенциального энергетического барьера у поверхности U, разрывают старые и образуют новые межатомные связи.

Данная энергетическая модель активации контактных поверхностей показывает, что относительная прочность $\overline{\sigma}$ соединения, выражающая степень схватывания, связана с числом образовавшихся активных центров C и их площадью S:

$$\overline{\sigma} = BCS.$$

Длительность полного схватывания t_c определяется длительностью активации t_a контактных поверхностей, так как атомы, достигшие требуемого энергетического уровня, мгновенно образуют межатомные связи, т.е. $t_c = t_a$.

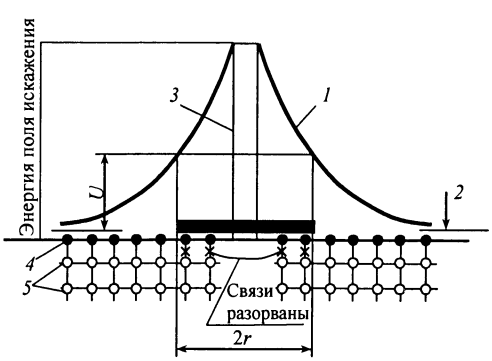


Рис. 4.1.3. Модель активиого центра, образованного при выходе дислокации в зону физического контакта:
1 – поле искажения вокруг дислокации; *2* – средний энергетический уровень атомов; *3* – ядро дислокации; *4* – атомы кислорода, *5* – атомы металла

$$t_a = Lb/BS\dot{\varepsilon},$$

где B – коэффициент, зависящий от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$; L – путь движения дислокаций до барьера.

Объемное взаимодействие при сварке разнородных металлов, способных образовывать между собой новые хрупкие фазы, должно быть ограничено схватыванием контактных поверхностей. Условия получения качественного соединения при этом следующие:

$$t_в \geq t_c \geq t_р;$$

$$t_и \geq t_н + t_{охл},$$

где $t_в$ – длительность действия сжимающих напряжений на соединяемые металлы; $t_н$ – длительность контактирования поверхностей при постоянной температуре свыше (0,4...0,5) $T_{пл}$; $t_р$ – длительность релаксации напряжений в свариваемых металлах; $t_и$ – длительность инкубационного периода зарождения новой хрупкой фазы; $t_и + t_{охл}$ – время пребывания металла в зоне "опасных" температур.

В настоящее время основным промышленным способом получения СКМ является прокатка (в горячем или холодном состоянии). При этом соединение металлов в условиях совместной пластической деформации при высоких температурах рассматривают как комплексный процесс, который может быть разделен на три стадии.

Первая стадия характерна развитием механической связи между слоями, обжатием неровностей поверхностных слоев, частичным разрушением оксидных пленок, а также контактированием локальных участков ювенильных поверхностей, сопровождающимся появлением узлов схватывания.

На второй стадии происходит превращение узлов схватывания в мостики сцепления, что приводит к уменьшению свободной энергии контактирующих поверхностей и появлению вблизи границы раздела зон с повышенной концентрацией вакансий, дислокаций и других дефектов строения металла.

На третьей стадии мостики сцепления превращаются в межслойную границу. Это происходит в результате диффузионных процессов, вызванных воздействием температуры и усиленных появлением дефектов строения металлов вблизи границы раздела слоев.

С.А. Голованенко [3] выделяет в процессе образования соединения при горячей про-

катке еще два этапа (стадии): четвертый – охлаждение и пятый – термическая обработка. Результаты этих процессов определяются составом соединяемых металлов и скоростью охлаждения, при этом прочность соединения слоев может как возрастать, так и снижаться.

При холодной совместной прокатке предложен [23] следующий механизм формирования соединения. Приконтактные слои соединяемых металлов, предварительно обработанные металлическими щетками и не имеющие запаса пластичности, во время совместной деформации симметрично разрушаются. Образующиеся при этом трещины заполняются металлами с ювенильными поверхностями, которые, вступив в контакт, схватываются. Схватывание происходит дискретно в областях интенсивного пластического течения, где плотность вышедших на поверхность дислокаций максимальна. Дальнейшее повышение степени деформации приводит к увеличению числа и величины мостиков сцепления, которые объединяются и охватывают всю площадь контакта металлов.

Обобщение современных представлений о явлении образования сварного соединения между разными металлами позволяет сделать следующее заключение. Основным процессом, определяющим образование соединения, является интенсивная совместная пластическая деформация, которая создает физический контакт поверхностей соединяемых металлов на атомном уровне, активирует их, создавая условия для прохождения процессов массопереноса. Пластическая деформация характеризуется давлением, продолжительностью его действия, температурой, степенью деформации, ее скоростью и дробностью. Влияние всех этих параметров на прочность соединения металлов очень сложно и разносторонне, поэтому при определении технологических параметров производства того или иного композита основываются на данных экспериментальных исследований.

При производстве металлических композитов литьем, пайкой и наплавкой соединение компонентов происходит в результате взаимодействия твердого металла с жидким или двух жидких металлов.

Способность металлов к соединению в этих случаях определяется их взаимной растворимостью, а также возможностью образования хрупких химических соединений – интерметаллидов. Металлы, не обладающие взаимной растворимостью в жидком состоянии, при расплавлении образуют несмешивающиеся слои, которые после затвердевания легко разделить. Наиболее прочное соединение образуют металлы, способные к неограниченной взаимной растворимости не только в жидком, но и в твердом состояниях. Промежуточное положение занимают композиции металлов, имеющих ограниченную растворимость в твердом состоянии; металлов, нерастворимых в твердом, но растворимых в жидком состоянии, а также металлов, образующих интерметаллидные фазы.

Взаимная растворимость металлов определяется сходством их кристаллических решеток, соотношением атомных радиусов и другими факторами. Следует учитывать, что растворимость металлов, образование интерметаллидов в значительной мере зависят от температуры, поэтому правильный выбор режимов получения композиционных материалов во многих случаях позволяет уменьшить отрицательное влияние ограниченной растворимости, свести к минимуму или полностью исключить образование хрупких соединений.

В большинстве технологических процессов рассматриваемой группы соединение металлов достигается при взаимодействии расплавленного металла с твердым. Образование прочного соединения при этом во многом определяется явлениями, происходящими на границе раздела: поверхностное и межфазное натяжение; смачивание твердой поверхности металла жидким; растекание жидкого металла по поверхности твердого, сопровождаемое диффузией; растворение твердого металла жидким.

Один из основных параметров, характеризующих взаимодействие разнородных металлов в жидкой фазе, – смачивание, способствующее образованию физического контакта между поверхностями соединяемых металлов. Оно определяется соотношением температур плавления твердого и жидкого металлов. Физико-химические процессы в зоне соединения протекают активней, когда температура поверхности твердого металла выше температуры плавления жидкого. Если это условие не выполняется, то жидкий металл на поверхности твердого будет кристаллизоваться, что затруднит процессы смачивания и растекания.

Нередко приходится соединять металлы, имеющие существенную разницу в температурах плавления, например сталь и алюминий.

В этом случае необходимо в первую очередь свести к минимуму возможность образования интерметаллических соединений, для чего в расплав обычно вводят элементы, замедляющие образование хрупких фаз, а также покрывают твердый металл слоем другого, не образующего с жидким металлом интерметаллиды.

Если процесс образования соединения двух жидких металлов во многом определяется их перемешиванием в граничной зоне, то взаимодействие жидкого металла с твердым, кроме того, характеризуется растворением твердой составляющей в жидкой. Для получения прочного соединения процессы сварки необходимо проектировать при минимальном развитии процесса растворения твердого металла.

Скорость диффузионных процессов на границе твердый – жидкий металлы характеризуется интенсивностью процесса диффузии в твердом металле, поскольку она во много раз меньше скорости диффузии в жидком металле и определяется, в основном, природой и временем нахождения металлов при повышенных температурах.

Структура зоны соединения составляющих после охлаждения должна соответствовать условиям равновесия твердого и жидкого металлов на диаграмме состояний. Она зависит от скорости процессов растворения и химических реакций. Если скорость химических реакций значительно опережает скорость растворения, может возникнуть промежуточная тугоплавкая фаза, которая затруднит доступ жидкого металла к твердому и задержит образование фазы, возникающей при растворении.

4.1.3. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

Сварка взрывом представляет собой разновидность процесса соединения металлов в твердой фазе [4, 5, 9, 20]. При этом образование соединения происходит в результате деформационного воздействия на соединяемые материалы, характеризующегося высокой скоростью их соударения при малой длительности процесса и вызывающего трехстадийную топохимическую реакцию, в результате протекания которой конечные свойства получаемых соединений определяются степенью, характером и временем деформации.

На рис. 4.1.4 показана принципиальная схема сварки металлов взрывом. Свариваемые пластины располагают обычно параллельно (реже под небольшим углом) друг другу с некоторым зазором. На поверхности верхней метаемой пластины *3* располагают заряд *2* взрывчатого вещества (ВВ). Неподвижная пластина *5* укладывается через подложку *6* на основание *7*.

После инициирования процесса детонации ВВ детонатором *1* фронт взрывчатого превращения распространяется по заряду *2* со скоростью D, а продукты детонации, расширяясь с большой скоростью, заставляют метаемую пластину *3* перемещаться и соударяться под углом γ с неподвижной пластиной *5* со скоростью v_c. Линия соударения движется вдоль пакета со скоростью точки контакта $v_к$, равной скорости детонации взрывчатого вещества D. Наиболее часто используемые на практике диапазоны скоростей соударения и точки контакта равны соответственно v_c = 250...800 м/с и $v_к$ = 1700...3000 м/с.

Высокоскоростное косое соударение металлических тел сопровождается целым рядом специфических и уникальных физических явлений: волнообразование, кумуляция, ударные волны и др. Так, в зоне соударения свариваемых тел обычно фиксируются остаточные деформации металла в виде характерной волнообразной линии.

При сварке взрывом остаточные сдвиговые пластические деформации металла g_{max} локализуются в узкой околошовной зоне (0,5...3,0 мм) и при оптимальных условиях соударения их максимальные значения на линии раздела находятся в пределах 70...150 %.

Такой характер пластического течения у границы соединения, естественно, предопределяет значительное упрочнение металла в этой зоне, степень которого зависит от фазового и химического состава свариваемых металлов, а также от типа их кристаллической решетки. Наибольшее упрочнение испытывают металлы, имеющие в своем составе твердые растворы в стабильном состоянии с полиэдрической структурой. Сплавы, обладающие мелкоблочной структурой с высокой плотностью дислокаций, упрочняются слабо.

Огромные скорости процесса и крайне малые времена схватывания ($\approx 10^{-6}$ с) не позволяют развиваться диффузионным процессам у линии соединения. Поэтому стадия

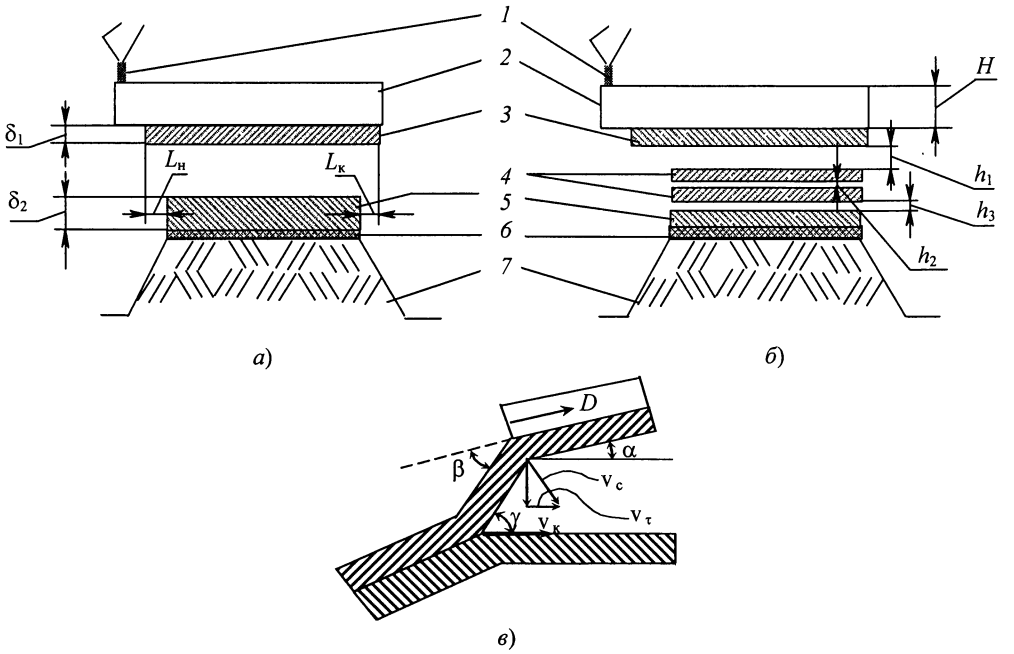


Рис. 4.1.4. Основные схемы сварки взрывом двух- (*а*) и многослойных (*б*) СКМ и кинематическая схема соударения пластин при сварке взрывом (*в*):
1 – детонатор, *2* – заряд ВВ; *3* – метаемая пластина; *4* – промежуточные слои СКМ, *5* – неподвижная пластина; *6* – подложка, *7* – основание

объемного взаимодействия при сварке взрывом практически отсутствует. Современные методы локального микрорентгеноспектрального анализа высокой разрешающей способности показывают, что диффузии металлов в околошовной зоне почти не происходит.

Таким образом, получение качественного сварного соединения при сварке взрывом контролируется уровнем развития активационных процессов, следовательно, величиной доли кинетической энергии метаемой пластины, преобразованной в энергию W_2, затрачиваемую на пластическую деформацию металла в околошовной зоне [17].

На рис. 4.1.5 показана типичная идеализированная зависимость относительной прочности сварного соединения $\overline{\sigma}_в$, равной отношению прочности соединения к прочности основного металла, от величины реализованной в околошовной зоне энергии пластической деформации W_2. Аналогичный однотипный вид имеют зависимости относительной прочности сварного шва и от скорости соударения V_c, угла соударения γ, массовых характеристик свариваемых элементов m_i. В области низкоинтенсивных параметров соударения (область I) сварное соединение не образуется вследствие неразвитости активационных процессов на контактной границе. В области II активационные процессы уже способны привести к образованию неравнопрочных соединений. Оптимальные значения параметров соударения расположены между критическим $W_{2кр}$ и предельным $W_{2пр}$ значениями энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию (область III).

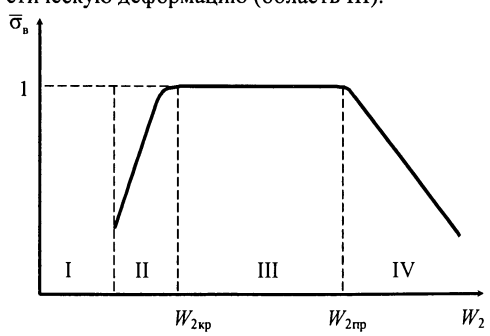


Рис. 4.1.5. Типичная зависимость относительной прочности сварного соединения от величины энергии W_2, затраченной на пластическую деформацию металла

Таким образом, сварное соединение между двумя металлами при сварке взрывом, как и в другом твердофазном процессе, образуется под действием приложенного к околошовной зоне определенного давления P, существующего в течение некоторого времени τ и вызывающего в ней развитие пластических деформаций, сопровождаемых локальным повышением температуры T, как правило, не достигающей температуры плавления металла $T_{пл}$. Для каждого произвольного сочетания свариваемых металлов, их толщин существуют свои диапазоны оптимальных параметров процесса.

Дальнейшее увеличение энерговложения на границе раздела (область IV) приводит к развитию различных видов химической и структурной неоднородности в виде расплавов, усадочных раковин, интерметаллидов и т.п., вызывающих разупрочнение сварного соединения. При этом возрастающие по амплитуде ударные волны при неограниченном росте W_2 неминуемо окончательно разрушат соединение по не успевшей закристаллизоваться прослойке расплава.

Другим важнейшим условием получения соединения является требование к величине скорости точки контакта $v_к$, которая при сварке взрывом не должна превышать скорость звука в металле c_0 и при оптимальных параметрах находится в пределах $v_к \approx (0{,}25...0{,}6)\, c_0$.

4.1.4. КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПОЗИТА И СПОСОБЫ ИХ ПОДГОТОВКИ

Контактные поверхности характеризуются геометрическими параметрами, наличием оксидных пленок, адсорбированных слоев, газов и масел, различных случайных загрязнений, а также структурой.

При анализе состояния контактных поверхностей соединяемых металлов следует учитывать местные (микрогеометрические) отклонения, которые характеризуются волнистостью и шероховатостью. Последняя зависит от способа предварительной обработки поверхности и оценивается средней высотой микровыступов, которая изменяется в широких пределах: от 0,3...1,0 мкм в результате полирования до 20...50 мкм после зачистки абразивным инструментом.

Физическое состояние поверхности твердого тела характеризуется наличием и составом поверхностных пленок и особенностями структуры поверхностных слоев. Состав оксидной пленки и ее толщина зависят от природы металла, состава окружающей газовой среды и условий их взаимодействия (температуры, давления, продолжительности). Оксидные пленки на металлах образуются в результате физической адсорбции – захвата поверхностными атомами металла молекул газов, в первую очередь кислорода, и последующей химической адсорбции – взаимодействия атомов газа и металла, в результате чего возникают прочные связи. Толстые пленки (окалина) возникают при высоких температурах.

В процессе совместной пластической деформации металлов поведение пленки определяется прочностью ее связи с металлом, отношением твердости оксида к твердости металла, а также ее толщиной. Чем больше отношение твердости оксида к твердости металла, тем легче разрушаются пленки в результате пластической деформации. Для облегчения появления ювенильных участков на контактные поверхности наносят искусственные хрупкие пленки, а также упрочняют поверхность с помощью механической обработки.

Одним из параметров, характеризующих физическое состояние контактных поверхностей соединяемых металлов, является их энергетическое состояние, которое оценивается путем определения величины работы выхода электрона с поверхности методом динамического конденсатора в атмосферных условиях.

Величину поверхностной энергии можно определить по формуле:

$$E = qZ/1{,}885 \cdot 10^{-3} r^2,$$

где q – работа выхода электрона, эВ; Z – количество свободных электронов на один атом; r – атомный радиус, $\overset{0}{A}$.

Был предложен комплексный критерий оценки качества контактных поверхностей по величине относительной поверхностной энергии $E/E_{исх}$ ($E_{исх}$ – величина исходной поверхностной энергии, характеризующая степень подготовки контактных поверхностей к плакированию; E – величина поверхностной энергии после плакирования, характеризующая воздействие холодной пластической деформации).

Подготовка контактных поверхностей к плакированию – один из важнейших этапов технологии, определяющий прочность соединения металлов. Все способы подготовки кон-

тактных поверхностей можно объединить в следующие группы: механические, электролитические, высокоэнергетические, комбинированные [17].

К преимуществам механических способов (обработка точением, щетками, иглофрезами, абразивными кругами, дробе- и пескоструйными аппаратами) относятся: возможность создания поверхности требуемого профиля и шероховатости; достаточно высокая производительность; легкость удаления с обрабатываемой поверхности остатков кислот, солей и абразивов; возможность включения способа в поточное производство.

Толстолистовой горячекатаный прокат обычно подвергают строганию, фрезерованию или зачистке дефектов ручными станками с наждачным кругом или войлочными кругами с абразивным покрытием. Рулонный горячекатаный прокат зачищают в специальных станках абразивной зачистки. Инструментом служат абразивные круги или ленты, а также иглофрезы, набранные из стальной проволоки диаметром ≤0,5 мм. Толщина снимаемого при этом слоя металла составляет 0,03...0,1 мм.

Шлифование проводят с помощью твердых или эластичных кругов. Твердые абразивные круги применяют для грубой обработки, например для снятия толстого слоя окалины, эластичные круги с нанесенным на них абразивным порошком – для снятия тонких оксидных пленок, сглаживания микронеровностей и т.п. Применяют также лепестковые шлифовальные круги, на которых закреплены листы шлифовальных шкурок или тонкие металлические пластины.

Большое распространение получили установки с вращающимися щетками, рабочим элементом которых служит проволока диаметром 0,2...0,8 мм. Скорость обработки щетками составляет 15...45 м/с, скорость подачи в зависимости от состояния обрабатываемых поверхностей – 0,5...30 м/мин. Для очистки стальных заготовок применяют стальные щетки, для очистки заготовок из цветных металлов – щетки из латунной или нейзильберовой проволоки, используют также капроновые и волосяные щетки. Для больших поверхностей применяют валковые щетки (длина валка свыше 1500 мм, наружный диаметр – 1000 мм и более. Эффективна обработка поверхности иглофрезами, имеющими высокую жесткость благодаря плотной упаковке проволок.

Высокоэнергетические способы подготовки контактных поверхностей (лазерный, плазменный, электронно-плазменный и др.) применяют, в основном, для очистки небольших участков, так как обработка больших поверхностей связана с техническими трудностями и значительными энергетическими затратами.

Традиционный способ удаления окалины с поверхности исходных заготовок – травление в растворах кислот и щелочей. Обычно перед травлением осуществляют абразивную зачистку или зачистку вращающимися проволочными щетками, пескоструйную обработку.

Важный этап подготовки контактных поверхностей – обезжиривание. Для обезжиривания используют следующие средства: щелочные (погружение, облив, орошение, обрызгивание); растворители (погружение, подача растворителя в паровой фазе, комбинированный способ); эмульсии (орошение или обрызгивание); электролитические способы (анодное, анодно-катодное).

Глава 4.2

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СКМ ЛИТЬЕМ, НАПЛАВКОЙ И СОВМЕСТНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

4.2.1. ЛИТЕЙНОЕ ПЛАКИРОВАНИЕ И НАПЛАВКА

Одним из способов получения слоистых композиционных материалов, основанных на взаимодействии жидких и твердых металлов, является литейное плакирование. Этим способом получают, в основном, слоистые стальные заготовки, предназначенные для их последующей обработки давлением (прокатки на листовых, сортовых и трубных станах, ковки на молотах и прессах, волочения, прессования и др.)

Наиболее простой способ литейного плакирования заключается в заливке жидкого металла в форму из плакируемого металла или непосредственно на плакируемую пластину, к которой приварены бортики из листового металла.

Для производства крупногабаритных двух- или трехслойных листов исходную заготовку (слиток) получают заливкой жидким металлом одной или двух плит (пластин), установленных в изложницу. Число плит и их расположение в изложнице определяют число

слоев в готовом прокате и характер дальнейшей технологии производства [17].

Наиболее эффективно применение этого способа для получения слоистых заготовок, предназначенных для изготовления коррозионно-стойких и износостойких биметаллов. В этом случае в изложницу, в которой установлена плита из коррозионно-стойкой стали, заливают углеродистую сталь (рис. 4.2.1, *а*). Для получения трехслойного листа у противоположных стенок изложницы укрепляют две плиты из коррозионно-стойкой стали, заливаемые жидким металлом (рис. 4.2.1, *б*). Одним из вариантов схемы литейного плакирования является получение из одного слитка двух биметаллических листов (рис. 4.2.1, *в*). После дальнейшей прокатки и обрезки кромок раскат разделяют на два двухслойных листа, термообрабатывают, правят, режут на требуемый размер, травят, производят отделку и маркировку.

Способы отливки слоистых слитков и заготовок экономичны, однако их применение имеет ряд ограничений, связанных с невозможностью качественного заполнения жидкой сталью узких зазоров между стенками изложницы и пластинами; с расплавлением пластин, если температура плавления металла их ниже температуры жидкого металла. Этим способом затруднительно получать биметаллические заготовки с плакирующим слоем из высоколегированных сталей и сплавов, чувствительных к перегреву и склонных к трещинообразованию при заливке жидкого металла. Кроме того, литейный метод плакирования непригоден для получения слоистых заготовок из составляющих, которые образуют на границе соединения интерметаллические включения и легкоплавкие эвтектики.

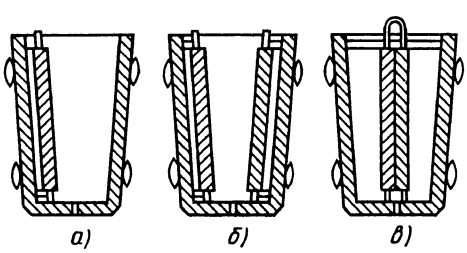


Рис. 4.2.1. Установка плит коррозионно-стойкой стали в изложницы для получения листов двухслойных (*а*); трехслойных (*б*); двух двухслойных (*в*)

Одним из перспективных направлений в производстве многослойных металлов является **непрерывное литье** плоских или круглых биметаллических заготовок, предназначенных для их последующей пластической деформации. Заливка двух или более жидких металлов в изложницу обеспечивает более прочное соединение слоев, чем заливка жидким металлом твердой составляющей.

Для последовательной отливки двух металлов в изложницу устанавливают перегородку, удаляемую после частичного затвердевания первого из заливаемых металлов. Когда требуется отлить заготовку небольшого сечения, применяют разъемные изложницы с вкладышем, размеры которого соответствуют размерам слоя, образуемого от заливки второго металла. После заливки первого металла вкладыш извлекают из изложницы, а образовавшееся пространство заливают металлом второй составляющей. Одновременную отливку двух металлов производят в изложницу с тонкой перегородкой, которая не допускает смешивания двух металлов.

Существуют две разновидности непрерывной отливки слоистых заготовок: отливка из двух или более жидких металлов и отливка из твердого и жидкого металлов.

Способ получения биметаллических заготовок путем одновременной заливки двух жидких металлов в два кристаллизатора реализуется в следующем. В устройстве (рис. 4.2.2, *а*) кристаллизаторы *1* и *2* расположены концентрично, но смещены по высоте относительно друг друга. Основной металл заливают в кристаллизатор *1* и после его затвердевания вытягивают вниз в кристаллизатор *2*, при этом в

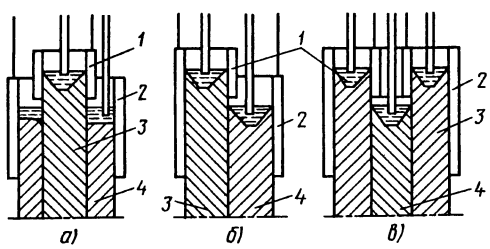


Рис. 4.2.2. Схема расположения кристаллизаторов при отливке трехслойной (*а*), двухслойной (*б*) и двухслойной цилиндрической (*в*) заготовок:
1, *2* – кристаллизаторы, *3*, *4* – металл составляющих биметалла

последний начинают заливать металл плакирующего слоя, который взаимодействует с твердой, но еще горячей поверхностью заготовки *3* и прочно сваривается с ней. При отливке двухслойной заготовки в случае несимметричного расположения кристаллизаторов *1* и *2* (рис. 4.2.2, *б*) вначале отливают заготовку *3*, а затем в кристаллизатор *2* заливают плакирующий металл.

При получении биметаллической цилиндрической заготовки (рис. 4.2.2, *в*) плакирующий металл заливают в кристаллизатор *2*, где формируется полая заготовка *3*, а затем полость этой заготовки, служащей в качестве кристаллизатора, заполняют основным металлом.Технология производства биметаллических труб или сплошных цилиндрических заготовок заключается в последовательной заливке расплавленных металлов основного и плакирующего слоев во вращающуюся форму или в заливке расплавленного металла в заранее изготовленную гильзу из металла основного слоя.

Центробежное литье применяют для изготовления биметаллических труб и заготовок размерами (83...900) × (10...250) мм, а с помощью дальнейшей горячей или холодной пластической деформацией получают трубы с наружным диаметром 6...550 мм и толщиной стенки 1 мм и более, а также биметаллические прутки диаметром 20...100 мм. Центробежное литье позволяет сократить технологический цикл производства биметаллических изделий.

Выплавку металлов основного и плакирующего слоев при литье осуществляют в дуговых или индукционных печах (рис. 4.2.3), шлака – в индукционных печах с графитовым тиглем. Заливку расплавленных металлов и шлака во вращающийся кокиль ведут в такой последовательности: сначала заливают металл наружного слоя, потом шлак и, наконец, металл внутреннего слоя. После затвердевания металла, покрытого слоем расплавленного шлака, заливают второй металл, при этом шлак всплывает на его поверхность. В результате размыва и перемешивания металлов соединяемых слоев образуется достаточно прочное соединение.

Центробежное литье широко используют также в производстве биметаллических изделий цилиндрической формы широкого класса: втулок, гаек, зубчатых и червячных колес и т.п. Основным методом служит центробежная заливка расплавленного металла, при этом расплавление металла производится различными методами: электродуговым, нагревом токами высокой частоты, печным нагревом и др.

Метод **наплавки** основан на возбуждении электрической дуги между электродом и

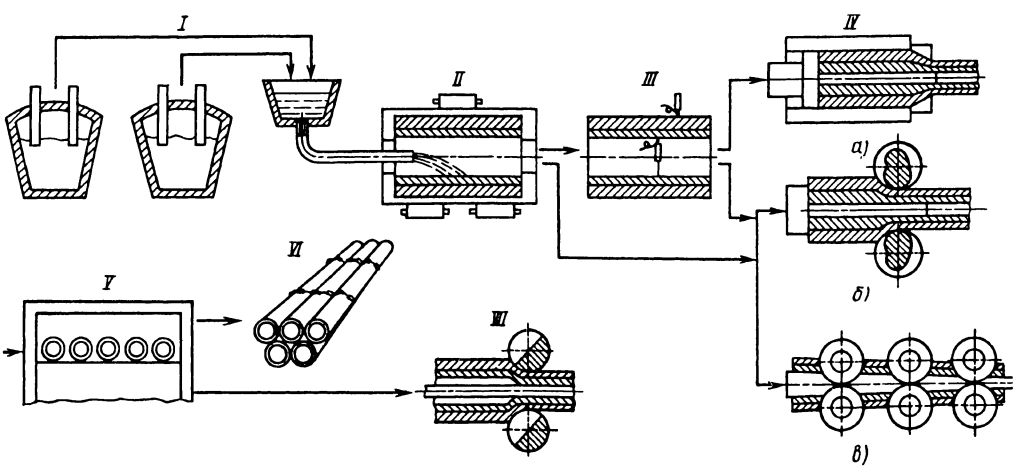


Рис. 4.2.3. Схема технологического процесса производства центробежным литьем биметаллических заготовок:
I – плавка металлов основного и плакирующего слоев; II – центробежное литье биметаллических заготовок, III – механическая обработка заготовок; IV – изготовление труб прессованием (*а*), горячей прокаткой на пилигримовых (*б*) и непрерывных (*в*) станах; V – термическая обработка труб; VI – отделка и сдача горячекатаных или прессованных труб; VII – холодный передел

плакируемым металлом, при этом соединение плакирующего металла с основным происходит в жидком состоянии благодаря проплавлению основного металла на определенную глубину и перемешиванию наплавляемого металла с расплавленным металлом основы.

Многослойная наплавка применяется как для непосредственного плакирования листов, так и для получения крупногабаритных биметаллических заготовок для их последующей прокатки на двухслойные листы. Для уменьшения глубины проплавления применяют наплавку двумя проволочными электродами в защитном газе. Использование проволочных электродов для получения требуемой толщины и состава плакирующего слоя биметаллической заготовки требует наложения нескольких слоев. Использование ленточного электрода толщиной 0,5 мм позволяет создать слой требуемого состава и толщины наложением меньшего числа слоев.

Способ изготовления биметаллических заготовок **наплавкой под слоем обогреваемого шлака** предусматривает электрошлаковый нагрев заготовки основного слоя нерасходуемыми электродами, заливку и кристаллизацию металла плакирующего слоя в процессе электрошлакового обогрева [15]. В качестве основного слоя применяют катаные или литые слябы (заготовки) из углеродистых и низколегированных сталей; металл плакирующего слоя выплавляют в индукционных печах; шлак – в дуговых шлакоплавильных печах.

Процесс производства биметаллических заготовок наплавкой под слоем шлака осуществляют следующим образом. На тележку с поддоном горизонтально укладывают основную плиту и устанавливают кристаллизатор (рис. 4.2.4). В электродержателях установки над плитой закрепляют нерасходуемые пластинчатые графитизированные электроды.

Зазоры между плитой и стенками кристаллизатора заполняют огнеупорным материалом, а поверхность плиты засыпают слоем гранулированного шлака толщиной 20 мм. Затем в кристаллизатор заливают жидкий шлак и в шлаковую ванну вводят электроды. Для обеспечения равномерного нагрева поверхности плиты тележка с плитой перемещается возвратно-поступательно относительно электродов.

После электрошлакового нагрева плиты и ее подплавления на глубину до 5 мм электроды выводят из шлаковой ванны, на поверхность плиты заливают металл плакирующего слоя и электроды вновь вводят в шлаковую ванну. Обогрев ведут в течение 2 ч, при этом происходит направленная кристаллизация залитого металла. После затвердевания металла плакирующего слоя процесс электрошлакового обогрева прекращают.

После затвердевания и остывания шлака его удаляют с поверхности биметаллической плиты. Поверхность плакирующего слоя подвергают механической обработке (строжке, фрезерованию или обдирке наждачным камнем), проверяют качество сварки и состояние поверхности коррозионно-стойкого слоя, выявленные дефектные места подвергают ремонту.

Способ **электрошлаковой наплавки жидким металлом** применяется для изготовления плоских и цилиндрических биметаллических заготовок и изделий. Так, наплавку валков прокатных станов осуществляют в медном водоохлаждаемом токоподводящем кристаллизаторе (рис. 4.2.5), который не только формирует плакирующий слой, но и является нерасходуемым электродом, поддерживающим электрошлаковый обогрев. В зазор между поверхностью валка и стенкой кристаллизатора заливают расплавленный в отдельной емкости шлак, при этом за счет теплоты, выделяемой в шлаковой ванне, происходит подплавление

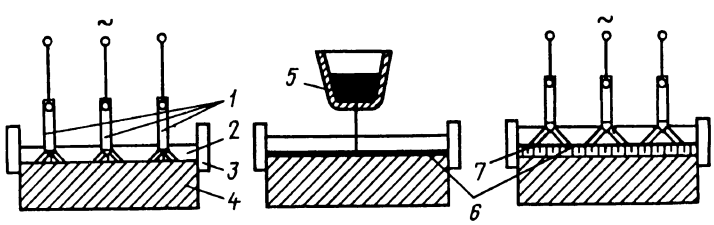


Рис. 4.2.4. Схема получения биметаллов наплавкой под слоем обогреваемого шлака:
1 – нерасходуемые электроды, *2* – шлаковая ванна; *3* – кристаллизатор; *4* – плакируемая заготовка, *5* – ковш с металлом плакирующего слоя, *6* – слой жидкого шлака; *7* – плакирующий слой

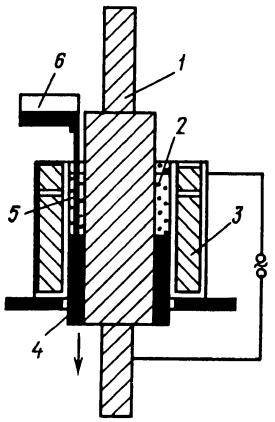


Рис. 4.2.5. Схема процесса электрошлаковой наплавки жидким металлом:
1 – валок; *2* – шлаковая ванна, *3* – кристаллизатор; *4* – наплавленный слой, *5* – жидкий металл, *6* – заливочное устройство

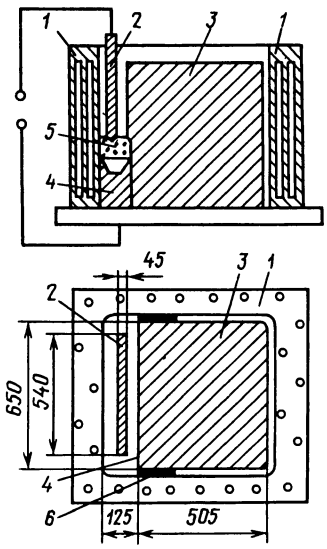


Рис. 4.2.6. Схема получения двухслойной заготовки при вертикальной электрошлаковой наплавке:
1 – кристаллизатор; *2* – расходуемый электрод; *3* – основной металл, *4* – плакирующий слой; *5* – шлаковая ванна; *6* – боковые уплотнения

поверхностного слоя валка. После этого в зазор между валком и кристаллизатором заливают металл плакирующего слоя, который вытесняет шлак вверх и соединяется с оплавленным металлом валка. В процессе наплавки осуществляют постоянное перемещение валка из кристаллизатора или перемещение кристаллизатора относительно валка.

Широкослойную электрошлаковую наплавку отличает от других способов наплавки то, что подаваемые сверху расходуемые электроды в виде листового или сортового проката перекрывают всю ширину наплавляемой заготовки основного металла, а весь наплавленный плакирующий слой формируется за один проход. Производительность этого способа в 5 – 8 раз выше, чем при многослойной ленточной наплавке.

В зависимости от расположения наплавляемой поверхности различают горизонтальную, наклонную и вертикальную электрошлаковую наплавку [17].

Горизонтальная электрошлаковая наплавка по своей сущности близка к описанному выше способу наплавки под слоем обогреваемого шлака, она приводит к значительной разнотолщинности плакирующего слоя даже в пределах одной заготовки. Кроме того, на участках падения капель переплавляемого металла под электродами наблюдается более высокая глубина проплавления основного металла, чем на участках между электродами. Увеличение глубины проплавления вызывает также заметное снижение содержания основных легирующих элементов в плакирующем слое коррозионно-стойкой стали.

Электрошлаковая наплавка с наклонным расположением исходной заготовки позволяет улучшить качество поверхности катаного биметаллического листа благодаря более благоприятной ориентации литой структуры наплавленного слоя. В этом способе наплавки вертикально расположенные электроды подаются в жидкую ванну предварительно расплавленного шлака. Одновременно осуществляется передвижение наплавляемой заготовки относительно электродов, при этом расплавление электродов и подплавление поверхности заготовки происходит за счет протекания электрошлакового процесса. В процессе наплавки по наклонной схеме также не удается обеспечить равномерного подплавления основного металла, а отсюда и равномерной толщины плакирующего слоя.

Более перспективным способом получения биметаллических заготовок является **наплавка с вертикальным расположением плакируемой заготовки** (рис. 4.2.6), которую можно осуществлять не только на специально сконструированных установках, но и в серийных электрошлаковых печах [24]. При верти-

кальном расположении наплавляемой заготовки капли переплавляемого металла не падают непосредственно на плакируемую поверхность, а собираются на поддоне или на боковой поверхности уже сформированного плакирующего слоя. В этом случае подплавление поверхности основного металла происходит только за счет теплоты жидкой шлаковой ванны, а плакирующий слой при этом формируется с равномерной по высоте и сечению толщиной.

К способам электрошлаковой наплавки по своей технологической сущности близка **электрошлаковая сварка**, при которой источником нагрева также служит теплота, выделяющаяся в ванне расплавленного флюса при прохождении через нее тока от электрода к изделию [13]. При изготовлении биметаллической заготовки с применением способа электрошлаковой сварки для последующей прокатки слиток или пластина углеродистой стали сваривается с одной или двумя пластинами коррозионно-стойкой стали. Изменяя толщины слоев основного и плакирующего металлов, величину зазора между ними, можно получить требуемое соотношение толщин слоев в готовом прокате.

4.2.2. ГОРЯЧАЯ ПАКЕТНАЯ ПРОКАТКА

Основным промышленным способом производства широкого класса слоистых композиционных материалов является горячая совместная пластическая деформация, используемая для получения слоистых листов, полос, лент, фасонных профилей, труб, прутков и проволоки.

Несмотря на большое многообразие технологических процессов получения СКМ с использованием различных процессов обработки металлов давлением принципиальная схема способа остается общей и содержит следующие основные технологические операции: подготовку заготовок из металла основного и плакирующего слоев; сборку пакета; нагрев и деформацию пакета; термическую обработку; отделку и контроль качества готового слоистого композита.

Сущность способа изготовления многослойных металлов прокаткой состоит в совместной пластической деформации листов, полос или лент соединяемых металлов (обычно сталь + + цветные, тугоплавкие и редкие металлы), собранных в пакет. Прокатку применяют и для получения фасонных профилей, труб, прутков и проволоки. Во многих случаях в качестве исходных материалов для прокатки используют двухслойные и многослойные слитки, слябы и заготовки, полученные литьем, наплавкой, сваркой взрывом и другими способами.

Подготовка исходных материалов. Обычно слитки, слябы или плиты из металла основного слоя строгают или фрезеруют, иногда применяют абразивную или дробеструйную обработку. После зачистки поверхность тщательно очищают от абразивной и металлической пыли промывкой или другими способами.

Конструкции пакетов и их сборка. Для производства СКМ горячей совместной пластической деформацией предложены различные конструкции пакетов, различающиеся как схемой укладки составляющих, так и способом их соединения, обеспечивающим прочность и герметичность пакета при нагреве и прокатке [8, 17].

При изготовлении двухслойных биметаллов используют несимметричные пакеты (рис. 4.2.7, *а*), состоящие из основного и плакирующего слоев, а также двойные симметричные пакеты (рис. 4.2.7, *б*). В последнем случае получают одновременно два биметаллических листа, изолированных друг от друга прослойкой, которая предотвращает сваривание одноименных составляющих при прокатке. На рис. 4.2.7, *в*, *г* приведены схемы укладки пакетов с соединительным подслоем. Для изготовления трехслойных листов применяют симметричные пакеты без подслоя (рис. 4.2.7, *д*) и с подслоем (рис. 4.2.7, *е*). Семислойные пакеты (рис. 4.2.7, *ж*) применяют для одновременного получения трехслойного и двух двухслойных листов.

Наиболее простой пакет состоит из пластины основного металла и приваренных к ней одной или двух пластин плакирующего металла. Пакеты такой конструкции используют тогда, когда металлы основного и плакирующего слоев имеют одинаковые или близкие коэффициенты линейного расширения. В случае, когда коэффициент линейного расширения металла плакирующего слоя превышает таковой металла основного слоя, применяют двухслойные пакеты, конструкция которых предусматривает возможность свободного расширения пластин плакирующего металла без разрушения сварных швов.

Чаще используют симметричные четырехслойные пакеты, в которых верхний и нижний слябы основного металла соединяются через планки из углеродистой стали. Для компенсации разницы в расширении металлов

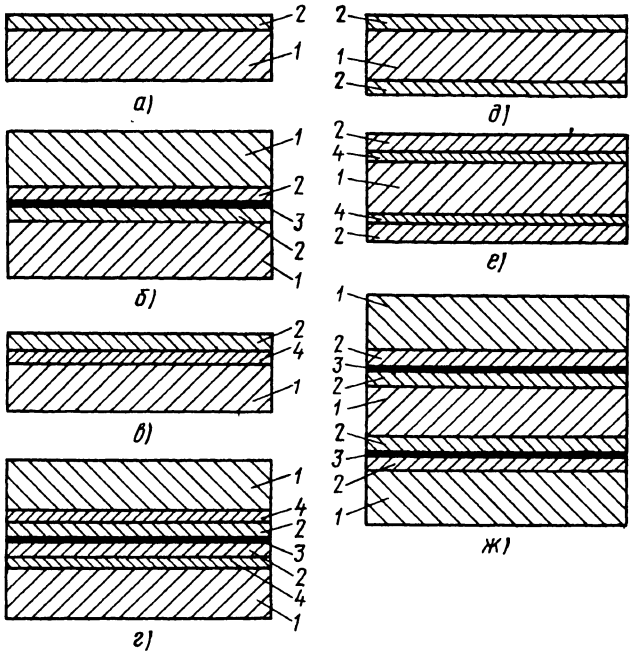


Рис. 4.2.7. Схемы укладки составляющих слоистых композитов в пакеты для последующей прокатки:
а – несимметричный двухслойный пакет; *б* – симметричный двойной пакет; в – несимметричный пакет с соединительным подслоем, *г* – симметричный двойной пакет с соединительным подслоем, *д* – трехслойный симметричный пакет без соединительного подслоя, *е* – то же, с подслоем; *ж* – семислойный симметричный пакет для получения одного трехслойного и двух двухслойных листов:
1 – основной слой; *2* – плакирующий слой; *3* – разделительный подслой; *4* – соединительный подслой

основного и плакирующего слоев между планками и пластинами предусматривают зазор. Для предотвращения сваривания пластин плакирующего слоя при сборке между ними равномерно наносят разделительный слой.

В ряде случаев прибегают к дополнительным мерам, направленным на предотвращение или уменьшение окисления контактных поверхностей соединяемых металлов. Для этого внутрь пакета (в углубления по кромкам и углам) помещают специальные (пирофорные) вещества, связывающие кислород и азот воздуха. С этой же целью применяют вакуумирование пакетов и продувку их инертными газами. Для защиты контактных поверхностей от окисления в некоторых случаях на них наплавляют слой никеля или наносят тонкий слой низкоуглеродистой стали.

Подготовленные к плакированию исходные заготовки (пакеты) подвергают нагреву в нагревательных колодцах, камерных и методических печах, печах с вращающимся подом и индукционных установках. Термический режим нагрева пакетов назначают в зависимости от химического состава соединяемых металлов, размеров пакета и требуемых свойств и структуры готового проката.

4.2.3. ПРЕССОВАНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Прессование широко применяется в производстве биметаллических и многослойных труб, прутков, фасонных профилей различного поперечного сечения, панелей из цветных металлов и сплавов на их основе, углеродистых, легированных и коррозионно-стойких сталей, тугоплавких, жаропрочных и других металлов и сплавов [24].

Способы прессования классифицируют по следующим признакам:

1. Контактное взаимодействие заготовки с втулкой контейнера:

прямое прессование – контейнер неподвижен, а заготовка под действием пресс-штемпеля перемещается в направлении матрицы;

обратное прессование – контейнер и заготовка неподвижны, а матрица перемещается под действием полого пресс–штемпеля, на котором она установлена. Второй вариант этого процесса – контейнер и заготовка движутся с одинаковой скоростью в сторону неподвижной матрицы, установленной на неподвижном полом пресс-штемпеле;

совмещенное прессование, при котором металл исходной заготовки под действием пресс-штемпеля одновременно (или не одновременно) течет через две матрицы в разных направлениях;

прессование с активным действием сил трения (СПАТ) – контейнер перемещается в одном направлении с движением пресс-штемпеля, но с большей скоростью.

2. Температурные условия процесса: горячее, теплое, холодное или изотермическое прессование.

3. Непрерывность процесса: дискретное, полунепрерывное или непрерывное прессование.

4. Характеристика прессуемых материалов: монометаллические, слоистые композиционные материалы (биметаллические или многослойные), волокнистые композиционные материалы, порошковые материалы.

Кроме того, различают специальные способы прессования, а также прессование со смазкой, в оболочках, жидкостью и газом высокого давления, в вакууме и в контролируемых средах.

Интенсивная сдвиговая деформация и нагрев обеспечивают при прессовании благоприятные условия для образования прочного соединения составляющих. Биметаллические трубы из цветных металлов и сплавов, например алюминия и меди, изготовляют также методом холодного прессования составных заготовок.

Процесс прессования слоистых металлов определяется взаимным расположением слоев в заготовке, соотношением механических свойств и толщин составляющих, условиями контактного и межслойного трения, формой и параметрами прессового инструмента и другими факторами. Слоистые изделия, получаемые прессованием, можно разделить на три группы: с продольной слоистостью, поперечной слоистостью и с оболочкой из одного металла на сердечнике из другого металла.

На практике используют две основные схемы прессования слоистых изделий: наложением плакирующей оболочки на сердечник из основного металла и совместным прессованием составной заготовки. В первом случае интенсивной деформации подвергается только металл плакирующего слоя, что дает возможность получать изделия с высокой точностью размеров и равномерной толщиной плакирующего слоя. Во втором случае используют составные или предварительно соединенные заготовки, причем расположение слоев относительно направления прессования может быть продольным или поперечным. Прессованием получают не только круглые изделия, но и различные фасонные профили, в том числе профили с местной плакировкой. При изготовлении изделий с продольной слоистостью исходную сплошную или полую заготовку, составленную из концентрических слоев соединяемых металлов, выдавливают через матрицу, профиль канала которой соответствует наружному профилю изделия.

Производство многослойных прутков и труб осуществляют прессованием через несколько (по числу слоев) последовательно расположенных матриц, при этом заготовки из плакирующего металла загружают в полость контейнера между матрицами. Вначале прессуют через первую матрицу заготовку из основного металла, затем упор убирают и производят совместную деформацию основного и плакирующего металлов. Прессование с наложением оболочки на сердечник широко применяют в электротехнической промышленности при наложении оболочки на электрический кабель.

Для прессования биметаллических прутков с плакирующим слоем из металла, обладающего меньшим сопротивлением деформации, чем металл основы, применяют исходные заготовки с поперечной слоистостью. Заготовку помещают в тонкостенную оболочку с дном и после нагрева подвергают деформации. При этом каждый поперечный слой, находящийся ближе к переднему торцу пресс-изделия, становится "рубашкой" для следующего за ним слоя. Для получения различных фасонных профилей исходную заготовку составляют из разнородных металлов с разными долями каждого из них.

Прессованием жидкостью высокого давления (гидропрессованием, гидроэкструзией) можно получать биметаллические прутки и трубы из малопластичных и труднодеформируемых металлов и сплавов.

На рис. 4.2.8 показана схема получения прессованием биметаллического прутка и

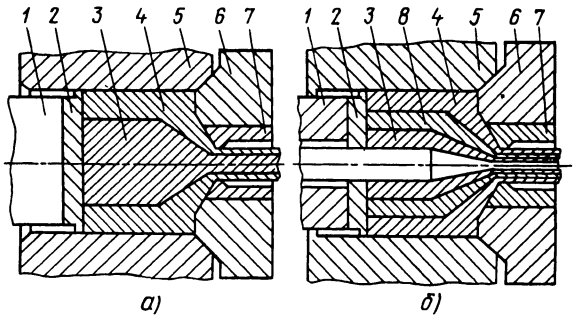


Рис. 4.2.8. Схема прессования биметаллического прутка (*а*) и трехслойной трубы (*б*) из заготовок с продольной слоистостью:
1 – пресс-штемпель, *2* – пресс-шайба, *3* – основной слой; *4* – плакирующий слой; *5* – контейнер, *6* – матрицедержатель, *7* – матрица, *8* – средний слой металла, *9* – игла

трехслойной трубы. В качестве наружного слоя можно использовать как прочные, так и пластичные металлы. Так, при прессовании жаропрочных, металлокерамических, хрупких, гранулированных материалов применяют оболочку из алюминия, меди или мягкой стали. Это позволяет не только предохранить биметаллическую заготовку от взаимодействия с окружающей средой, но и создать дополнительный смазочный эффект. В другом случае наружным слоем для углеродистой стали или титана служит коррозионно-стойкая сталь.

4.2.4. ПРОИЗВОДСТВО БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ И ПРУТКОВ

В настоящее время отечественная и зарубежная промышленность выпускает биметаллические и многослойные трубы диаметром 0,8...1400,0 мм со стенкой толщиной 0,15...70,0 мм, при этом толщина плакирующего слоя составляет 5...50 % толщины стенки [16].

В качестве исходных заготовок для совместного пластического деформирования применяют биметаллические слитки, заготовки, трубы и прутки, составляющие которых достаточно прочно соединены между собой известными способами литья, наплавки, сварки или обработки давлением. Можно использовать также составные заготовки, между слоями которых металлические связи отсутствуют.

Горячекатаные трубы обычно калибруют по контактному диаметру (внутреннему или наружному) раздачей, волочением или прессованием, подвергают холодной прокатке. Иногда применяют расточку или обточку контактной поверхности трубы.

Подготовленные таким образом трубы сочленяют в пары или многослойные композиции и производят герметизацию межслойного пространства путем отбортовки, обжима или раздачи. Если составная заготовка перед деформацией подвергается нагреву, то производят герметизацию зазора обваркой торцев заготовок плотным швом.

Контактные поверхности труб длиной свыше 1000 мм приводят в соприкосновение друг с другом путем совместного волочения без оправки или на длинной оправке, раздачей или проталкиванием заготовок через матрицу.

Нагрев заготовок перед горячей деформацией осуществляют в газовых или индукционных печах в безокислительной или защитной атмосфере. Температуру нагрева биметаллических заготовок обычно определяет температура нагрева более легкоплавкого металла.

При горячей деформации биметаллических заготовок важно обеспечить наиболее равномерную деформацию слоев. Этому способствуют следующие приемы: изготовление заготовок с натягом слоев; применение заготовок с внутренним слоем из металла, имеющего больший коэффициент линейного расширения; осуществление нагрева с требуемым распределением температур по сечению заготовки.

Биметаллические трубы и прутки получают прокаткой исходных заготовок на трубных станах различных типов (рис. 4.2.9). Холодную деформацию биметаллических труб производят на станах холодной прокатки и волочением. Перед холодной деформацией биметаллические передельные трубы подвергают омеднению, фосфатированию, иногда деформируют без применения каких-либо покрытий. Холоднодеформированные трубы

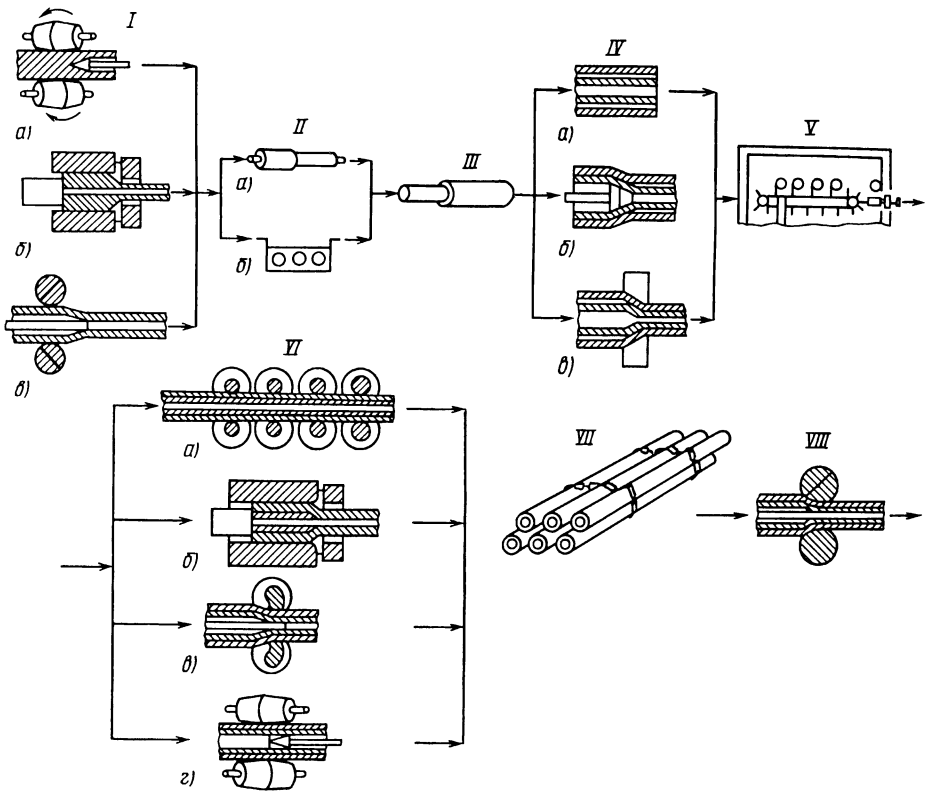


Рис. 4.2.9. Схема технологического процесса производства биметаллических труб совместной пластической деформацией:

I – изготовление труб основного и плакирующего слоев на автоматических, непрерывных и пилигримовых установках (*а*), на прессах (*б*) и станах холодной прокатки (*в*), II – подготовка контактных поверхностей механической (*а*) и химической (*б*) обработкой, III – сборка составных заготовок, IV – герметизация контактных поверхностей заваркой торцев (*а*), раздачей (*б*) и волочением (*в*), V – термодиффузионная обработка, VI – горячая деформация на непрерывных станах (*а*), прессах (*б*), пилигримовых станах (*в*), станах поперечно-винтовой прокатки (*г*), VII – отделка и сдача горячекатаных или прессованных труб, VIII – холодный передел

обычно подвергают термической обработке в проходных газовых или электрических печах, муфельных печах с защитной атмосферой, вакуумных печах, а также в электронагревательных установках с нагревом в вакууме или на воздухе. В зависимости от кривизны их правят на роликовых машинах, косовалковых правильных станах, прессах.

Готовые биметаллические трубы подвергают контролю: осмотру внутренней и наружной поверхностей с определением глубины залегания дефектов; измерению геометрических размеров, в том числе толщины плакирующего слоя; определению механических свойств, прочности соединения слоев и сплошности сварки; испытаниям на сплющивание, раздачу, изгиб. Трубы, удовлетворяющие требованиям стандартов или технических условий, маркируют, консервируют, упаковывают и отправляют на склад готовой продукции для последующей отгрузки потребителям.

Глава 4.3

ХОЛОДНОЕ ПЛАКИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.3.1. СХЕМЫ И СПОСОБЫ ПРОЦЕССА

Крупносерийное и массовое производства слоистых композитов осуществляют холодным рулонным плакированием. Этим способом производят в основном биметаллы срав-

нительно небольшой толщины (до 4...5 мм) из стали, Cu, Al, Ni, Ti и других металлов и сплавов.

Технологический процесс производства СКМ холодным плакированием состоит из следующих основных операций: подготовки исходных составляющих; холодного плакирования; термической обработки холоднoплакированного металла; окончательной холодной прокатки; окончательной термической обработки; отделки [8, 17].

Исходные заготовки в виде полос или рулонных лент подвергают обезжириванию, травлению и зачистке контактных поверхностей. Затем осуществляют сборку пакета: составляющие складывают, совмещая их контактные поверхности (пакетный метод). При рулонном способе исходные заготовки (ленты основного и плакирующего слоев), подают в валки прокатного стана и подвергают совместной деформации (рис. 4.3.1). При холодном плакировании возможны случаи, когда достаточно прочное соединение слоев образуется при деформации только одной, более пластичной составляющей. При прокатке несимметричных пакетов неравномерность послойных деформаций приводит к изгибу биметалла при выходе из валков. Предотвратить этот изгиб можно с помощью установления разных скоростей вращения валков или использования валков разного диаметра.

При производстве инструментальных и износостойких биметаллов применяют совместную прокатку с местной плакировкой. Для изготовления электрических контактных устройств используют композиты с полосчатым плакированием. При их получении на основной слой устанавливают одну или несколько полос (прутков или проволок) из материала плакирующего слоя на некотором расстоянии друг от друга и производят их совместное деформирование. Профильные слоистые композиты с несколькими параллельными полосами плакирующего металла получают также с помощью совместной прокатки в калиброванных валках.

Холодным плакированием можно изготовлять двух- и трехслойные панели с каналами, предназначенные для производства испарителей и теплообменников. Перед плакированием на участки поверхности основы наносят специальную пасту, которая предотвращает соединение листов при прокатке. После плакирования полученную слоистую полосу нагревают, в результате чего паста разлагается с образованием газа. Давление газа раздвигает полосы, формируя заданную конструкцию. Для получения ребристых панелей на основу также наносят пасту, предотвращающую соединение полос, но не разлагающуюся с образованием газа. После прокатки плакирующую полосу надрезают в местах нанесения пасты и отгибают, создавая ребра.

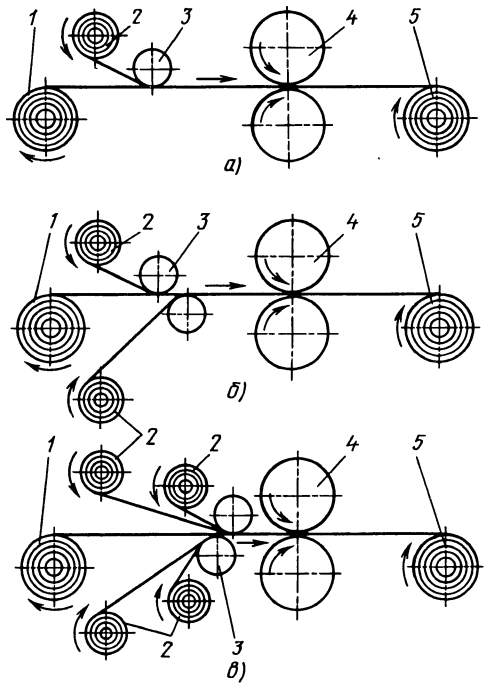


Рис. 4.3.1. Схема получения двух- (*а*), трех- (*б*) и пятислойной (*в*) полос способом холодного рулонного плакирования:
1 – разматыватель с рулоном полосы основного слоя; *2* – разматыватель с рулоном полосы плакирующего слоя, *3* – направляющие ролики, *4* – рабочие валки прокатного стана; *5* – моталка с рулоном многослойной полосы

4.3.2. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ СЛОИСТЫХ ПОЛОС

Совместная пластическая деформация – необходимое условие для получения сплошного прочного соединения между металлами, она формирует свойства и структуру готовой композиции, обеспечивает заданное соотношение толщин слоев. Одна из главных особенностей деформации слоистых металлов – неравномерность ее распределения между слоями вследствие различия свойств составляющих. Кроме

того, деформация слоистого тела в процессе плакирования, когда еще не произошло прочного соединения слоев, осуществляется в условиях межслойного трения, что также способствует росту послойной неравномерности деформации.

Неравномерность деформации слоистых тел при прокатке зависит от соотношений сопротивлений деформации составляющих, исходных толщин слоев и порядка их укладки, параметров очага деформации, а также от контактных и межслойных сил трения, их величины и направления. В целом неравномерность деформации оказывает отрицательное влияние на процесс плакирования и на свойства слоистой композиции, так как приводит к возникновению в ней значительных остаточных напряжений, которые могут вызвать расслоение, изгиб, коробление, разрушение более твердых слоев.

Существенное влияние на послойные деформации и контактные напряжения при прокатке биметаллов оказывает натяжение. Изменением переднего и заднего натяжений можно оперативно влиять на распределение деформации, необходимой для обеспечения заданного соотношения толщин слоев и прочности их соединения.

Распределение деформации зависит от порядка укладки составляющих в исходной слоистой заготовке, при этом различают симметричные и асимметричные пакеты. При деформации асимметричных пакетов в мягких слоях появляются дополнительные напряжения сжатия, а в твердых – растяжения. В приконтактных поверхностях в результате взаимодействия с ними валков возникают сжимающие напряжения. Таким образом, мягкий слой заготовки подвергается действию дополнительных сжимающих напряжений как со стороны твердого слоя, так и со стороны валка. В результате деформация твердого слоя облегчается, что приводит к сближению значений деформации мягкого и твердого слоев, т.е. к снижению неравномерности деформации биметалла. Уменьшение толщины мягкой составляющей по отношению к твердой способствует выравниванию послойных деформаций. Таким образом, при прокатке асимметричных пакетов с уменьшением в них доли мягкой составляющей неравномерность послойной деформации снижается.

Если толщины твердого и мягкого слоев близки, то возникает значительная неравномерность деформации. Для ее снижения можно использовать прокатку симметричных четырехслойных пакетов, собранных по схеме М + + Т + Т + М. При прокатке симметричных пакетов по схеме М + Т + М мягкие слои в приконтактных поверхностях с валком и твердым слоем испытывают дополнительные сжимающие напряжения, в твердом слое возникают растягивающие напряжения. Такая схема обеспечивает минимальную неравномерность послойных деформаций.

При прокатке пакетов, собранных по схеме Т + М + Т, в слоях твердого металла возникает разноименное напряженное состояние: сжатие со стороны валка и растяжение со стороны мягкого слоя, поэтому они деформируются в меньшей степени, чем при прокатке пакета М + Т + М. Следовательно, в случае использования схемы Т + М + Т неравномерность послойной деформации при прочих равных условиях выше.

Таким образом, при разработке технологии производства слоистых композиционных материалов необходимо обеспечить два главных взаимосвязанных условия – прочное соединение составляющих по всей поверхности контакта и заданное соотношение толщин слоев составляющих.

Если за параметры оптимизации принять степень деформации, обеспечивающую получение прочного соединения, и соотношение слоев в готовом биметалле, факторы, влияющие на параметры оптимизации, можно расположить в следующем порядке: показатель механической неоднородности пакета – соотношение исходных механических свойств соединяемых металлов; степень деформации пакета; показатель конструкционной неоднородности пакета – соотношение исходных толщин слоев соединяемых металлов; абсолютные значения толщин слоев; натяжение, прикладываемое к соединяемым полосам (заднее) и к слоистой полосе (переднее); состояние контактных поверхностей (металл – валок и металл – металл); скорость деформирования; температура в очаге деформации.

Для исследования процесса трехслойных полос приняли первые из этих факторов как наиболее значимые. Интервалы варьирования для каждого фактора определяли в соответствии с реально существующей областью их значений при изготовлении широкого класса биметаллов типа сталь + цветные металлы и их

сплавы в широком диапазоне изменения их свойств и соотношения толщин слоев составляющих (табл. 4.3.1).

Состояние контактных поверхностей характеризовалось показателем Ra = 7...20 мкм (среднее арифметическое отклонение профиля). Натяжение назначали исходя из обеспечения возможного снижения средних контактных напряжений и стабильности процесса плакирования: заднее натяжение основного слоя составляло 60 МПа, плакирующего – 20 МПа; переднее натяжение биметалла – 30 МПа. Скорость деформирования составляла 0,1 м/с, температура в очаге деформации 140...250 °С.

Экспериментальные зависимости показателя послойной неравномерности деформации от общего обжатия при различных значениях $K_к$ и $K_м$ представлены на рис. 4.3.2. Их анализ свидетельствует о том, что влияние показателей механической и конструкционной неоднородности на неравномерность послойных деформаций определяется характером напряженного состояния при разных соотношениях сопротивления деформации металлов наружных и внутреннего слоев и их толщин.

В диапазоне значений $K_м$ = 0,25...1,0 реализуется схема укладки пакета М + Т + М; при $K_м$ = 1,0...1,8 схема укладки изменяется (Т + М + Т). Соответственно изменяется и характер влияния показателя $K_м$ на неравномерность деформации.

4.3.1. Факторы и интервалы варьирования

Фактор	Обозначение	Интервал варьирования	Шаг варьирования
Показатель неоднородности пакета:			
конструкционной	$K_к = H_н/H_в$	0,025...0,5	0,05...0,15
механической	$K_м = \sigma_т^н/\sigma_т^в$	0,25...1,8	0,05...0,25
Степень высотной деформации пакета $\varepsilon = (H_п - h_п)/H_п$	$\varepsilon = H_п - h_п/H_п$	0,4...0,75	0,05
Толщина слоя, мм:			
наружного	$H_н$	0,2...1,1	0,1
внутреннего	$H_в$	2,15...7,5	0,1

Примечание: $H_п$, $h_п$ – соответственно исходная и конечная толщина пакета, $\sigma_т^н$, $\sigma_т^в$ – соответственно предел текучести металла наружного и внутреннего слоев; $H_в$ и $H_н$ – и исходные толщины верхнего и нижнего слоев.

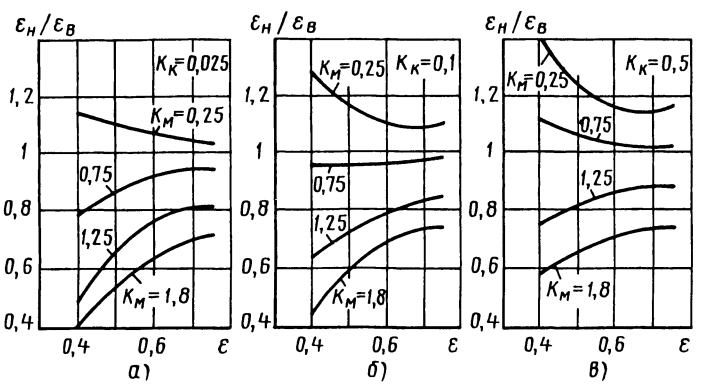


Рис. 4.3.2. Зависимость послойной неравномерности деформации от основных факторов процесса холодного плакирования

При первой схеме с ростом $K_м$ происходит уменьшение неравномерности деформации, при второй – ее рост. Это объясняется тем, что при схеме М + Т + М в плакирующих слоях возникают дополнительные напряжения сжатия, а в основном слое, соответственно, растягивающие напряжения. В результате деформация мягких (плакирующих) слоев затрудняется, а деформация твердого (основного) слоя облегчается, что способствует выравниванию послойных деформаций.

При схеме Т + М + Т возникает другая картина – затрудняется деформация твердых (плакирующих) слоев в результате действия дополнительных сжимающих напряжений от трения с валками. Это приводит к росту неравномерности послойных деформаций.

С ростом коэффициентов конструкционной неоднородности неравномерность деформации уменьшается при значениях $K_м$ = 0,75...1,8 и несколько увеличивается при $K_м$ =0,25. Следовательно, при схеме М + Т + М с резко выраженной разницей в прочностных свойствах составляющих наблюдается рост неравномерности деформации с увеличением толщины плакирующего слоя.

Во всем исследованном диапазоне увеличение общего обжатия трехслойной полосы ведет к уменьшению послойной разнотолщинности – деформации наружного и внутреннего слоев выравниваются. С ростом обжатия возникающие дополнительные напряжения (растягивающие в твердом и сжимающие в мягком слое) способствуют деформации твердого слоя и затрудняют деформацию мягкого слоя. Увеличение обжатия ведет также к росту площади контактных поверхностей между соединяемыми слоями, и, соответственно, параметра очага деформации $l/H_{ср}$. В результате увеличиваются силы трения, затрудняющие межслойное скольжение и выравнивающие послойные деформации.

Другой из критериев оптимизации – степень деформации, обеспечивающая образование прочного соединения слоев. Это наиболее приемлемый для практического использования показатель, интегрирующий в себе влияние всех основных факторов на конечный результат процесса холодного плакирования.

Анализ экспериментальных данных холодного плакирования сталей различными медными сплавами с помощью технологии искусственных нейронных сетей позволяет сделать следующие выводы.

С ростом показателя конструкционной неоднородности для обеих схем укладки составляющих наблюдается повышение степени деформации $\varepsilon_{соед}$, обеспечивающей соединение слоев, причем для схемы Т + М + Т уровень требуемой деформации выше. Такой характер зависимостей следует из того, что рост показателя $K_к$ (в результате относительного увеличения толщины плакирующего слоя) требует большего обжатия для интенсивной взаимной деформации контактных слоев соединяемых металлов. Характер зависимости степени деформации соединения от исходных механических свойств составляющих подтверждает сделанные выше выводы о влиянии коэффициента $K_м$ на деформацию слоистого пакета.

С увеличением общей толщины пакета при обеих схемах укладки слоев наблюдается снижение степени деформации соединения, причем схема М + Т + М требует меньших обжатий, что связано с облегчением деформации основного (твердого) слоя и выравниванием послойных деформаций, что способствует соединению слоев.

На рис. 4.3.3 представлена модель процесса холодного плакирования при изготовлении трехслойных лент, в которой применены искусственные нейронные сети. Данная модель в качестве входных параметров использует данные о механических свойствах (пределе текучести) исходных составляющих, а также их толщинах. Модель позволяет определить степень деформации $\varepsilon_{соед}$, достаточную для соединения слоев, усилие плакирования P, показатель послойной деформации, толщины слоев и их механические свойства в готовом биметалле.

Для вычисления $\varepsilon_{соед}$ используют первую нейронную сеть ИНС1. Модуль $F1$, рассчитывающий усилие плакирования, в качестве входных параметров использует данные о толщинах и пределах текучести компонентов и степени деформации, а также данные о диаметре рабочих валков и ширине пакета.

Важным показателем процесса плакирования является послойная неравномерность деформации $\varepsilon_н/\varepsilon_в$. Контроль этого показателя дает возможность разработки технологических процессов производства слоистых композиций с заданным конечным соотношением толщин компонентов. Для расчета послойной неравномерности деформации используют вторую нейронную сеть ИНС2, построенную по результатам обобщения проведенных экспериментов.

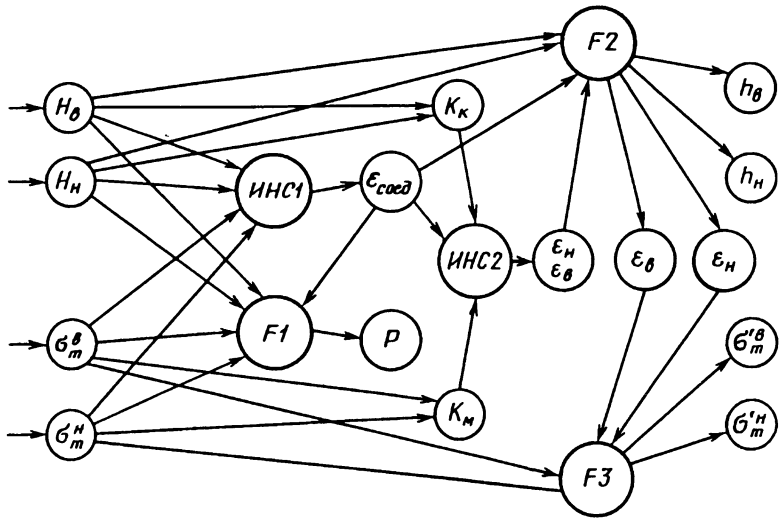


Рис. 4.3.3. Модель процесса холодного плакирования

В качестве входных параметров сеть использует степень деформации и показатели конструкционной и механической неоднородности пакета.

Модуль *F*2, используя данные о начальных толщинах компонентов, о степени деформации и о послойной неравномерности деформации, рассчитывает конечные толщины $h_в$, $h_н$ и обжатия $\varepsilon_в$, $\varepsilon_н$ компонентов.

Модуль *F*3, используя экспериментально выявленные для материалов данной композиции кривые упрочнения и данные по исходным пределам текучести компонентов, рассчитывает пределы текучести компонентов после плакирования.

Предложенную модель можно эффективно использовать при оптимизации промышленного процесса плакирования. Будучи программно реализована на ЭВМ, при функционировании в пакетном режиме она позволяет рассчитать допустимое множество технологических режимов и при использовании процедур многокритериальной оптимизации найти режимы, наиболее адекватные конкретным производственным задачам.

4.3.3. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СКМ

Прочность соединения слоев и служебные свойства слоистых композитов во многом предопределяет переходная зона и объемы металлов, прилегающих к ней.

Локальный рентгеноспектральный анализ переходной зоны (рис. 4.3.4, *а*) показал, что зона резкого изменения концентраций основных элементов после холодного плакирования составила ≈ 10 мкм. Глубина шлейфа меди в железо 4...5 мкм, а железа в медь – 5...6 мкм. В целом после холодного плакирования толщина переходной зоны составляет 7...13 мкм, при этом в сталемедных биметаллах концентрация меди в железе и железа в меди не выходит за допустимые пределы концентрации их в твердых растворах; образование промежуточных фаз не обнаружено.

Результаты исследования механических свойств и оптимальной степени деформации при плакировании некоторых биметаллов приведены в табл. 4.3.2 [21].

Режимы промежуточной термической обработки холодноплакированных биметаллов определяются исходными свойствами составляющих и требованиями к структуре готовой продукции. Проведение промежуточного отжига ниже порога рекристаллизации легкоплавкой составляющей приводит к снятию внутренних напряжений без изменения структуры холоднокатаного металла. Высокая прочность соединения слоев обеспечивается полнотой прохождения в переходной зоне диффузионных процессов, при этом повышение температуры и длительности отжига приводит к увеличению интенсивности диффузии, толщина переходной зоны возрастает до 20...30 мкм. Так, для биметалла сталь + никель при

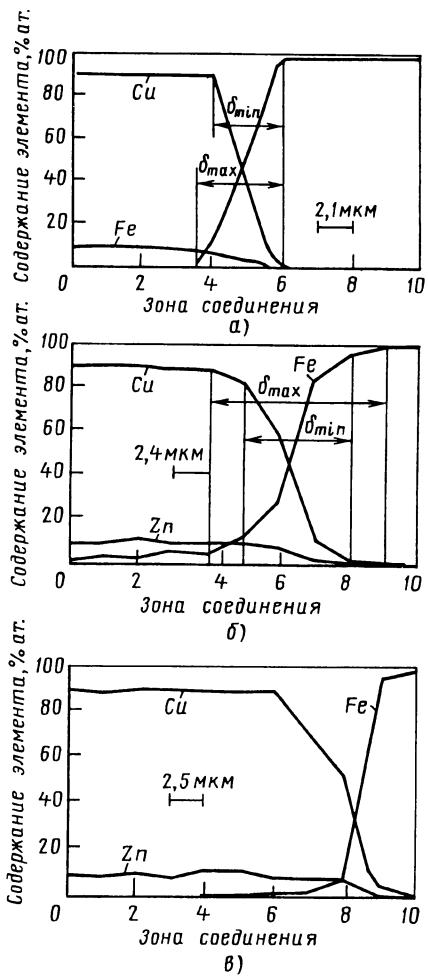


Рис. 4.3.4. Распределение элементов в переходной зоне биметалла сталь 11кп + латунь Л90 после холодного плакирования (*а*), отжига (*б*) и окончательной холодной прокатки (*в*)

толщине этой зоны 5 мкм прочность соединения слоев на срез составила 80...90 МПа, при толщине 15...20 мкм – 160...180 МПа.

Термическая обработка вызывает изменения в характере распределения основных элементов системы в переходной зоне, отчетливо наблюдается значительное расширение зоны массопереноса элементов. Количественное распределение элементов в переходной зоне показано на рис. 4.3.4, *б*.

Режимы окончательной холодной прокатки предопределяют получение необходимых размеров, формирование требуемых свойств и структуры. При окончательной прокатке формируется характерная для холоднокатаного металла структура, наблюдается сплющивание переходной зоны. Степень деформации при прокатке оказывает существенное влияние на технологические свойства биметаллов. Так, трехслойная сталеникелевая лента после прокатки с обжатием 10...20 % и отжига при 650...680 °С имела неблагоприятную для глубокой вытяжки изделий структуру составляющих – крупные зерна; при обжатии 75...80 % – повышенные упругие свойства, что также нежелательно. Прокатка со степенью деформации 40...60 % обеспечила формирование требуемой структуры – мелкое зерно феррита 7–8 балла, мелкодисперсный перлит, мелкое зерно никеля.

В процессе холодной пластической деформации изменяется и характеристика переходной зоны. В этой зоне видны микропустоты, их линейные размеры не превышают нескольких микрометров. Основной слой в результате пластической деформации также претерпевает изменения, в частности, вдоль границ зерен могут возникать микроразрывы, которые заполняются металлом плакирующего слоя. Возникающие при прокатке микроразрушения переходной зоны можно объяснить

4.3.2. Механические свойства холодноплакированных биметаллов

Биметалл	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{ср}$, МПа	ε, %
М1 + 11кп + М1	630...750	2,2...2,5	25...45	56...60
Л90 + 18кп + Л90	650...720	2,5...3,0	40...60	54...56
08кп + ЛО90-1 + 08кп	650...720	2,0...5,0	40...70	55...60
08кп + Бр ОЦ 4-3	690...780	1,0...2,0	60...90	58...62

повышенной ее твердостью. Так, у сталемедных биметаллов микротвердость переходной зоны в 2 раза выше, чем у меди, и в 1,5 раза выше, чем у стали. Распределение элементов в переходной зоне после холодной прокатки представлено на рис. 4.3.4, *в*.

Режимы окончательной термической обработки слоистых композитов определяются необходимостью получения требуемого комплекса механических, технологических свойств и микроструктуры. Отжиг сталелатунных биметаллов при 650...680 °С вызывает рекристаллизацию металлов составляющих, в стали происходит сфероидизация цементита, что благоприятно для последующей вытяжки изделий. Для сохранения упругих свойств биметаллов, используемых для изготовления вкладышей подшипников скольжения, окончательный отжиг следует проводить при 350...400 °С.

Микрорентгеноспектральный анализ переходной зоны слоистых композитов после окончательной термообработки показывает, что ее толщина превышает 30...40 мкм, в зоне соединения сохраняется характер перераспределения элементов; на рентгенограммах фиксируется характерная для рекристаллизованных металлов структура дефектов. Прочность соединения слоев у отожженных сталемедных биметаллов составляет 130...190 МПа, у сталеникелевых – 140....180 МПа. Свойства некоторых отожженных биметаллов приведены в табл. 4.3.3 [21].

4.3.4. ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОГО ПЛАКИРОВАНИЯ

Технологический процесс холодного плакирования включает следующие основные операции (рис. 4.3.5): подготовку полос основного и плакирующих слоев; совместную пластическую деформацию составляющих; промежуточную термическую обработку; окончательную холодную прокатку; окончательную термическую обработку; отделку; контроль качества; упаковку и отгрузку продукции.

4.3.3. Свойства биметаллов после окончательной термической обработки

Биметалл	Толщина, мм	Температура отжига, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %
М1 + 11кп + М1	0,5...3,5	650...700	350...420	30...34
Л90 + 18кп + Л90	0,5...3,5	640...660	385...410	29...32
08кп + ЛО90-1	1,5...2,0	650...700	360...400	32...36
08кп + БрОЦ4-3	1,5...2,0	650...680	370...390	31...35
НП-2 + 11кп + НП-2	0,3...0,5	650...680	360...380	30...32

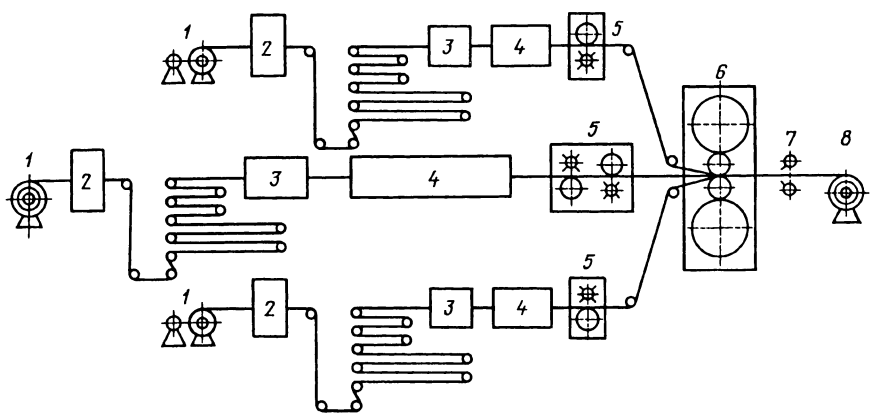


Рис. 4.3.5. Схема непрерывного процесса производства биметаллов холодным рулонным плакированием:
1 – разматыватели; *2* – стыкосварочные агрегаты; *3* – ванны обезжиривания; *4* – ванны травления, *5* – зачистные машины; *6* – стан холодного плакирования; *7* – ножницы, *8* – моталка

В качестве основного слоя холодноплакированных биметаллов обычно применяют горячекатаную углеродистую сталь. Удаление окалины, а также масляных и других загрязнений с ее поверхности осуществляется на агрегате непрерывного травления стальной ленты (АНТС), состоящем из трех основных частей – входной, технологической и выходной. Входная часть агрегата предназначена для загрузки стальных рулонов, механического разрушения окалины, резки и сварки концов рулонов. Технологическая часть служит для обезжиривания поверхности лент, травления, промывки в холодной воде, удаления травильного шлама, промывки горячей водой и сушки воздухом. На выходной части АНТС производят зачистку поверхности ленты проволочными щетками, вырезку сварного шва, сматывание ленты в рулон.

Поверхности лент плакирующего металла очищают от оксидных пленок и загрязнений путем обезжиривания, травления и сухой односторонней зачистки до металлического блеска также на агрегате непрерывного травления. Принятые ОТК рулоны основного и плакирующего металлов передают на участок холодного плакирования.

Совместную холодную пластическую деформацию составляющих осуществляют на станах плакирования кварто. В состав оборудования стана входят: загрузочное устройство, разматыватель стальной полосы, листоправильная машина, разматыватель цветной ленты верхний, загрузочное устройство левой моталки, моталка левая, рабочая клеть с приводом и устройством для перевалки, установка кромкомоталки, ножницы листовые, моталка правая, перемоточное устройство. Стан оснащен системами автоматического регулирования натяжения и скорости плакирования, а также измерителями усилия плакирования, толщины и длины полосы, другими контрольно-измерительными приборами и средствами автоматики. На стане можно выполнять реверсивную прокатку, что дает возможность использовать этот стан для окончательной холодной прокатки биметалла.

В технологическом процессе изготовления биметаллов обычно предусматривают две операции термической обработки: промежуточную (термодиффузионный отжиг) и окончательную (рекристаллизационный отжиг). Используемые для отжига биметаллов печи по режиму работы подразделяются на две группы: периодического действия (садочные) и непрерывного действия (проходные и протяжные). Из печей периодического действия для отжига листового и полосового биметалла применяют камерные печи с выдвижным подом.

Отжиг рулонного биметалла производят в одностопных и многостопных колпаковых и шахтных печах в защитной атмосфере. Режим термической обработки садки, состоящей из нескольких рулонов, должен обеспечить их нагрев до заданной температуры с заданной скоростью, определяемых требованиями к микроструктуре и свойствам биметалла.

Перспективным способом термической обработки биметаллов является отжиг в проходных печах с производительностью 50...60 т/ч. Непрерывный отжиг обеспечивает однородные механические свойства и микроструктуру составляющих, позволяет механизировать и автоматизировать производственный процесс. Его применяют в основном для отжига холодноплакированных полос толщиной менее 0,5 мм.

После термической обработки биметаллическую ленту с целью удаления оксидной пленки подвергают травлению на агрегате непрерывного травления биметалла (АНТБ) путем химического травления, промывки холодной водой, обработки капроновыми щетками, промывки горячей водой и сушки горячим воздухом.

Холодную прокатку применяют для получения готового биметалла требуемой толщины. Окончательную прокатку обычно осуществляют на реверсивных станах кварто за несколько проходов.

Холоднокатаный биметалл при необходимости подвергают окончательной термической обработке для формирования требуемых свойств и структуры. На участке отделки биметаллическую ленту разрезают на полосы нужного размера на агрегатах продольной, поперечной или комбинированной резки.

Контроль качества биметалла осуществляют в процессе перемотки на перемоточном устройстве, при этом определяют размеры полос и толщину плакирующего слоя (в случае необходимости), контролируют ультразвуковыми методами сплошность соединения, отмечая и удаляя дефектные места. Рулоны и полосы готового биметалла упаковывают и отправляют на склад готовой продукции с последующей отгрузкой потребителю.

Глава 4.4

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СКМ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ И ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКОЙ

4.4.1. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

К настоящему времени известны сотни технологических схем сварки взрывом, главным отличительным и одновременно объединяющим признаком которых является наличие разгоняющего действия продуктов детонации взрывчатого вещества (ВВ) на метаемый элемент и его косое соударение с другими (одним или несколькими) свариваемыми элементами. Однако основными (базовыми) схемами сварки СКМ плоской конфигурации, получившими наибольшее распространение, являются два варианта параллельной схемы, применяемые для сварки биметаллических и многослойных СКМ (см. рис. 4.1.4).

Применительно к этим схемам все параметры условно разделим на две группы:

1) параметры, описывающие исходные условия сварки и внешние процессы, обеспечивающие разгон и соударение свариваемых тел:

а) установочные параметры (определяются выбранной схемой процесса);

б) параметры заряда ВВ;

в) кинематические параметры (определяют конфигурацию соударения свариваемых элементов);

г) параметры свариваемых материалов;

2) параметры, описывающие внутренние (собственно сварочные) процессы и явления, протекающие в соударяющихся металлах и приводящие к их схватыванию.

В подгруппу установочных параметров, определяющих исходное взаимное расположение свариваемых пластин в пакете, отнесены установочные углы α_i (при параллельной схеме $\alpha_i = 0$) и расстояния (зазоры) h_i между пластинами, а также размеры краевых нависаний L_i метаемой пластины над неподвижной.

В подгруппе параметров заряда ВВ важнейшим является скорость детонации D заряда ВВ. Скорость детонации определяется главным образом теплотой взрыва, плотностью ВВ и составом продуктов детонации ПД.

Технологические особенности сварки взрывом выдвигают к ВВ ряд специфических требований [1, 25]:

1. Скорость детонации D должна быть меньше скорости звука в соединяемых металлах c_0 и находиться в диапазоне от 1500 м/с до c_0.

2. ВВ должны обладать необходимой стабильностью детонации и иметь достаточно малые величины $H_{кр}$.

3. Во фронте детонации должны развиваться давления $p_{ВВ}$, достаточные для обеспечения необходимых величин скоростей соударения свариваемых тел v_c (100...1500 м/с).

4. ВВ должны быть максимально безопасными в обращении, недорогими и сохранять стабильность свойств в течение времени, установленного для промышленных ВВ, а ПД и само ВВ – нетоксичными.

5. Применяемые ВВ должны обладать хорошей формуемостью, обеспечивающей возможность простого и быстрого изготовления заряда требуемых размеров и конфигурации.

В подгруппу кинематических параметров входят скорость точки контакта (или движения линии контакта соударяющихся пластин) $v_к$, скорость соударения v_c свариваемых элементов и угол соударения γ.

В подгруппу параметров свариваемых материалов входят физические, механические и химические их свойства. Плотность металла ρ, его толщина δ и скорость распространения в нем звука c_0 определяют две важные характеристики процесса: единичную массу слоя металла m_i, влияющую на характер разгона металлических пластин, и баланс энергии в системе.

При всех способах соединения в твердой фазе существенное влияние на формирование соединения оказывают механические свойства металлов. С увеличением технологической деформируемости металлов свариваемость ухудшается. Соударяющиеся поверхности перед сваркой должны предварительно тщательно зачищаться. Чистота обработки поверхности, характеризуемая показателем Rz, и чистота поверхности являются важными параметрами, влияющими на качество сварки.

Группа параметров, описывающих внутренние, собственно сварочные процессы и явления, протекающие в соударяющихся металлах и приводящих их к схватыванию, включают большое количество физических величин, определяющих энергетику процесса.

Энергетические параметры, определяя уровень и характер пластического течения, контролируют процессы активации и схватывания и позволяют управлять данным процессом [26].

Основные границы процесса сварки взрывом удобно рассматривать в координатной системе $\gamma(v_c) - v_к - \tilde{m}$ (рис. 4.4.1), что позволяет установить взаимосвязь между величиной энергии, затраченной на пластическую деформацию металла в ОШЗ (околошовной зоне) и условиями, приводящими к образованию качественных сварных соединений.

Пространство параметров, в котором возможно получение сварных соединений, на рис. 4.4.1 представлено замкнутой фигурой, рассеченной плоскостью, перпендикулярной оси $\tilde{m}$, и ограниченной снизу и сверху двумя поверхностями *adf* (нижняя граница сварки) и *kgh* (верхняя граница сварки), между которыми расположены три характерные области (*1*, *2*, *3*). Область *1* наиболее благоприятна для формирования качественных сварных соединений. Если металлы имеют близкие механические свойства, то на границе контакта композита, полученного в этой области параметров, наблюдаются синусоидальные волны. В области *2* условия пластического течения неблагоприятны для развития волнообразования, поэтому линия раздела прямолинейна, а прочность связи высока. В области *3* формируются аномальные волны (имеют малую амплитуду и большую длину), при этом сварные соединения также имеют высокую прочность. В области *4* (низкоинтенсивных режимов) получить равнопрочные соединения не удается, так как реализуемые в зоне соударения давления не обеспечивают требуемого уровня активационных процессов. Пространство параметров *5* характеризуется избыточным энерговыделением в зоне соударения слоев, вызывающим резкое разупрочнение границы их контакта. Правее области сварки расположена зона *6* (сверхзвуковых режимов), в которой существуют ударные волны и сварные соединения обычно получить не удается.

Рассмотрим энергетический баланс в системе свариваемых пластин (рис. 4.4.2). Из анализа кинематики соударения и физики исследуемого процесса расход энергии продуктов детонации ВВ $W_{вв}$ может быть записан в полном виде следующим образом:

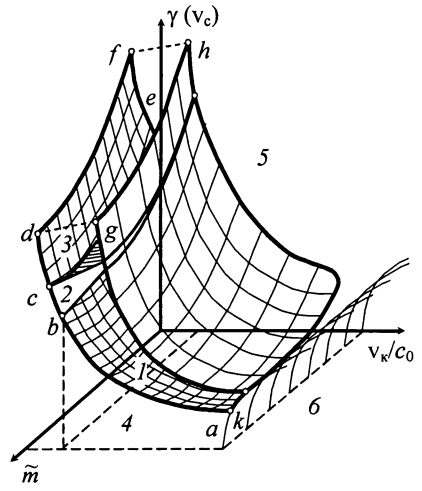


Рис. 4.4.1. Положение основных характерных областей сварки металлов взрывом:
1 – область "традиционных режимов, *2* – область безволновых режимов; *3* – область аномального волнообразования, *4* – область докритических режимов; *5* – область развитой кумуляции, *6* – область сверхзвуковых режимов

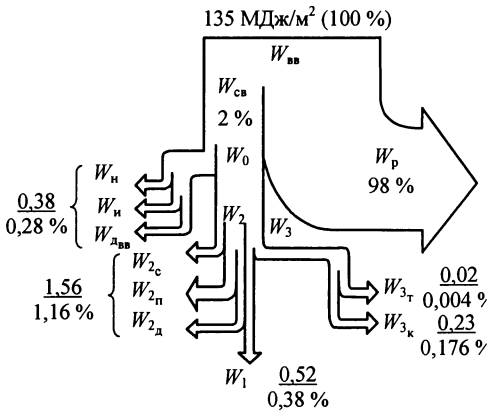


Рис. 4.4.2. Баланс энергии в системе двух соударяющихся стальных (5 + 18 мм; v_c = 350 км/с; $v_к$ = 2 км/с) пластин

$$W_{вв} = W_{св} + W_р = (W_н + W_и + W_{д_{вв}}) + W_1 + (W_{2_с} + W_{2_п} + W_{2_д}) + (W_{3_к} + W_{3_т}) + W_р,$$

где $W_{св}$ – потери энергии в сваренных пластинах; $W_р$ – энергия разлета ПД ВВ; $W_н$, $W_и$, $W_{д_{вв}}$ – энергии нагрева метаемой пластины

ПД, ее двойного пластического изгиба и диссипативные потери в ней от воздействия ПД; W_1 – кинетическая энергия системы сваренных пластин; $W_{2_п}$, $W_{2_д}$ – энергия смятия микрорельефа соударяющихся поверхностей, пластического течения в зоне соударения (сдвиг, волнообразование), диссипативные потери в ударной волне от соударения; $W_{3_к}$, $W_{3_т}$ – кинетическая и тепловая составляющие энергии кумулятивной струи.

4.4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

На рис. 4.4.3 приведена классификация технологических схем сварки взрывом СКМ различной конфигурации, которые можно разделить на следующие группы [11, 17]:

а) сварка взрывом плоских заготовок;

б) сварка взрывом коаксиальных заготовок;

в) конструкционная сварка взрывом;

г) комбинированные процессы соединения, включающие сварку взрывом в качестве одного из элементов;

д) специальные способы сварки взрывом;

е) способы инициирования и профилирования зарядов ВВ.

Наиболее употребимой в практических целях схемой сварки СКМ является плоскопараллельная (рис. 4.4.4, *а*), с помощью которой получают заготовки площадью от 1 $см^2$ до 20 $м^2$ самого различного сочетания металлов. Угловые схемы (рис. 4.4.4, *б*, *в*, *д*) обычно используются для специальных случаев, научных целей и отличаются сложным характером изменения кинематических параметров, связанным с наличием переменного зазора и ускоряющего действия ПД заряда ВВ на метаемую пластину вдоль свариваемой заготовки.

Многослойные СКМ получают тремя принципиальными методами: с помощью одновременной схемы одним (рис. 4.4.4, *г*, *д*) или двумя симметрично расположенными зарядами ВВ (рис. 4.4.4, *з*, *и*).

Сварку взрывом коаксиальных биметаллических и многослойных заготовок реализуют использованием наружного или внутреннего (для трубных СКМ) зарядов ВВ (рис. 4.4.5). Схемы сварки взрывом с использованием наружного заряда более предпочтительны из-за своей простоты и меньшей остаточной деформации получаемой заготовки. В этом случае при сварке трубных заготовок внутренний объем сборки заполняют либо несжимаемой водой (рис. 4.4.5, *б*, *г*), либо водой в сочетании с металлическим сердечником (рис. 4.4.5, *в*). Характерной особенностью при работе с подобными схемами является применение направляющего, как правило, металлического конуса *4* с углом у вершины 60...120°. Заряд обычно порошкообразного ВВ формируется в картонном контейнере в вертикальном положении сборки, в верхней части которого строго симметрично устанавливается детонатор *5*.

Значительно более сложны в практическом использовании схемы изготовления коаксиальных заготовок с внутренним расположением заряда ВВ (рис. 4.4.5, II). Плакирование внутренних поверхностей обычно осуществляют в случаях, когда внутренняя труба значительно тоньше наружной (рис. 4.4.5, *д* – *з*). Обычно применяют либо цилиндрические (рис. 4.4.5, *ж*, *з*), либо кольцевые заряды ВВ в водонепроницаемых картонных оболочках.

В отличие от рассмотренных выше схем группа комбинированных процессов получения СКМ (см. рис. 4.4.3) характеризуется технологическим циклом из двух или нескольких операций. В простейшем варианте такой цикл включает комбинацию сварки взрывом обычной биметаллической заготовки и ее последующей прокатки.

Теплообменные панели из одно- и разнородных металлов с помощью комбинированных технологий сварки взрывом можно получать двумя вариантами. По первому на неподвижную пластину наносят требуемой конфигурации противосварочную пасту, в то время как по второму варианту в неподвижной пластине выполняются каналы, заполняемые перед сваркой легкоплавким материалом. Затем осуществляется плакирование подготовленных поверхностей слоем металла по плоскопараллельной схеме, после чего в первом случае панель раздувается, а во втором – легкоплавкий наполнитель выплавляется.

Физические особенности процесса формирования соединения при высокоскоростном соударении слоев металла определили следующие основные технологические возможности сварки взрывом (рис. 4.4.6).

Основными отраслями промышленности, в которых применяются плоские композиционные заготовки, являются нефтехимическое аппаратостроение и атомное энергомашино-

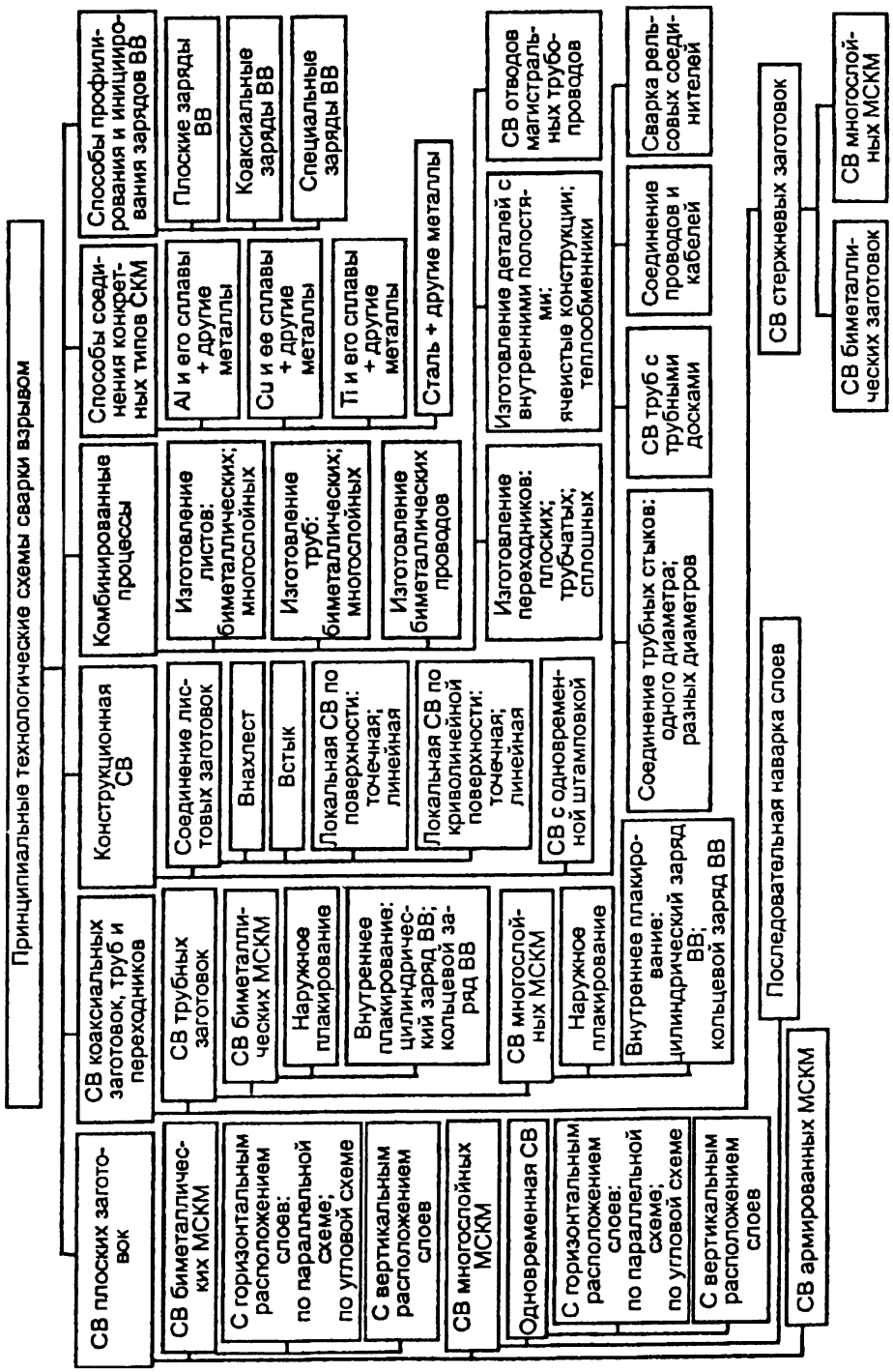


Рис. 4.4.3. Классификация основных технологических схем сварки взрывом СКМ

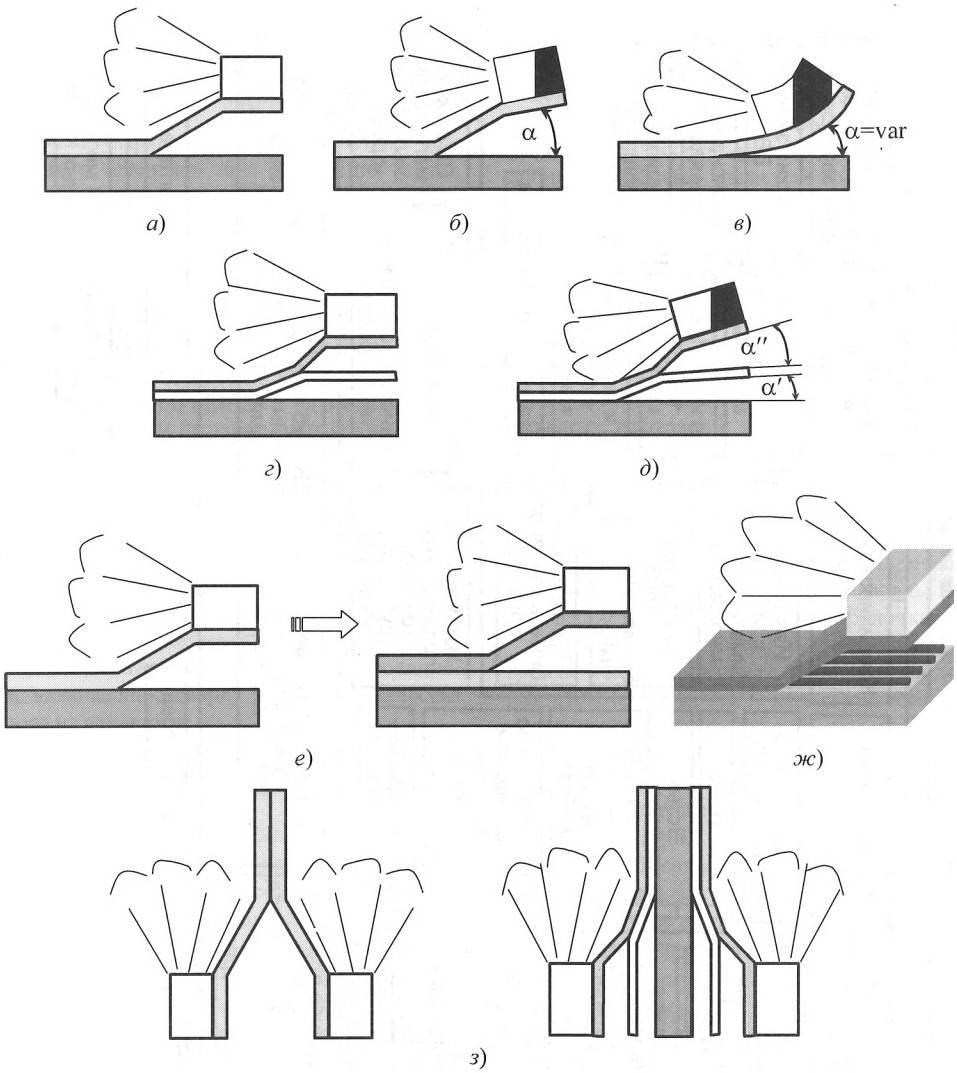


Рис. 4.4.4. Основные технологические схемы изготовления сваркой взрывом плоских биметаллических и многослойных СКМ

строение, где из сваренных взрывом биметаллических листов и плит изготовляют корпуса сосудов, емкостей, колонн и т.п., а также трубные доски теплообменного оборудования.

В энергетике и электрометаллургии в последнее время широкое применение находят двух- и трехслойные переходные элементы различной конструкции, служащие для надежного соединения разнородных участков силовых токоведущих цепей. Изготовленные сваркой взрывом с последующей холодной прокаткой заготовок, такие детали характеризуются прочноплотным соединением составляющих слоев с близким к нулю переходным электросопротивлением, отсутствием межслойной электрокоррозии в процессе эксплуатации и высокой чистотой контактирующих поверхностей.

Наряду с плоскими биметаллическими и многослойными элементами сваркой взрывом можно изготовлять цилиндрические композиционные заготовки как сплошного сечения (стержни), так и пустотелые (трубы), причем в последнем случае плакирование возможно как снаружи, так и изнутри трубы.

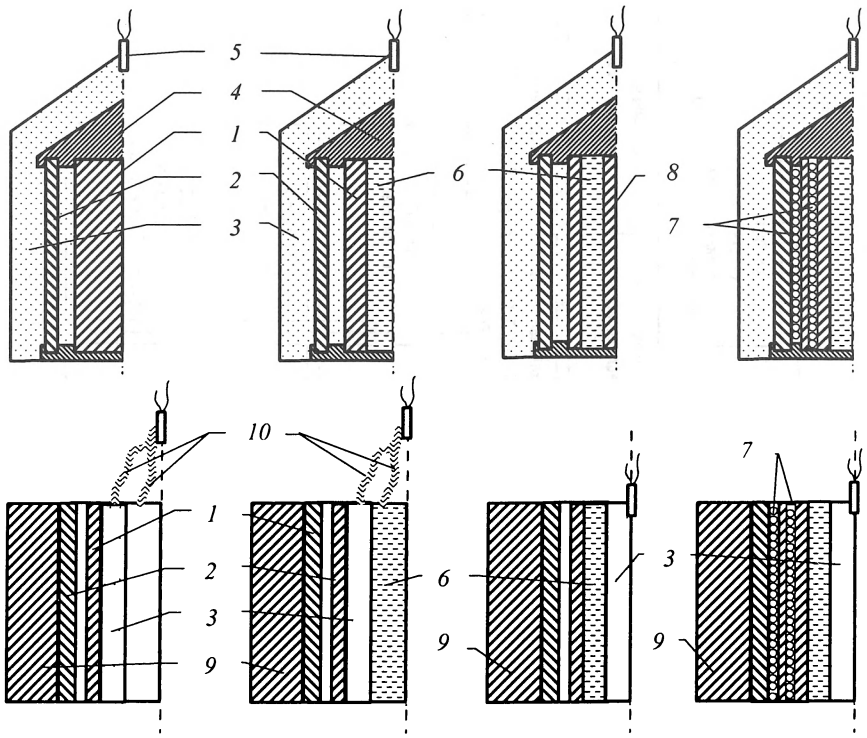


Рис. 4.4.5. Основные технологические схемы изготовления коаксиальных заготовок сплошного сечения (*а*) и трубных (*б*):
1, *2* – свариваемые элементы, 3 – заряд ВВ, *4* – направляющий конус; *5* – детонатор, 6 – вода, *7* – арматура, *8* – внутренний стержень, *9* – разъемная опора; *10* – пучок детонирующих шнуров

Композиционные слоистые стержни и трубы могут использоваться как заготовки под последуюшие волочение или прокатку (биметаллическая проволока, трубы и т.п.), а также для изготовления цилиндрических переходных элементов, служащих для надежного соединения участков трубопроводов различной аппаратуры (нефтехимической, энергетической, аэрокосмической и др.), выполненных из разнородных металлов и сплавов, с помощью традиционных методов сварки плавлением.

4.4.3. ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ

Диффузионная сварка в вакууме – один из способов соединения материалов сваркой давлением. Согласно определению Международного института сварки "диффузионная сварка материалов в твердом состоянии – это способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов" [6].

Основные параметры процесса диффузионной сварки – температура, давление, время (продолжительность) сварки.

Нагрев заготовок перед сваркой осуществляют в вакуумных или газовых печах, а также индукционным, радиационным, дуговым, плазменным, комбинированным и другими способами. Диффузионную сварку обычно выполняют в вакууме $10^{-1}...10^{-3}$ Па, иногда в средах контролируемого состава (аргон, гелий, водород, различные газовые смеси). Температура нагрева для соединяемых материалов обычно составляет 0,5...0,7 температуры плавления наиболее легкоплавкого материала в слоистой композиции. Нагрев заготовок облегчает пластическую деформацию приконтактных поверхностей и ускоряет взаимную диффузию элементов в зоне соединения.

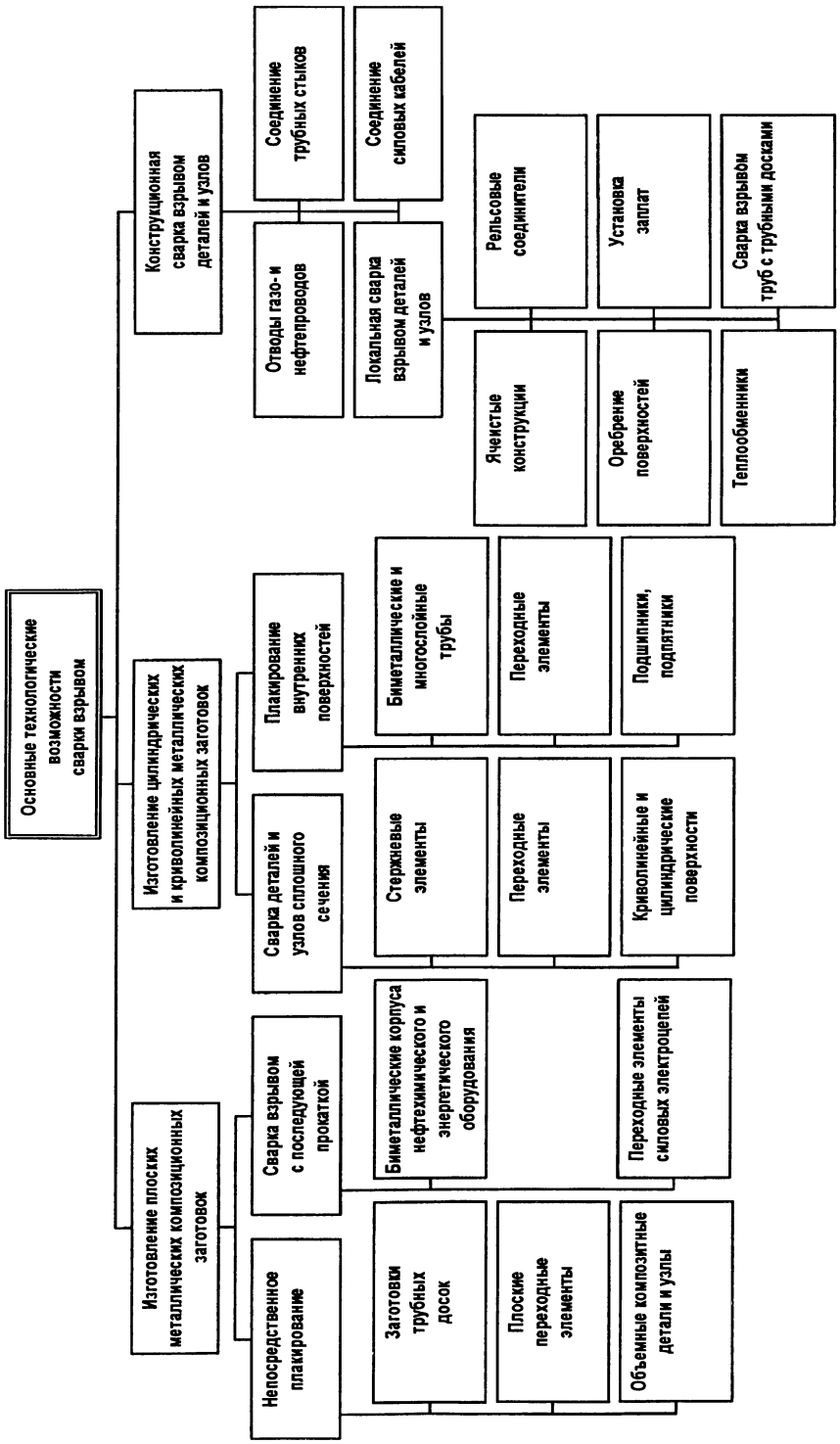


Рис. 4.4.6. Области применения сварки взрывом

Давление сжатия обеспечивает плотный контакт соединяемых поверхностей, способствует разрушению имеющихся на контактной поверхности оксидов, активирует соединяемые поверхности. При сварке в вакууме или в средах контролируемого состава окисленный поверхностный слой на заготовках практически отсутствует. Для создания плотного контакта слоев прилагаемое давление должно обеспечить смятие микронеровностей, микропластическую деформацию контактных поверхностей, что способствует прохождению взаимной диффузии элементов.

Ориентировочно оптимальное значение давления, обеспечивающее получение качественного соединения однородных металлов, равно пределу упругопластической деформации свариваемых материалов. При сварке разнородных материалов давление устанавливают в зависимости от механических характеристик менее прочного из соединяемых материалов.

Если сварке подлежат достаточно пластичные металлы (медь, алюминий, свинец и др.), то их контактные поверхности обрабатывают до шероховатости Rz = 40...80 мкм. Если нужно соединить достаточно твердые материалы, в том числе тугоплавкие, жаропрочные, коррозионностойкие металлы, неметаллические материалы – их контактные поверхности обрабатывают до шероховатости $Ra = 2{,}5$ мкм и выше.

Продолжительность процесса диффузионной сварки при заданных температуре и давлении должно быть минимальным, но достаточным для обеспечения плотного контакта и протекания диффузионных процессов в околошовной зоне. Особое внимание при назначении температуры и продолжительности процесса следует обратить при соединении металлов, образующих при взаимодействии легкоплавкие эвтектики и интерметаллидные соединения.

Анализ кинетики диффузионной сварки металлов показывает [7], что это трехстадийный процесс, включающий очистку контактных поверхностей, образование физического контакта и химическое взаимодействие. При этом последняя стадия у металлов протекает быстро и в общем балансе продолжительности сварки не имеет существенного значения, а роль первой стадии зависит в основном от толщины и свойств оксидных пленок. В практике сварки большинства металлов время сварки определяется продолжительностью второй стадии, характеризующейся одновременно протекающими процессами ползучести и спекания.

В условиях диффузионной сварки разнородных металлов выравнивание контактной поверхности и образование физического контакта при преобладающем значении процесса ползучести будет определяться соотношением механических свойств этих металлов и в первую очередь их сопротивлением ползучести. Если при сварке преобладает процесс спекания, то кинетика образования физического контакта может зависеть не только от механических свойств соединяемых металлов, но и от их природы. Так, способность соединяемых металлов к образованию твердых растворов облегчает их сварку.

Продолжительность сварки

$$\tau = \tau_{ф} + \tau_{х},$$

где $\tau_{ф}$ – время на сглаживание микронеровностей; $\tau_{х}$ – длительность активации поверхности.

В табл. 4.4.1 [2] приведены опытные и расчетные данные по длительности диффузионной сварки некоторых металлов и неметаллических материалов.

Видно, что при сварке неметаллов время $\tau_{х}$ велико, оно определяет общую продолжительность процесса. Для диффузионной сварки металлов $\tau_{х} \leq \tau_{ф}$, поэтому определяющим фактором в кинетике процесса является сглаживание поверхности.

Для диффузионной сварки разнородных металлов характерны три вида кинетической зависимости $\sigma_{св} = f(\tau)$. При незначительном различии их физико-механических свойств, как и в случае сварки однородных металлов, прочность соединения слоев изменяется монотонно от начального значения до некоторой установившейся величины. Резкое различие свойств соединяемых металлов может привести к появлению первого перегиба на кривой, что связано с образованием активных центров на контактных поверхностях. С увеличением площади контакта при данном давлении деформируется в основном только более пластичный металл (пологий участок кривой). При достаточно высокой температуре проявляются процессы термической активации сближенных поверхностей, заканчивается образование соединения (второй перегиб на кривой).

4.4.1. Параметры диффузионной сварки в вакууме некоторых материалов

Соединяемые материалы	Параметры диффузионной сварки			Расчетные значения, с	
	t, °С	p, МПа	τ, с	$\tau_ф$	$\tau_х$
Медь М1 + М1	850	7	1200	1000	0,005...65
Никель НП1 + НП1	1000	15	600	500	0,07...17
Никелевый сплав ВН1 + ВН1	1200	20	900	1000	–
Молибденовый сплав ВМ2 + ВМ2	1500	20	900	1150	–
Никель НП1 + керамика А995	1300	15	6600	3,7	6600...21600
Медь М1 + керамика 22ХС	1000	16	800	0,9	670...4200

4.4.4. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ

Диффузионную сварку материалов осуществляют в специальных установках (рис. 4.4.7). Свариваемые заготовки *2* помещают в вакуумную камеру *1*, в которой вакуумной системой *3* создается определенное разрежение, нагрев заготовок осуществляется, например, в индукторе *4* высокочастотным генератором *5*. Усилие на соединяемые заготовки передается штоком *7* от гидравлической системы *6*. После сварки биметаллические соединения охлаждаются в вакууме до соответствующей температуры.

В настоящее время разработаны и созданы различные типы сварочных диффузионных вакуумных установок, стационарных и передвижных, которые классифицируют по следующим признакам:

по назначению: универсальные, специализированные, для индивидуального, серийного и массового производства;

по способу передачи давления: механические, гидравлические, пневматические, с термическим натягом;

по конструктивному исполнению: однокамерные, двухкамерные, многокамерные (роторные), однопозиционные, многопозиционные, шлюзованные, одноместные, многоместные, с глубоким вакуумом, с местным или частичным вакуумом;

по степени разрежения в рабочей камере: с низким (до $1{,}3 \cdot 10^{-1}$ Па), средним (до $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Па), высоким вакуумом (свыше $1{,}3 \cdot 10^{-3}$ Па), установки со средой контролируемого состава;

по способу управления: ручные, полуавтоматические, автоматические;

по способу нагрева: индукционные, контактные, радиационные, электронно-лучевые, терморадиационные, с тлеющим разрядом, комбинированные;

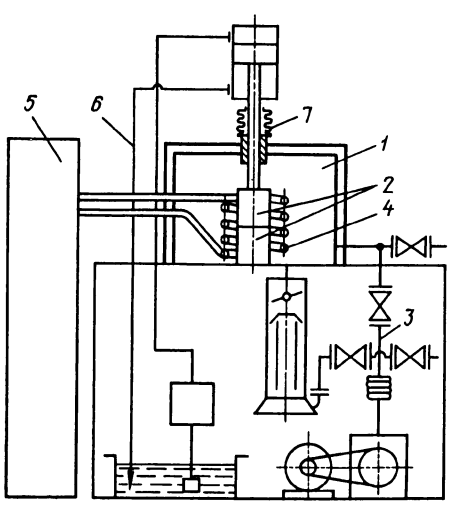


Рис. 4.4.7. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки

по интенсификации процессов нагрева и диффузии: с наложением ультразвуковых колебаний, с наложением электрических колебаний.

Выбор той или иной конструкции установки для диффузионной сварки определяется, в основном, физико-механическими свойствами и размерами соединяемых материалов, производительностью процесса и другими факторами.

На рис. 4.4.8 приведена схема устройства для диффузионной сварки биметаллической ленты. Исходные ленты *1* и *2* из разнородных металлов размещают на моталках, снабженных специальными механизмами для натяжения лент. При включении барабана намотки 6 ленты начинают перемещаться, нагреваются в индукторе *3* и огибают ролик *4*, где и осуществляется их соединение. Натяжение P_1 ленты *1* меньше натяжения P_2 ленты *2*, в результате этого при огибании ролика *4* лента *2* давит на ленту *1* с силой, достаточной для осуществления сварки контактных поверхностей, при этом на дуге обхвата линейные скорости перемещения лент одинаковы. Полученная биметаллическая лента охлаждается на ролике *5* и наматывается на барабан *6*. Если лентой *2* не удается обеспечить необходимое усилие сжатия на ролике *4*, последнее можно создать технологической лентой *7*, имеющей больший запас прочности.

Диффузионной сваркой соединяют между собой однородные и разнородные металлы и сплавы, в том числе редкие, тугоплавкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие, драгоценные и другие металлы и неметаллические материалы, в том числе стекло, керамику и металлокерамику, ферриты, графиты, полупроводники и т.д.

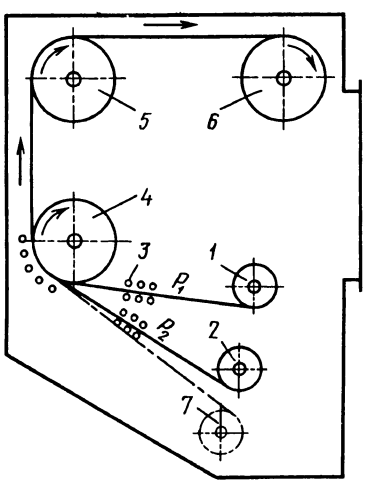


Рис. 4.4.8. Принципиальная схема установки для производства биметаллической ленты

Технология диффузионной сварки должна удовлетворять следующим условиям: поверхности соединяемых материалов должны быть очищены, обеспечен их непосредственный контакт, защитная атмосфера должна предотвращать окисление или загрязнение материалов, температура нагрева должна обеспечить прохождение диффузии элементов в зоне соединения за требуемый промежуток времени.

Исследование влияния способов подготовки контактных поверхностей (обработка черновым и получистовым точением, шлифованием и полированием) на прочность соединения слоев при диффузионной сварке показало [6], что образование более гладкого рельефа поверхности повышает прочность сварки на 15...20 %. Предварительное удаление с поверхности металла загрязнений, а также оксидных и адсорбированных пленок также улучшает качество сварки.

Существенное влияние на получение качественного соединения оказывают основные технологические параметры диффузионной сварки.

Видно (рис. 4.4.9), что с повышением температуры нагрева прочность сварного соединения возрастает, при этом интенсивность повышения температуры с ростом давления сжатия снижается. При назначении рациональной температуры нагрева следует учитывать, что при низких температурах и малой

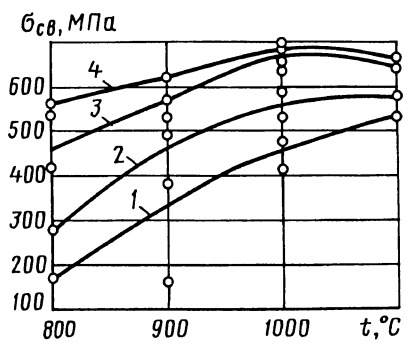


Рис. 4.4.9. Зависимость прочности сварного соединения от температуры и давления *p*, МПа
(*1* – 4,9, *2* – 9,8; *3* – 19,6; *4* – 49)
при τ = 300 с, разрежении $p_в$ = 0,13 Па

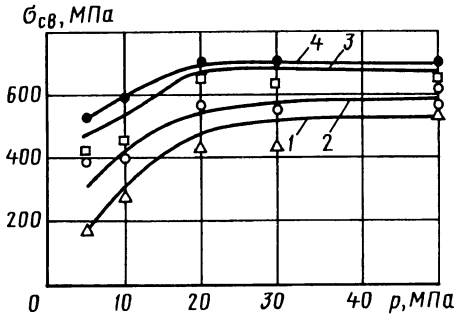


Рис. 4.4.10. Зависимость прочности сварного соединения от давления и температуры *t*, °С
(*1* – 800, *2* – 900, *3* – 1000, *4* – 1100)
при τ = 300 с, разрежении *p* = 0,13 МПа

скорости диффузии соединение часто оказывается некачественным, а чрезмерно повышенная температура, хотя и ускоряет протекание диффузионных процессов, при сварке металлов, образующих при взаимодействии химические соединения, может способствовать образованию хрупких интерметаллидных прослоек, значительно ухудшающих качество сварного шва.

Увеличение давления сжатия до 20 МПа (рис. 4.4.10) также приводит к возрастанию прочности соединения слоев составляющих. Дальнейшее увеличение давления незначительно сказывается на прочности сварки, что объясняется увеличением площади фактического контакта между соединяемыми поверхностями при сжатии.

При увеличении продолжительности сварки до определенного предела прочность сварного шва возрастает. Чрезмерное увеличение выдержки может иногда даже снизить прочность соединения слоев из-за роста зерен в околошовной зоне.

Анализ влияния степени разрежения в вакуумной камере на прочность соединения показывает, что рост величины $\sigma_{св}$ при разных температурах наблюдается только до определенного предела. При этом следует учесть, что при повышении температуры сварки усиливается газовыделение из стенок и деталей камеры, что отрицательно сказывается на качестве соединения.

Особенности диффузионной сварки разнородных металлов и сплавов заключаются в том, что они различаются физико-химическими и механическими свойствами, которые определяют взаимодействие металлов как между собой, так и с вновь образующимися соединениями. Во многих случаях образование надежного соединения разнородных металлов возможно только через промежуточные прослойки между ними, которые наносятся гальваническим или химическим способом, газотермическим напылением, а также применяются в виде фольги. Прослойки между составляющими могут быть многослойными.

Некоторые рациональные режимы процесса диффузионной сварки разнородных металлов и сплавов приведены в табл. 4.4.2.

4.4.2. Режимы диффузионной сварки биметаллов

Биметаллы	Параметры сварки			Прочность соединения, МПа
	p, МПа	*t*, °С	τ, мин	
М1 + АМг6	7,0	540	25	140
М1 + АОО	10,0	610	10	–
АД1 + Ni + Cu + сталь 15	12,3	550	2	–
ВТ1-0 + А5	12,0	550	10	188
ВТ1-0 + А5 + АМг6	14,7	590	10	230
Ниобий + А5	14,7	580	10	180
Молибден + А5	14,7	580	10	85

Продолжение табл. 4.4.2

Биметаллы	Параметры сварки			Прочность соединения, МПа
	p, МПа	t, °С	τ, мин	
М1 + НП1	14,7	900	20	–
Сталь 20 + Л59	1,0	850	20	–
20ХНР + БрОЦС 5-5-5	4,9	820	10	
НП1 + ВТ1-0	9,8	700	10	–
Платина + НП1	3,5	900	15	280
М1 + серебро 999,9	2,5	750	15	130

Глава 4.5

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СКМ

4.5.1. СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

Технология дальнейшей обработки предварительно соединенных слоистых заготовок, как правило, включает в себя как технологические нагревы перед различными способами горячей обработки давлением (ковкой, прокаткой, прессованием и др.), так и термическую обработку (отжиг, нормализацию, закалку, отпуск и др.).

При выборе рациональных режимов термической обработки необходимо учитывать следующие особенности, присущие слоистым композиционным материалам [1, 29]:

1. Особенности способа соединения слоев композита, во многом определяющего как свойства и структуру составляющих, так и характер, структуру и размеры переходной зоны.

2. Различия в физико-химических и механических свойствах составляющих композиционного материала, например, в температурах их плавления и рекристаллизации. При этом нагрев композита в оптимальной области температур для одной составляющей может привести для другой, более легкоплавкой составляющей, либо к ее оплавлению, либо к значительному ухудшению микроструктуры вследствие перегрева или пережога.

3. Диффузионные процессы, происходящие при нагреве композита на границе раздела слоев, могут приводить к появлению хрупких интерметаллидных прослоек, к изменению химического состава составляющих вблизи переходной зоны из-за миграции элементов. Образование сплошной интерметаллидной прослойки может при последующей горячей или холодной пластической деформации привести к резкому снижению прочности соединения, а в некоторых случаях и к его разрушению.

4. Различие в термических коэффициентах линейного расширения составляющих композита, что вызывает при нагреве появление на границе раздела слоев дополнительных напряжений, которые могут привести к короблению многослойной заготовки или к нарушению сплошности сварного соединения.

Рассмотрим строение и свойства сварных соединений однородных и разнородных металлов, которые условно можно разделить на следующие группы: соединения разнородных сталей; соединения металлов, не взаимодействующих между собой; соединения металлов, образующих между собой твердые растворы; соединения металлов, образующих между собой химические соединения.

В промышленности наибольшее применение нашли биметаллы типа углеродистая сталь + коррозионно-стойкая сталь, изготовляемые литейным плакированием и наплавкой, горячей пакетной прокаткой или сваркой взрывом. Достаточно близкие температуры плавления и рекристаллизации составляющих этих композитов облегчают выбор рациональ-

ных температурных интервалов нагрева и термической обработки.

При термической обработке в сварных соединениях сталей с различным содержанием углерода и карбидообразующих элементов происходят диффузионные процессы, связанные с перемещением углерода в слои с меньшим его содержанием. В таких композитах диффузия углерода из твердого слоя в мягкий начинается уже при 500 °С. При этом на скорость диффузии влияют, в основном, содержание углерода в составляющих, наличие в стали карбидообразующих элементов.

Миграция углерода в плакирующий слой коррозионно-стойкой стали приводит к изменению механических свойств биметалла (повышению твердости, предела упругости и снижению пластичности и вязкости), а также к снижению коррозионной стойкости вследствие образования карбидов хрома.

В сварных соединениях низкоуглеродистых и перлитных сталей при нагреве выше 600 °С происходит насыщение углеродом феррита низкоуглеродистой стали, что приводит к увеличению твердости в ее околошовной зоне и образованию цементита на деформированных участках феррита.

В биметаллах углеродистая сталь + стали ферритного класса при нагреве углеродистая сталь обезуглероживается вблизи границы соединения, приобретая ферритную структуру, а в ферритных сталях образуется слой карбидов типа $(CrFe)_{23}C_6$. Наиболее интенсивно этот процесс протекает вблизи точки перлитного превращения. При нагреве сварного соединения выше точки A_{C3} диффузия углерода уменьшается, так как сталь приобретает аустенитную структуру, которая ограничивает подвижность углерода. Прочность сварного соединения в околошовной зоне уменьшается на 10...15 %, а биметалл разрушается по обезуглероженному слою.

В сварных соединениях углеродистых сталей с аустенитными нагрев выше 600 °С приводит к уменьшению прочности соединения слоев до уровня прочности низкоуглеродистой стали в исходном состоянии за счет разупрочнения металла в зоне термического влияния и интенсивного обезуглероживания (рис. 4.5.1). Увеличение температуры обработки вызывает в хромоникелевых сталях интенсификацию диффузии хрома и никеля. В случае нормализации биметалла обнаруживается промежуточный слой аустенита, обедненного карбидами. Этот слой образуется в результате диффузии хрома и никеля в перлитную сталь из аустенитной, сопровождаемой некоторой обратной диффузией углерода, так как при температуре нормализации обе стали имеют аустенитную структуру.

При аустенизации интенсивная диффузия хрома, никеля и углерода из аустенитной стали приводит к значительному обеднению аустенита легирующими элементами: он становится магнитным. Аустенитная структура превращается в аустенитно-мартенситную, которая после отпуска становится аустенитно-ферритной. Эти же процессы приводят к образованию карбидной прослойки теперь уже в перлитной стали вследствие местного обогащения феррита хромом и никелем (рис. 4.5.2).

Для плакированных взрывом стальных композитов могут применяться низкотемпературная (отжиг для снятия внутренних напряжений) или высокотемпературная (нормализация или закалка с отпуском для получения требуемых механических свойств основного металла) термическая обработка. Если плакированная сталь в дальнейшем используется для изготовления изделий глубокой вытяжкой, то для повышения пластичности перед высокотемпературной обработкой обычно проводят аустенизацию.

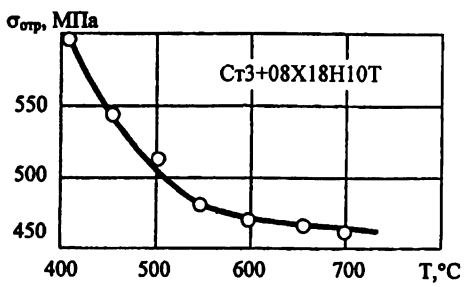
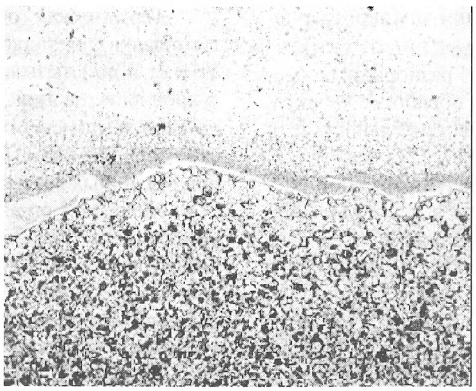


Рис. 4.5.1. Снижение прочности сварного соединения углеродистой стали Ст3 с аустенитной сталью 08Х18Н10Т в зависимости от температуры термообработки



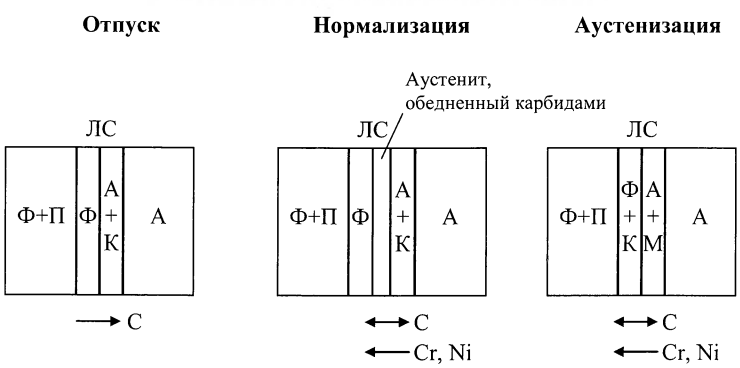


Рис. 4.5.2. Карбидная прослойка в стали 12Х18Н10Т в соединении со сталью Ст3 после нагрева до 700 °С и схема формирования структуры в сварных соединениях разнородных сталей при их термообработке:
Ф – феррит, П – перлит: А – аустенит, К – карбиды; М – мартенсит; ЛС – линия соединения

4.5.2. СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ, НЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МЕЖДУ СОБОЙ, ОБРАЗУЮЩИХ МЕЖДУ СОБОЙ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ И ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Металлы, практически не имеющие взаимной растворимости и не взаимодействующие между собой, например Pb + Fe, Ag + Fe, Ag + Mo и другие, в большинстве случаев можно соединить только сваркой взрывом [5].

При сварке взрывом железа с серебром в зоне соединения наблюдаются участки механической смеси обоих металлов различной дисперсности. Размер зоны перемешивания зависит от параметров сварки взрывом. Сварные соединения между этими металлами имеют достаточно высокую прочность и характеризуются наличием металлической связи.

В результате нагрева биметалла сталь + + серебро происходит снижение прочности соединения слоев. При нагреве выше 300 °С обнаружены строчки оксидов железа, располагающихся в серебре вблизи границы раздела. После нагрева до 800 °С и выдержки 2 ч в зоне соединения образуются оксиды серого и темного цвета микротвердостью соответственно 3800...4200 и 2800...3700 МПа. Локальный микрорентгеноспектральный анализ переходной зоны показал, что содержание железа в оксиде составляет 75...80 %. С повышением температуры и длительности нагрева количество образовавшихся оксидов увеличивается и достигает максимума при 850 °С. Наличие хрупких оксидов железа в зоне соединения снижает прочность соединения слоев. Оксиды значительно тверже серебра и стали и, являясь концентраторами напряжений, могут стать зародышами трещин и расслоений.

При нагреве сваренного взрывом биметалла коррозионно-стойкая сталь + серебро до 800 °С наличие окислов в зоне соединения не обнаружено. При температуре 850 °С и выше в околошовной зоне образовалась хрупкая про-

слойка толщиной 10...20 мкм и микротвердостью 770...1250 МПа.

Сварные соединения разнородных металлов при их термической обработке характеризуются повышенной чувствительностью к диффузионным процессам [17, 22].

Металлы, обладающие непрерывной растворимостью элементов друг в друге (Ti + Nb, V + Ta, V + Nb и др.), образуют при нагреве ряд твердых растворов, которые в зависимости от химического состава имеют различную твердость, обычно превышающие твердость соединяемых металлов в исходном состоянии.

В сварных соединениях этих металлов нагрев, как правило, не влияет или слабо влияет на прочность биметалла. Вначале происходит разупрочнение металла, а затем на границе развивается химическая неоднородность в виде слоев твердых растворов переменного состава, которые обладают достаточно высокой прочностью и пластичностью.

В сварных соединениях металлов с ограниченной взаимной растворимостью, но не образующих интерметаллических фаз (Nb + Cu, Fe +Cu, Cu + V, Ag + Cu), нагревы не представляют особой опасности. В зоне контакта слоев формируются тонкие, практически не просматривающиеся, диффузионные зоны. Прочность сварного соединения при этом несколько уменьшается за счет разупрочнения металлов.

Термическая обработка соединений из тугоплавких металлов (Nb + Ta, Nb + Mo, Ti + Zr и др.) вызывает в переходной зоне разупрочнение, а при повышении температуры до 1000 °С появляются структурные и химические неоднородности в виде твердых растворов различных составов.

Металлы с ограниченной взаимной растворимостью и небольшим различием физико-химических свойств (Ti + Al, Ti + Ag) в процессе нагрева образуют в зоне соединения твердые растворы с интерметаллическими соединениями небольшой твердости (до 1300...1700 МПа).

В сварных соединениях металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью и образующих химические соединения (Ti + Fe, Ti + Cu, Nb + Fe, Zr +Fe, Al + Fe и др.), нагрев резко изменяет свойства соединения [17, 22]. При температурах интенсивной подвижности атомов в результате взаимной диффузии на границе раздела металлов образуется слой интерметаллидов, в большинстве случаев представляющих собой хрупкие и очень твердые соединения, уменьшающие прочность композитов. Начало зарождения интерметаллической фазы определяется температурно-временными условиями обработки биметалла. Безопасные температуры нагрева таких сварных соединений расположены ниже кривых температурно-временных зависимостей образования интерметаллидов (рис. 4.5.3).

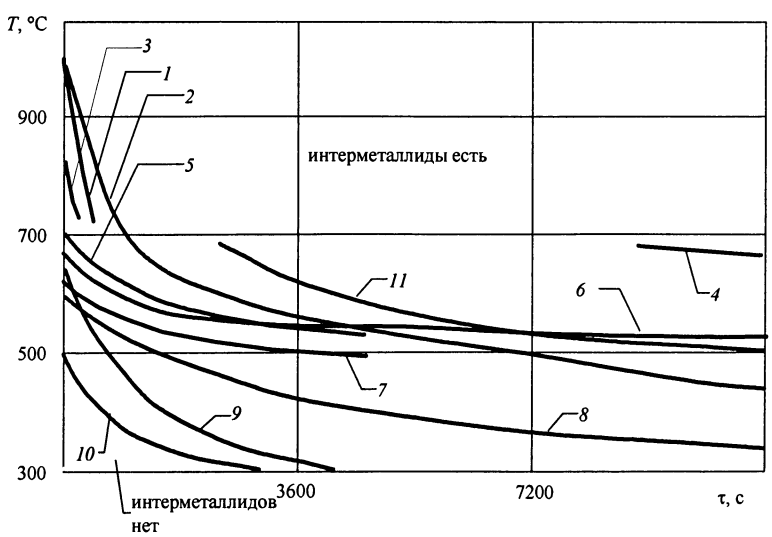


Рис. 4.5.3. Температурно-временные условия образования интерметаллической прослойки в сварных соединениях различных металлов:

1 – ВТ6С + Ст3; *2* – ВТ1-0 + 08Х18Н10Т; *3* – Ti + Al; *4* – ВТ6 + Al; *5* – Fe + Al, *6* – Х18Н10Т + Al; *7* – 12Х18Н10Т + Al; *8* – Al + Ni; *9* – ВТ1-0 + Cu, *10* – Cu + Al; *11* – АД1 + ВТ1-0

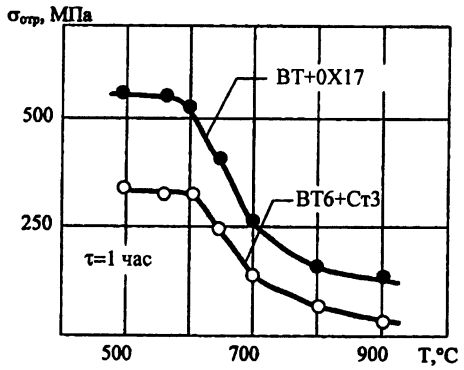


Рис. 4.5.4. Разупрочнение титаностальных сварных соединений при нагревах

Ситуация дополнительно осложняется при переходе от чистых металлов к сплавам. Так, при термической обработке сварного соединения титана со сталями на диффузионные процессы дополнительно влияет химический состав сталей. При температурах свыше 600 °С в титан из стали начинает мигрировать углерод, диффузионная подвижность которого в $10^4...10^6$ раз выше, чем у других элементов. Этот процесс несколько уменьшает прочность сварного соединения, интенсивность падения которой увеличивается с ростом содержания углерода в стали (рис. 4.5.4). При температуре свыше 700 °С в зоне соединения биметаллов развивается взаимная диффузия других элементов. При этом хром заметно уменьшает скорость диффузии железа в титан, а титан и никель, содержащиеся в стали, способствуют ее возрастанию.

В околошовной зоне сварного соединения титана со сталью образуются несколько диффузионных зон (прослоек) различной толщины, обладающих отличными от основных металлов свойствами. Со стороны титана прослойки представляют собой β-твердый раствор титана различной легированности, который после нагрева до 1000 °С в течение 1 ч имеет микротвердость 5000...6000 МПа. Между β-твердым раствором титана и сталью располагается сплошная интерметаллическая прослойка, состоящая из TiFe и $TiFe_2$ и имеющая твердость НВ, равную 9500...12000 МПа. Разрушение сварных соединений происходит по интерметаллической прослойке с низкой прочностью.

4.5.3. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Слоистые композиционные материалы характеризуются сплошностью соединения и его достаточной прочностью, технологичностью, коррозионной стойкостью, сопротивлением усталости при статических и динамических нагрузках, работоспособностью при повышенных температурах и давлениях, заданными геометрическими параметрами, физико-химическими и механическими свойствами и структурой [12, 17].

Выбор определенного сочетания составляющих для получения композита с заданными свойствами можно проводить на основе правила смесей, справедливого для таких характеристик биметаллов, как модуль упругости и временное сопротивление разрыву.

Объем и методы испытаний СКМ обычно нормируются соответствующими стандартами. При оценке качества используют механический, физико-химический и металлофизический подходы.

Механические испытания при статических и динамических нагружениях позволяют определить прочность и пластичность слоев и композиции в целом, влияние плакирующих слоев на сопротивление деформации и разрушению материала. Размеры и форма образцов при этом, как правило, стандартизованы.

Физико-химический подход применяют при существенном влиянии диффузионных процессов на формирование свойств композита. Одним из основных методов определения количества и характера распределения элементов в переходной зоне является локальный микрорентгеноспектральный анализ.

Исследования композитов с точки зрения физического металловедения позволяют оценить число, форму, размеры, взаимное расположение и свойства фаз и т.п. Для исследования применяют такие методы, как оптическая металлография, измерение твердости, электронная микрофотография, рентгеноструктурный анализ, индукционная структуроскопия, адсорбционная микрорентгенография и др.

В зависимости от назначения металлические композиты подвергают также различным испытаниям для определения специальных и эксплуатационных характеристик. Так, электротехнические биметаллы испытывают на переходное электрическое сопротивление и электрическую проводимость; термобиметал-

лы – на температурную чувствительность; высокотемпературные – на жаростойкость и окалиностойкость.

Коррозионно-стойкие биметаллы подвергают испытаниям на растяжение, а также на срез и изгиб (плакирующим слоем внутрь), при этом учитывают соотношение толщин слоев в биметалле. Коррозионные свойства определяют испытаниями на общую коррозионную стойкость, межкристаллитную коррозию, склонность к коррозионному растрескиванию.

Износостойкие биметаллы подвергают испытаниям на износостойкость, под которой понимают свойство материалов оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Оценку износостойкости проводят на различных испытательных устройствах, разделенных на четыре основные группы: торцевые трения скольжения; периферийные трения скольжения; роликовые трения качения; шариковые трения качения.

Испытания на ползучесть применяют для определения способности соединений медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при напряжениях, меньших предела текучести данного материала. Испытания на усталость позволяют судить о способности композита сопротивляться действию переменных нагрузок, изменяющихся во времени по величине и направлению при изгибе, растяжении или кручении.

Основным способом определения качества соединения служат механические испытания, которые подразделяют на качественные и количественные (рис. 4.5.5).

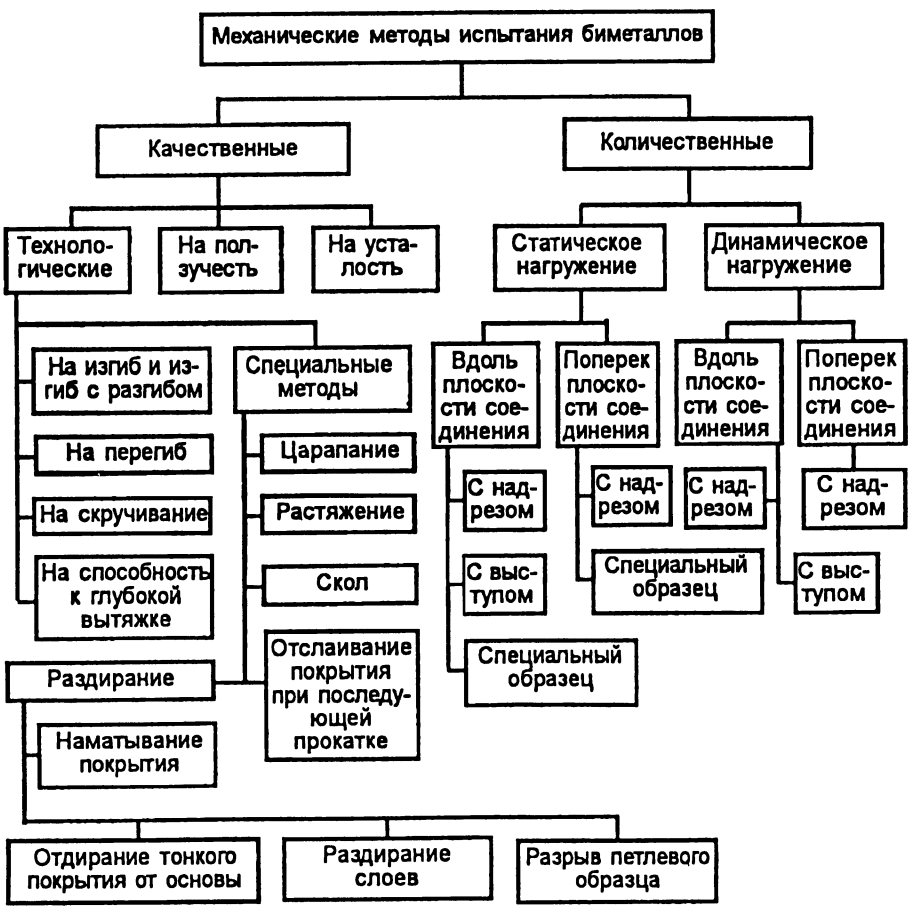


Рис. 4.5.5. Классификация механических методов испытания биметаллов

Наиболее распространенным видом качественных испытаний является испытание на изгиб, определяющее способность металла выдерживать заданную пластическую деформацию. Испытания на изгиб проводят до заданного угла изгиба, до появления первой трещины в растянутой зоне с определением угла изгиба, до параллельности сторон и до соприкосновения сторон. При испытании на изгиб с разгибом образцы загибают вокруг оправки диаметром, равным удвоенной толщине листа, на угол 45, 60, 90 и 120° (плакирующим слоем внутрь и наружу), затем образец разгибают до появления расслоя.

Для оценки качества соединения применяют испытание на раздирание, при этом характеристикой метода является отношение нагрузки к ширине образца. Испытание на наматывание плакирующего слоя на оправку, связанную с динамометром, позволяет оценить качество соединения по величине прилагаемого усилия. К испытаниям на раздирание относят также испытание на отдирание тонкого покрытия от основы и на раздирание слоев.

Для контроля качества сварки биметаллических труб используют метод сплющивания, при котором продольную осадку труб проводят до заданного расстояния между параллельными сжимающими плоскостями или до соприкосновения стенок трубы. Применяют также испытания на загиб и скручивание.

Наиболее важной характеристикой качества слоистых композитов является прочность соединения слоев. Количественные методы по характеру нагружения подразделяют на статические и динамические, которые, в свою очередь, различаются схемами нагружения при испытании образцов вдоль и поперек плоскости соединения. Наиболее распространены методики с использованием нагружения вдоль плоскости сварного шва (рис. 4.5.6).

Для определения прочности соединения слоев в направлении, перпендикулярном плоскости соединения, применяют образцы, изображенные на рис. 4.5.7.

Изготовление цилиндрических образцов (см. рис. 4.5.7, *а – в*) связано с большой трудоемкость. К данной группе методик относят также испытания с применением петлевых образцов (см. рис. 4.5.7, *г, д*), во внутренней полости которых клеем фиксируют вставки соответствующих форм и размеров, исключающие деформацию петли. На рис. 4.5.7, *е, ж* приведены схемы испытаний круглых образцов с кольцевыми пазами.

При испытании на срез (скол) динамическим нагружением критерием ударной прочности служит работа разрушения, отнесенная к единице площади соединения и определяемая, как правило, на маятниковом копре. Для испытания готовят образцы с предварительно выполненными перемычками покрытия путем круговой или продольной выточки (рис. 4.5.8, 4.5.9). Для определения качества сварки биметаллических труб применяют схемы испытаний, показанные на рис. 4.5.10.

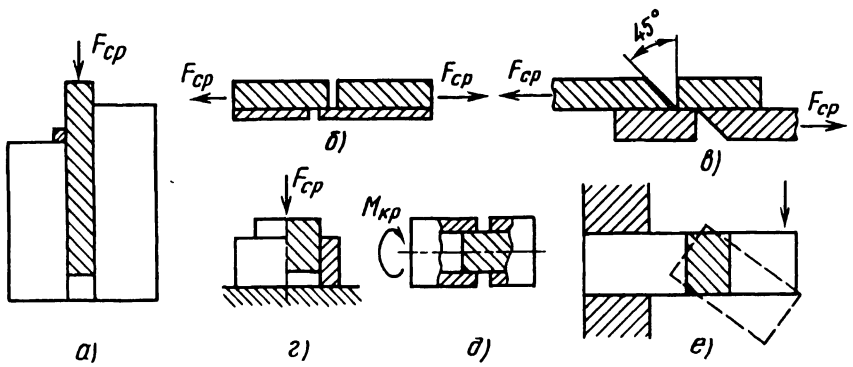


Рис. 4.5.6. Схемы количественных методов испытаний при нагружении композита вдоль плоскости соединения:
а – образец с выступом, *б, в* – образцы с прямоугольным и профильным надрезом, *г, д* – образцы для испытания осесимметричных профилей; *е* – специальный образец

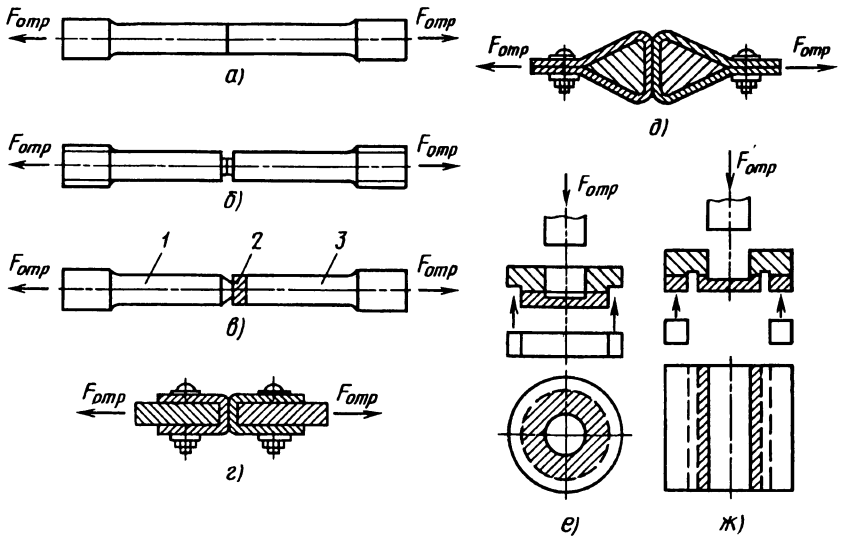


Рис. 4.5.7. Схемы количественных методов испытаний композитов при нагружении поперек плоскости соединения:

а, *б* – цилиндрический образец соответственно без надреза и с симметричным надрезом; *в* – с надрезом и несимметричным наклоном стенок (*1* – основной металл, *2* – плакирующий слой, *3* – технологическая планка); *г*, *д* – модифицированные петлевые образцы; *е*, *ж* – образцы с кольцевой проточкой и кольцевыми пазами

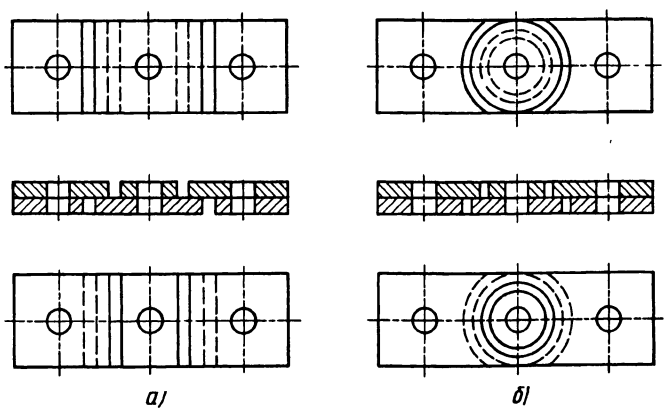


Рис. 4.5.8. Образцы для испытания композитов динамическим нагружением поперек плоскости соединения с продольной (*а*) и кольцевой (*б*) проточками

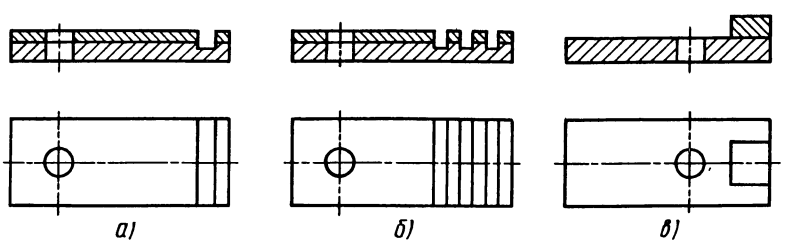


Рис. 4.5.9. Образцы для испытания композитов динамическим нагружением вдоль плоскости соединения:
а – с надрезом, одна площадка, *б* – с надрезом, три площадки; *в* – с выступом

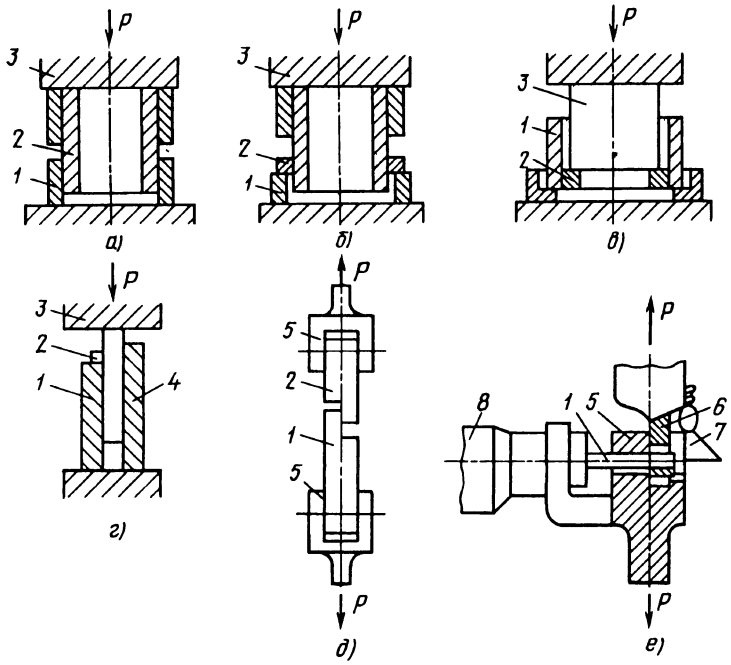


Рис. 4.5.10. Схемы испытанй биметаллических образцов на срез:
а, б – образцы в виде кольца с толщиной плакирующего слоя ≥ 1 мм; *в* – образцы в виде кольца с толщиной плакирующего слоя ≥0,5 мм; *г* – плоские образцы толстостенных труб больших диаметров; *д* – плоские образцы с толщиной плакирующего слоя ≥1 мм, *е* – схема устройства для испытания цилиндрических микрообразцов на срез. *1* – основной слой, *2* – плакирующий слой; *3* – пуансон, *4* – матрица, *5* – захват, *6* – ножи, *7* – прижимная пружина; *8* – микровинт

Толщину плакирующего слоя контролируют с помощью разрушающих и неразрушающих методов. К первым относят методы: прямой (с помощью микрометра); металлографический (с использованием микроскопа); химические, основанные на растворении металла плакирующего слоя в электролите, который не действует на основной металл; кулонометрический (для тонких плакирующих покрытий толщиной до 50 мкм) и др.

4.5.4. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ

К неразрушающим методам контроля относят акустические, оптические, электромагнитные, капиллярные, радиационные и др. [17]. С их помощью можно не только определить прочность и сплошность соединения, толщину плакирующего слоя, но и осуществлять контроль кристаллической структуры и химического состава композита. Преимущество неразрушающих методов – возможность полной автоматизации процесса контроля.

Наиболее чувствительным из акустических методов является эхо-акустический. Если в биметаллическую полосу перпендикулярно к ее поверхности посылать ультразвуковые волны, то от границы слоев отразится часть энергии продольных волн. При наличии расслоения величина отраженной энергии волны изменится. Недостаток этого метода заключается в наличии "мертвой зоны" – пространства около поверхности полосы, в котором дефекты не могут быть обнаружены. Для современных дефектоскопов протяженность "мертвой зоны" составляет 1...3 мм, поэтому эхо-импульсный метод нельзя применять для контроля тонколистовых биметаллов.

Методы ультразвуковой дефектоскопии основаны на способности ультразвуковых колебаний отражаться от внутренних неоднородностей металла. Этим методом можно обнаружить такие дефекты, как трещины, расслоения,

различные включения и непривары, оценить структурное состояние металла.

В основе электромагнитных методов лежит явление огибания магнитным потоком препятствий с пониженной проницаемостью. Возникающие при этом поля фиксируют в зависимости от свойств объекта различными способами: индукционным, магнитографическим, феррозондовым, вихревых токов и др.

Метод вихревых токов позволяет получать информацию, например, о толщине плакирующего слоя и механических свойствах биметалла при таких скоростях объекта, которые недоступны другим методам.

С помощью капиллярных методов можно определить поверхностные дефекты биметаллов. Эти методы основаны на явлении проникновения хорошо смачивающей жидкости в поры, трещины и другие поверхностные дефекты материала.

Радиационные методы контроля основаны на зависимости поглощения ионизирующего излучения от плотности исследуемого материала, что позволяет обнаружить в слоистых композитах непривары, трещины, поры и другие дефекты.

При контроле качества соединения слоев в композитах применяют также акустические методы: импедансный, велосимметрический, свободных колебаний, акустико-топографический и др. Импедансный метод используют для выявления расслоений и других дефектов соединения, при этом минимальная площадь залегаемого дефекта составляет 7 мм^2, минимальная глубина залегания – 100 мкм. С помощью велосимметрического метода и метода свободных колебаний контролируют расслоения в неметаллических покрытиях и качество соединения металлических и неметаллических составляющих. Минимальная площадь дефекта, выявляемая этими методами, составляет 2 и 1 см^2, минимальная глубина залегания дефекта – соответственно 300 и 50 мкм.

Акустико-топографический метод основан на возбуждении в контролируемом композиционном материале мощных упругих колебаний в широком диапазоне частот и регистрации увеличения амплитуд колебаний отдельными участками, связанными с дефектами, вследствие их резонансов на собственных частотах. Индикатором служит тонкодисперсный порошок, который наносят на всю поверхность объекта. Минимальная площадь выявляемых дефектов составляет 5 мм^2, ограничений по глубине залегания дефектов нет.

Оптический неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля. При контроле топографии поверхности и объемных поверхностных дефектов применяют следующие приборы: для контроля шероховатости (интегральная оценка поверхностных дефектов); для контроля и измерения поверхностных дефектов и микрогеометрии (определяются отдельные дефекты); для контроля плоскостности (определяется дефект типа однородного изгиба).

При исследовании структуры и свойств как составляющих, так и переходной зоны слоистых композитов широко применяют методы измерения твердости и микротвердости, световой микроскопии.

Микроструктуру композитов анализируют на металлографическом микроскопе. Связь между свойствами биметалла и количественными характеристиками микроструктуры (размер зерен, содержание различных фаз, их распределение и форма) устанавливают с помощью количественной металлографии. Структуру в диапазоне субмикроскопических размеров изучают на просвечивающем электронном микроскопе.

Исследование кристаллографической и дислокационной структуры, наблюдение за структурными изменениями непосредственно при нагреве и деформации, анализ локального химического анализа состава переходной зоны осуществляют с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Рентгеноструктурный анализ применяют для изучения кристаллической структуры; качественного и количественного фазового анализа; определения размеров, распределения отдельных кристаллитов; исследования типа, концентрации и распределения дефектов решетки.

Для прямого наблюдения точечных дефектов – вакансий и межузельных атомов, изучения несовершенств кристаллической решетки (дислокаций, дефектов упаковки, границ зерен и др.) используют автоионную микроскопию с разрешающей способностью 0,2…0,3 нм.

Реже для контроля качества слоистых композиционных материалов применяют методы авторадиографии (метод радиоактивных изотопов), резонансные методы (ядерный гамма-резонанс и др.).

4.5.5. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СКМ

Рассмотрим основные особенности наиболее распространенных операций обработки СКМ, применяемых в производстве разнообразных изделий.

Резка производится для получения заготовок требуемых размеров. Механическую резку, вырубку и пробивку отверстий ведут всегда со стороны плакирующего слоя, что предотвращает внедрение металла основного слоя в плакировку и обеспечивает образование легко удаляемого заусенца. Резку листов с двухсторонней плакировкой различными металлами производят со стороны слоя, обладающего меньшей твердостью.

Листы толщиной более 25 мм обычно подвергают термической резке – газовой, газофлюсовой, плазменной. Эти способы используют также при вырезке деталей с криволинейными контурами. При резке металлов, образующих тугоплавкие оксиды, используют флюсы, подаваемые вместе со струей кислорода. Образующееся в результате сгорания газофлюсовой смеси тепло разжижает оксиды, после чего они удаляются из зоны реза.

Прогрессивный способ разделки слоистых металлов – плазменная резка, позволяющая разрезать листы практически любой толщины и обеспечивать высокое качество реза.

Обработка давлением. Большинство деталей, изделий и конструкций из СКМ получают с помощью различных операций обработки металлов давлением. Так, правку листов, полос и лент проводят на прессах или в валковых и роликовых правильных машинах. Гибку слоистых композитов осуществляют в холодном или горячем состоянии, при этом минимальные радиусы гибки определяют опытным путем или с помощью аналитических расчетов.

Вытяжка двух- и трехслойных биметаллов широко используется в производстве для получения изделий типа стаканов, днищ, панелей. Практика глубокой вытяжки слоистых металлов показала их высокую пластичность и способность подвергаться деформации в горячем и холодном состояниях. Так, материалом для изготовления вытяжкой корпусов химических источников тока служит трехслойная рулонная лента никель + сталь + никель. Вытяжку проводили на специализированных прессах в автоматическом режиме за шесть переходов.

Некоторые биметаллы при определенных условиях проявляют лучшие способности к вытяжке, чем каждый из составляющих в отдельности. Это используется как средство для повышения вытяжных характеристик металлов. Например, тонколистовая фольга, плохо поддающаяся вытяжке, при плакировке ее другим тонколистовым металлом приобретает способность к глубокой вытяжке без разрушения и образования гофров.

Остаточные напряжения, возникающие в слоях металлов после пластической деформации, могут приводить к искажению размеров и формы изготовляемых из биметаллов деталей и конструкций. Особенно это относится к деталям с низкой жесткостью, имеющим одинаковую или двойную кривизну (различные панели, обшивки и т.п.). Такие изделия изготовляют штамповкой.

Прокатку СКМ проводят с целью получения нужных потребителю размеров, формы, требуемых механических и эксплуатационных свойств и структуры. Кроме того, горячая прокатка и последующая термическая обработка в большинстве случаев повышают прочность соединения слоев. Выравниванию при прокатке деформаций мягкой и твердой составляющих биметалла способствует метод раздельного охлаждения верхних и нижних рабочих и опорных валков прокатного стана. При этом достигается разница температур слоев биметалла, сближающая их величину сопротивления деформации.

Сварка биметаллов. Многие изделия и элементы конструкций из биметаллов изготовляют с помощью сварки. СКМ нередко используют также в качестве переходников для сварки конструкций из разнородных металлов. Основными факторами, определяющими качество сварного соединения, являются свойства составляющих биметалла и их поведение при температурах сварки, форма кромок заготовок, подготовленных к сварке, состав сварочных электродов, режим сварки [18]. Существенная разница в свойствах компонентов биметалла вызывает необходимость в их раздельной сварке с применением соответствующих режимов и присадочных материалов, обеспечивающих получение качественных сварных швов.

Для сварки биметаллов обычно применяют электродуговую (ручную или автоматическую) сварку. Автоматическую сварку под слоем флюса производят на сварочных аппара-

тах со стационарными и самоходными сварочными головками. Ручную сварку применяют для наложения швов небольшой протяженности или в случае, когда места сварки недоступны для сварочного аппарата. Марку электродов выбирают в соответствии с типом свариваемых металлов. Применяют также комбинированный способ сварки – автоматическую для основного слоя и ручную – для плакирующего.

Для сварки биметаллов с плакирующим слоем из титана, тантала, ниобия и других металлов применяют сварку в среде защитного газа. Для сварки биметаллов большой толщины возможно использование электрошлаковой сварки. Кромки составляющих биметалла перед сваркой обрабатывают механической обработкой – строганием, фрезерованием, шлифованием (рис. 4.5.11). Последовательность наложения сварных швов (рис. 4.5.12) имеет существенное значение. В большинстве случаев вначале выполняют шов на основном слое, а затем приступают к сварке плакирующего слоя.

При сварке биметаллов с плакирующим слоем из цветных металлов и сплавов, хорошо свариваемых с основным слоем и имеющих близкую с ним температуру плавления, не следует допускать разбавления металла шва плакирующего слоя железом основного слоя, а также проникновения в шов кислорода, серы и углерода. Хорошие результаты дает аргонодуговая сварка электродами малого диаметра при низком значении сварочного тока, при этом сварку рекомендуют вести по возможности большим числом слоев.

Проволоку сталь + алюминий широко используют в качестве проводов контактной сети железных дорог, воздушных линий электропередач, силовых кабелей. При выполнении монтажных работ используют стыковую сварку, которая затруднена из-за большой разницы в свойствах металлов оболочки и сердечника. Следует также иметь в виду, что при сварке в зоне соединения при нагреве образуются хрупкие интерметаллические соединения. Эффективным оказался способ контактной стыковой сварки с формированием соединения с помощью стыкосварочной машины. Алюминиевая оболочка в зоне сварки разрушается выдавливающимся металлом сердечника (рис. 4.5.13). Для предотвращения этого на один из свариваемых концов надевают алюминиевое кольцо и смещают его в сторону от зоны соединения, выполняют стыковую сварку, зачищают грат, сдвигают кольцо в место сварки и приваривают его с помощью сжимающих электродов.

Утилизация отходов СКМ. В процессе производства слоистых металлов и изделий из них неизбежно образуются отходы, главным образом в виде обрези. Отслужившее свой век биметаллическое изделие также идет в отходы.

Для повышения эффективности металлургической переработки отходов СКМ проводят их первичную обработку, предусматривающую сортировку, разделку, пакетирование, брикетирование, измельчение, сушку, обезжиривание, обогащение, магнитную сепарацию

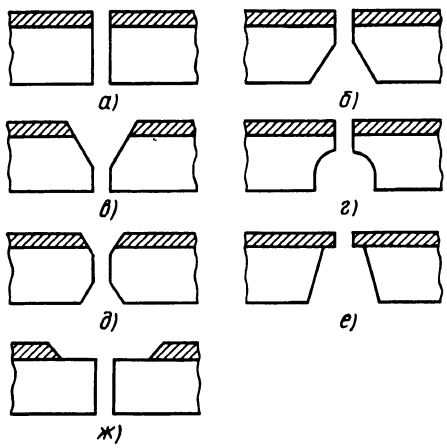


Рис. 4.5.11. Схемы подготовки кромок биметалла к сварке:
а – без затупления кромок; *б*, *в* – V-образная с разделкой со стороны основного и плакирующего слоев; *г* – U-образная; *д* – X-образная; *е*, *ж* – с удалением из зоны стыка основного и плакирующего слоев

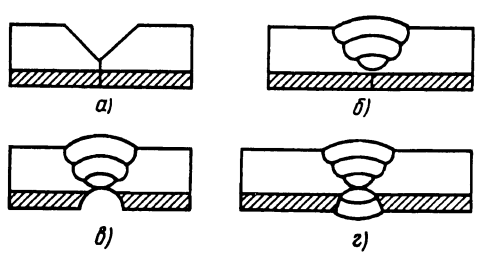


Рис. 4.5.12. Последовательность операций при сварке биметаллов с плакирующим слоем из коррозионно-стойкой стали:
а – подготовка кромок; *б* – сварка основного слоя, *в* – разделка корня шва на основном слое, *г* – сварка плакирующего слоя

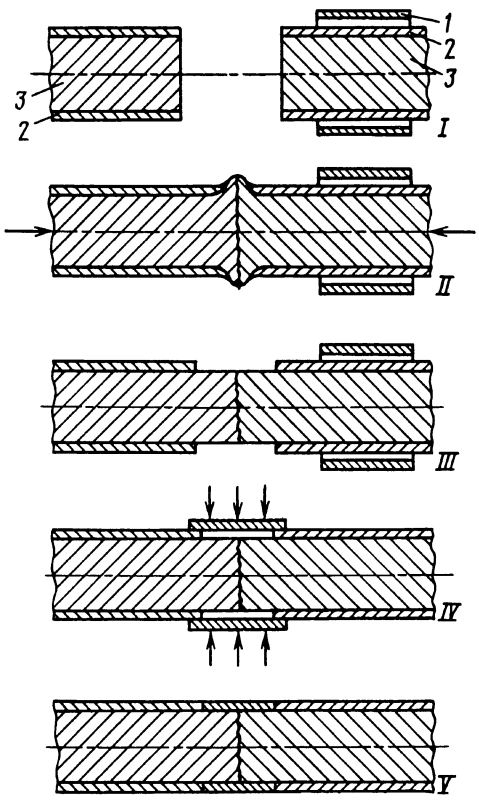


Рис. 4.5.13. Схема стыковой сварки сталеалюминиевых проводов:
I – V – стадии процесса· *1* – алюминиевое кольцо; *2* – алюминиевая оболочка, *3* – стальной сердечник

и другие операции. Отделение составляющих СКМ друг от друга выполняют механическими, химическими, электрохимическими или тепловыми способами.

Механические способы заключаются в раздирании слоев, когда прочность соединения ниже прочности составляющих, а также в срезке плакирующего слоя при его достаточной толщине строганием или фрезерованием.

Химические способы сложны и многостадийны. Они предусматривают проведение таких последовательных операций, как стравливание и выщелачивание плакирующего металла, дальнейшее восстановление его из оксидов. Электролитические способы снятия плакирующего слоя по сравнению с химическими сравнительно просты. Обычно при этом в одном цикле происходит растворение цветного металла на аноде и осаждение его на катоде.

Тепловые способы заключаются в расплавлении более легкоплавкой составляющей биметалла. Если слоистые отходы имеют вид ленты или полосы, процесс разделения можно осуществить в потоке, располагая нагревающее устройство над поверхностью движущейся полосы. В ряде случаев применяют метод разделения слоев биметалла тепловым ударом: при быстром нагреве в результате значительной разницы в коэффициентах линейного расширения металлов составляющих происходит расслоение.

Наиболее простой и дешевый путь утилизации отходов СКМ – использование их в качестве шихтовых материалов при выплавке металлов. Так, отходы производства рулонных биметаллических лент латунь + сталь + латунь (концевая и боковая обрезь) используют в качестве железистого флюса при выплавке вторичной черновой меди, а также как легирующую добавку при выплавке медьсодержащих чугунов, применяемых, в частности, для производства чугунных ванн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биметаллы** / Л.Н.Дмитров, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев и др. Пермь: Пермское книжное издательство, 1991. 416 с.

2. **Гельман А.С.** Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.

3. **Голованенко С.А.** Сварка прокаткой биметаллов. М.: Металлургия, 1977. 158 с.

4. **Дерибас А.А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980. 222 с.

5. **Деформация** металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я Соловьев, Н.И. Шефтель, А.Г. Кобелев. М.: Металлургия, 1975. 416 с.

6. **Диффузионная** сварка материалов: Справочник. Под ред. Н.Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.

7. **Каракозов Э.С.** Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 275 с.

8. **Кобелев А.Г., Потапов И.Н., Кузнецов Е.В.** Технология слоистых металлов. М.: Металлургия, 1981. 248 с.

9. **Кудинов В.М., Коротеев А.Я.** Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1987. 168 с.

10. **Лысак В.И., Седых В.С., Трыков Ю.П.** Энергетические параметры сварки взрывом многослойных композиционных соединений // Сб. докладов 4-го Международного симпозиума по использованию энергии взрыва

для производства металлических материалов с новыми свойствами. ЧССР. Готвальдов: 1979. С. 152 – 162.

11. **Лысак В.И., Стариков Д.В., Кузьмин С.В.** Система автоматизированного проектирования режимов сварки взрывом многослойных композиционных материалов // Тр. Международной конф. "Слоистые композиционные материалы–98". Волгоград: Изд. ВолгГТУ, 1998. С. 123 – 124.

12. **Материаловедение** и технология композиционных материалов / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев, Е.В. Кузнецов. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 423 с.

13. **Многослойная** сталь в сварных конструкциях / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, А.К. Цыкуленко и др. Киев: Наукова думка, 1984. 288 с.

14. **Новые** материалы. (Под ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.

15. **Особенности** структуры и свойств слоистых металлических материалов, получаемых методом электрошлаковой наплавки / И.Г. Родионова, В.И. Столяров, А.А. Быков и др. // Сб. трудов Международной конференции "Слоистые композиционные материалы–98". Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 1998. С. 200 – 202.

16. **Производство** биметаллических труб и прутков / М.И. Чепурко. В.Я. Остренко, А.А. Когадеев и др. М.: Металлургия, 1986. 240 с.

17. **Производство** металлических слоистых композиционных материалов. / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев и др. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 496 с.

18. **Сварка** разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко и др. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.

19. **Седых В.С.** Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Межведомственный сборник. Волгоград: Изд-во ВПИ, 1985. С. 3 – 30.

20. **Седых В.С., Казак Н.Н.** Сварка взрывом и свойства сварных соединений. М.: Машиностроение, 1971. 71 с.

21. **Слоистые** металлические композиции / И.Н. Потапов, В.Н. Лебедев, А.Г. Кобелев и др. М.: Металлургия, 1986. 216 с.

22. **Трыков Ю.П., Шморгун В.Г.** Свойства и работоспособность слоистых композитов. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 1999. 190 с.

23. **Щеголев В.А., Колмогоров В.Л.** К вопросу схватывания разнородных металлов // Теория и практика производства метизов: Межвузовский сборник. Свердловск: УПИ, 1983. С. 9 – 17.

24. **Щерба В.Н.** Прессование алюминиевых сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 768 с.

25. **Электрошлаковая** наплавка с вертикальным расположением заготовки для получения коррозионно-стойких биметаллов / Ю.П. Коннов, М.А. Киссельман, И.Ю. Коннова и др. // Сталь. 1993. № 5. С. 26 – 30.

Раздел 5

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Глава 5.1

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

5.1.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Керамика – неметаллические неорганические материалы на основе кристаллических соединений неметаллов и металлов, синтезированных и консолидированных различными методами для придания заданных свойств и геометрии. Многообразие составов, структур и технологий керамических материалов предопределяет достижение широкого спектра их свойств и областей применения.

Керамика относится к структурно- и фазочувствительным материалам. Даже при одинаковом химическом составе свойства керамических материалов могут сильно различаться в зависимости от исходных материалов, методов и параметров технологии, структуры и фазового состава спеченных материалов, промежуточных методов обработки и качества поверхности, методов определения свойств. Например, управляя только зернистостью структуры, можно создавать материалы на основе оксида алюминия как высокопрочные с относительно низкой термостойкостью, так и высокотермостойкие с пониженной прочностью.

Для тугоплавких соединений, составляюших основу керамических конструкционных материалов, характерна низкая технологичность, т.е. из них трудно формовать заготовки деталей, спекать до высоких значений прочности и плотности, обрабатывать до заданных размеров. Технологические трудности нарастают от оксидов к нитридам и карбидам. Для улучшения формуемости, помимо тщательной отработки гранулометрического состава исходных порошков, в них вводят пластификаторы и поверхностно-активные вещества. А для улучшения спекаемости, ускорения массопереноса и для придания материалам желательных свойств в исходный порошок основного соединения вводят добавки других соединений. Неравномерность распределения добавок вызывает структурную и фазовую неоднородность спеченного материала, снижает уровень и увеличивает разброс его свойств.

Паспортизация свойств керамических конструкционных материалов в России проводится на оборудовании и по методикам, как правило, созданным на предприятии-разработчике материалов. Поэтому сравнение свойств материалов различных изготовителей не всегда корректно. В США, Японии и в Европе создают государственные и международные стандарты для повышения достоверности банков данных по конструкционным керамическим материалам.

В табл. 5.1.1 приведены основные свойства керамических материалов, разработанных в ОНПП "Технология" и определенных в соответствии со стандартом предприятия. Стандартом предусмотрена геометрия, количество образцов, оборудование и методики определения 50 характеристик в диапазоне температур –60...+1500 °С на воздухе и до 2000 °С в вакууме. Например, прочностные характеристики керамик при изгибе определяли на шлифованных балочках размерами 7 × 7 × 70 мм. Минимальная партия для расчета вероятностных характеристик прочности составляла 30 образцов.

Материалы, приведенные в табл. 5.1.1, синтезированы из отечественных высокочистых исходных порошков с минимальным содержанием активаторов спекания для сохранения прочности при высокой температуре. Например, реакционносвязанный нитрид кремния ОТМ-904 синтезирован из кремния полупроводниковой чистоты, поэтому его прочность не уменьшается при нагреве до 1500 °С. Применение менее чистых и с большим содержанием добавок высококачественных порошков, полученных, например, золь-гель технологией позволяет получать более прочные при комнатной температуре материалы. Типичные свойства машиностроительных керамических материалов приведены в табл. 5.1.2. В ней свойства для двух типов керамики (СКК и ГПНК), изготовленных на различных предприятиях, приведены в отдельных графах.

5.1.1. Основные свойства конструкционных керамических материалов, созданных в НПП "Технология", г. Обнинск

Параметры		ОТМ-904 РСНК	ОТМ-907 УРСНК	ОТМ-913 СНК	ОТМ-914 ГПНК	ОТМ-912 СКК	ОТМ-910 (SiC-Si_3N_4)	ТСМ-300 (99,7% Al_2O_3)	ТСМ-303 (97,6 % Al_2O_3)	ОТМ-901 РСНБ	ОТМ-902 (BN-SiC)	Кварцевая керамика (99,8 % SiO_2)	ОТМ-607*1 (98,5 % SiO_2)
Плотность, кг/м^3		2500	3200	3300	3400	3200	2500	3960	3750	1400	1550	1940. 2050	500
Открытая пористостью, %		10 ..16	0 ..1	0...0,3	0	0...1	15 25	0	0	33 ..35	28. 30	7 11	78
Прочность при изгибе, МПа	293 К	200	500	670	830	370	260	350	300	40	80	35.. 85	5 . 10
	1700 К	200	400 1300 К	430 1500 К	700	410	230	–	–	35	90	90 ..110 1100 °С	5 . 10 1100 °С
Модуль упругости, ГПа		164	250	280	294	320	180	380	350	30	30	27...55	0,05
Вязкость разрушения, K_{IC}, МПа · м$^{1/2}$		2,5	5,5	6,4	7,9	5,4	2,9	–	–	–	–	–	–
Теплопроводность, Вт/(м · К)		5. .10	10...20	–	15...20	–	–	29	17	15	20	0,5. 1,6	0,1
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)		700	700	900	750		–	900	900	460	600	600... 1300	600.. 1300
Температурный коэффициент линейного расширения, 10^{-6}/К (300...1200 К)		2,6	3,2	3,2	3,7	4,6	4,4	8,7	8,4	0,3	0,5	0,4 0,9	0,4 0,9
Рабочая температура, К		1700	1600	1600	1600	1500... 1600	1600 .. 1900	1800 1900	1400 .. 1500	900 (на воздухе)	1200 (на воздухе)	1100...1200 (длительно) 1800 (кратковременно)	
										2500	2500		
										в вакууме, инертном газе			

Продолжение табл 5 1 1

Параметры	ОТМ-904 РСНК	ОТМ-907 УРСНК	ОТМ-913 СНК	ОТМ-914 ГПНК	ОТМ-912 СКК	ОТМ-910 (SiC-Si_3N_4)	ТСМ-300 (99,7% Al_2O_3)	ТСМ-303 (97,6 % Al_2O_3)	ОТМ-901 РСНБ	ОТМ-902 (BN-SiC)	Кварцевая керамика (99,8 % SiO_2)	ОТМ-607*1 (98,5 % SiO_2)
Стойкость в кислотах, HCl, HF, H_2SO_4	Хор	Хор	–	Хор	Хор	–	Хор	Хор	Хор	Хор	–	–
Окисляемость*2, %	+1,0 (1600 К 300 ч)	+(0,4 . 1,0) (1600 К 50 ч)	+0,1 (1600 К 50 ч)	+0,2 (1800 К 50 ч)	+0,2 (1800 К 50 ч)	+1,0 (1600 К 50 ч)	–	–	–20 (1600 К 300 ч)	–0,3 (1600 К 300 ч)	0	0
Удельное электросопротивление, Ом · см	–	10^{14}	–	–	–	–	10^{15}	10^{14}	10^{12}	10^{12}	–	–
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^{10} Гц	6,3	7,93	–	8,7	–	–	–	9,2	–	–	3,5	1,5
Линейная усадка, %	0	4. 6	16	–	14	1. 2	10	10	0	0	0,5 .1,5	3,0

*1 Для СВЧ-техники

*2 Изменение массы после воздействия воздушной среды при высоких температурах (знак "+" – увеличение, знак "–" – снижение)

Примечания. ОТМ-904 – реакционносвязанный нитрид кремния (РСНК), ОТМ-907 – уплотненный реакционносвязанный нитрид кремния (УРСНК); ОТМ-913 – спеченный нитрид кремния (СНК); ОТМ-914 – изготовленный горячим прессованием нитрида кремния (ГПНК), ОТМ-912 – спеченный карбид кремния (СКК), ОТМ-910 – карбид кремния, модифицированный нитридом кремния, ТСМ-300 и ТСМ-303 – высокоглиноземистая керамика, ОТМ-901 -- реакционноспеченный нитрид бора (РСНБ), ОТМ-902 – спеченный нитрид бора, модифицированный карбидом кремния

5.1.2. Типичные свойства промышленной конструкционной керамики

Параметры		РСНК	СНК	ГПНК	ГПКК	ГПКК	Спеченный сиалон	ГП сиалон	РСКК	СКК	СКК	Спеченный ZrO_2
Плотность, г/см^3		2,2 . 2,6	3,15... 3,2	3,25	3,1	3,2	3,2	3,2 3,4	2,2.. 2,9	3,1	3,1	6,05
Пористость, %		16 .30	2	0	2	0	2	2	10.. 30	4	4	–
Прочность при 3-точечном изгибе, МПа	25 °С	196.. 390	735.. 785	1200	483	685	490	450	195... 295	390... 490	450... 530	1176
	1200 °С	195... 295	540... 590	980	–	590	–	–	–	–	–	250 (1100 °С)
Прочность при растяжении, МПа		145	–	580	300	–	400	–	–	294	–	–
Прочность при сжатии, МПа		1000	–	3500	2000	–	3500	–	–	2940	–	–
Модуль упругости, ГПа		176	274	314	410	441	265	–	392	–	412	205
Твердость по Виккерсу, ГПа		9,8... 11,8	15,7.. 17,6	17,6 .. 19,6	24,5	25,5	6,13... 15,7	–	19,6	–	21,6	14,7

Параметры	РСНК	СНК	ГПНК	ГПКК	ГПКК	Спеченный сиалон	ГП сиалон	РСКК	СКК	СКК	Спеченный ZrO_2
Вязкость разрушения K_{1c}, МН/м$^{-3/2}$	1,87	–	5	5	4	5	5	–	5	4	9
Модуль Вейбулла	10 .15	8	10.. 15	10	–	15	8,4	–	10	5,8	20
Температурный коэффициент линейного расширения, $\times 10^6$, °С$^{-1}$ (20 .1000 °С)	2,8...3,2	3,0	3,2	4,8	4,8	3,2	–	4,3	4,8	4,8	9,2
Теплопроводность, Вт/(м · К)	8...12	16,7	21... 25	83,6	62,8 (500 °С), 419 (1200 °С)	20 .. 25	–	104,7 (25 °С), 419 (1200 °С)	83,7... 92,1	87,9 (25 °С); 50,2 (1200 °С)	1,9 (25 °С); 2,5 (1000 °С)
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	710	837	710	1040	–	710	–	712	795	670	400
Максимальная температура при испытании на термоудар, °С	470	–	795... 900	–	335... 345	–	–	–	–	–	380

Примечания СКК – спеченный при обычном давлении α – SiC, РСКК – реакционносвязанный SiC, ГПКК – горячепрессованный SiC, СНК – спеченный при обычном давлении Si_3N_4; РСНК – реакционносвязанный Si_3N_4, ГПНК – горячепрессованный Si_3N_4, ГП сиалон – изготовлен горячим прессованием соединений, содержащих Si, Al, кислород и азот

5.1.2. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Керамические материалы существуют преимущественно в виде детали. Только образцы и детали простой формы можно изготовлять из заготовок больших размеров.

Керамическая технология, как правило, начинается с порошков. Требования к исходным порошкам зависят от характеристик, которыми должна обладать готовая деталь. Для машиностроительной конструкционной керамики, предназначенной для работы при температурах выше 1000 °С, в деталях, воспринимающих значительные механические нагрузки, важнейшими параметрами являются прочность и вязкость разрушения, которые могут быть получены только у материалов, изготовленных из тонкодисперсных, высокочистых порошков. Поскольку поставляемые заводами порошки редко удовлетворяют этим требованиям, технологический процесс часто начинается с помола и отмывки от примесей.

При помоле добиваются получения порошка с требуемыми максимальными размерами частиц (не выше) и распределением размеров по фракциям для улучшения формуемости и спекаемости. Высокочистые порошки нитридов, карбидов и оксидов даже оптимального гранулометрического состава трудно формируются и спекаются. Поэтому разрабатываются новые способы повышения технологичности материалов, например, путем введения пластификаторов, поверхностно-активных веществ и активирующих спекание добавок, использования более тонкодисперсных порошков.

Операция подготовки шихты путем смешивания порошков основного материала с добавками и с поверхностно-активными веществами должна обеспечить равномерное распределение всех компонентов. При малом содержании добавок (0,5...10 % – масс.) порошок основного материала вводят ступенчато в процессе смешения, например, в последовательности 10: 20; 40 % (масс.) и оставшуюся часть. Наиболее равномерное распределение добавок, структурная и фазовая однородность готового материала обеспечивается при совместном синтезе порошка с добавками методами золь-гель технологии, плазмохимии, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и другими методами. Для повышения сыпучести, объемной плотности засыпки порошка в ряде технологий шихту гранулируют и сушат. Готовая шихта используется в различных технологиях или для предварительного синтеза материала с последующим измельчением до требуемого гранулометрического состава, или для приготовления шликера, или для формования заготовок.

Различные методы формования керамических заготовок: холодное одно- и двустороннее прессование полусухих порошков, шликерное литье из водных суспензий в гипсовые, керамические или металлические формы, шликерное литье под давлением термопластичных масс, взрывное гидродинамическое формование, гидростатическое прессование, горячее прессование, горячее газостатическое прессование, газофазное осаждение; с одной стороны, предъявляют различные требования к гранулометрическому составу порошков и характеристикам формуемых масс, с другой стороны, имеют ограничения по предельным размерам, сложности геометрии заготовок, по производительности, энерго- и трудоемкости.

Гранулометрический состав порошка в значительной мере определяет плотность упаковки частиц в отформованной заготовке, значение и степень неоднородности усадки при консолидации (спекании) материала заготовки, которые, в свою очередь, определяют степень деформации, коробления заготовки при спекании и величину технологического припуска под мехобработку для обеспечения требуемой геометрии изделия. Поэтому при разработке материала и технологии изготовления из него изделий оптимизируют зерновой состав исходного порошка. Например, при разработке материала ТСМ-303 (97 % Al_2O_3) оптимизация гранулометрического состава проводилась с целью уменьшения содержания связки воск–парафин в термопластичном шликере. Лучшие результаты получены при использовании молотого в шаровых мельницах порошка шихты с содержанием 39 ± 1,5 мас. % фракции 1...2 мкм, 61 ± 1,5 мас. % фракции 3...6 мкм и удельной поверхностью 4000 ± 500 $см^2/г$. Такие характеристики порошка позволяют получить хорошую литейную способность шликера при содержании связки не более 11 мас. %. Применение более тонкого порошка потребует увеличения содержания связки и вызовет рост усадки при спекании. Применение порошка с большей величиной зерна не позволит спечь материал до нулевой пористости и вызовет

уменьшение прочности материала. При производстве деталей из материала ТСМ-303 получение указанных выше характеристик порошка обеспечивается контролем соотношения шихта–мелющие тела и продолжительности помола.

При формовании заготовок изделий из водных шликеров оптимизацию фракционного состава порошка осуществляют с целью обеспечения седиментационной устойчивости шликера и высокой плотности упаковки частиц в шликере и в отформованной заготовке, до 0,85 и 0,9 теоретической плотности соответственно. Что определяет низкие значения усадки при спекании заготовок.

Например, для водного шликера кварцевого стекла оптимальный фракционный состав частиц до 5 мкм составляет 20...30 %, от 5 до 63 мкм – 60...70 %, от 63 до 500 мкм – 7...10 %. Из такого водного шликера можно формировать в гипсовых формах тонкостенные заготовки диаметром и высотой до 1,5 м.

Наиболее производительным и экономичным является полусухое прессование на пресс-автоматах. Однако этот метод не приемлем для производства заготовок высотой более 100 мм и сложного профиля.

Сформованные заготовки подвяливают, сушат или сразу спекают в зависимости от метода формования. Заготовки, отлитые из термопластичного шликера, обжигают дважды; первый обжиг, предварительный или утильный, предназначен для удаления термопластичной связки, что связано с дополнительными затратами и газовыделением. Обжиг заготовок обычно проводится в засыпке порошка из того же материала или из глинозема при температурах 200...1000 °С. Температура обжига, скорости нагрева и охлаждения, время выдержки при максимальной температуре определяются химическим и гранулометрическим составом исходных порошков, размерами заготовки, типом и количеством связки (воск, парафин, полимеры) и необходимостью обеспечить достаточную прочность для транспортировки заготовок. Длительность нагрева заготовок из указанного выше шликера для ТСМ-303 составляет 48 ч. Выдержка при 1000 ± 50 °С – 3...7 ч. Длительность нагрева и выдержек при утильном обжиге заготовок из более тонкодисперсного порошка нитрида кремния с удельной поверхностью 15 000 $см^2/г$, массовой долей связки 14...15 % составляет 100 ч, а из карбида кремния с такой же удельной поверхностью и содержанием связки – 40 ч.

Хорошие результаты получены при интенсификации технологии формования из термопластичного шликера вибрационными и ультразвуковыми методами. Облучение термопластичного шликера для ТСМ-303 ультразвуком с частотой 18...20 кГц, амплитудой колебаний 6...8 мкм позволит уменьшить его вязкость на порядок, увеличить литейную способность на 30...40 %, содержание твердой фазы в шликере на 12 %, уменьшить усадку при спекации на 8...10 %, увеличить прочность материала после спекания на 20 %. Механическая обработка заготовок из термопластичного шликера с наложением ультразвука на обрабатывающий инструмент обеспечивает производительность 0,2...1,7 $см^3/с$, шероховатость поверхности 1...1,25 мкм, отклонение от номинального размера 0,1 мм. Этот способ применим для обработки заготовок сложного профиля, изготовления отверстий любой конфигурации. Вибрация с частотой 80...100 Гц, амплитудой 0,2...0,3 мм в процессе литья под давлением заготовок из термопластичного шликера на основе Al_2O_3 с зернистым наполнителем из плотноспеченного муллита (0,6...2 мм) позволяет получать достаточно равноразмерное распределение наполнителя в матрице.

Спекание заготовок с целью уплотнения, упрочнения, придания материалу свойств готовой детали осуществляют в различных высокотемпературных печах, обеспечивающих требуемую температуру и газовую среду. Метод спекания – в вакууме, на воздухе или в регулируемой газовой среде низкого (до 0,05 МПа) давления, компрессионное спекание при давлении газа 2,0...10,0 МПа), горячее прессование, газостатическое прессование или СВЧ-спекание – выбирают в зависимости от состава спекаемых материалов и необходимых свойств деталей. При массовом производстве целесообразно применять проходные туннельные печи непрерывного действия.

Механическая обработка спеченных деталей из керамики необходима для обеспечения заданных точности размеров и чистоты рабочих и сопрягаемых с другими деталями поверхностей. Всегда стремятся к минимизации количества удаляемого при механической обработке спеченного материала из-за большой трудоемкости в связи с высокой твердостью большинства материалов. Обработку производят преимущественно шлифованием и

полированием алмазосодержащими кругами и пастами. Для каждого материала подбирают наиболее производительный инструмент с наполнителем из естественного или искуственного алмаза и металлической, керамической или полимерной матрицей. Скорости и подачи при механической обработке невысокие для уменьшения повреждений в обрабатываемых деталях. Интенсифицировать процесс обработки удается наложением на инструмент ультразвуковых колебаний, реже применением лазерной обработки.

Контроль качества исходных материалов, параметров технологического процесса, контроль характеристик и дефектоскопия заготовок и готовых деталей из машиностроительной керамики в большей мере, чем для металлов, определяют воспроизводимость свойств материала, ресурс и надежность работы керамических деталей.

Входной контроль исходных материалов обычно состоит из определения химического, фазового и гранулометрического состава порошков, а также определения их удельной поверхности и содержания значащих примесей, содержания химически связанных и свободных углерода, азота, кислорода. Очень важно иметь надежных постоянных поставщиков исходных материалов, использующих постоянные и прогрессивные технологии изготовления сырья, поскольку при замене поставщика или изменении у него технологии часто необходима корректировка параметров технологии формования, даже при сохранении всех характеристик исходного материала в пределах, установленных ГОСТом, техническими условиями, сертификатом. Контроль параметров технологического процесса и режимов испытаний целесообразно вести в непрерывном режиме с записью на диаграммах. Контроль качества готовых деталей и узлов из керамики на соответствие чертежу, ТЗ и ТУ включает: контроль геометрии, поверхностных, подповерхностных и внутренних дефектов, микроструктуры, плотности, пористости и прочности на образцах-свидетелях, тепловую и механическую отбраковку.

Испытания являются завершающим этапом изготовления деталей и проводятся по программам, разработанным совместно исполнителем и заказчиком. Ответственные теплонапряженные конструкции из керамики проходят несколько уровней испытаний: исследовательские, заводские, совместные, государственные. Испытания проводятся на специальных стендах, воспроизводящих тепловые, механические, вибрационные, климатические и другие нагрузки, заданные техническим заданием. Совместные и государственные испытания проводятся в составе соответствующей техники: двигатели, ракеты и др., для которой они разрабатываются, по выбранным штатным режимам. При испытаниях керамических деталей крайне важно, чтобы конструкции стендов и особенно крепежной оснастки не создавали дополнительных нагрузок, не связанных с выполнением прямых функций деталью, и чтобы система управления обеспечивала строгое соблюдение не только режима нарастания нагрузок, но и, что особенно важно, режима уменьшения нагрузок.

5.1.3. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для керамики типовой технологический процесс существует только применительно к однотипным по размерам и сложности профиля деталям из одного материала, когда при их изготовлении изменяется только конструкция технологической и испытательной оснастки. При изменении состава и требуемых свойств материала технология претерпевает существенные изменения, хотя отдельные операции могут повторяться. Это отражено на рис. 5.1.1 и 5.1.2. Из рис. 5.1.1 следует, что изменение содержания Al_2O_3 с 97 до 99,5 % и активирующих спекание добавок потребовало изменить температуры обжига шихты, предварительного и окончательного обжига. Изменен также метод формования и газовые печи – на вакуумные при спекании.

На рис. 5.1.1 представлена также технологическая схема изготовления деталей из ZrO_2 с добавкой 6 мас. % Y_2O_3 порошка, получаемого совместным осаждением из гидратов. Применение исходных порошков оксидов циркония и иттрия вызовет изменение последовательности технологических операций в зависимости от состава и состояния порошков и увеличение температуры окончательного обжига. Изготовление из оксида циркония деталей твердого электролита потребует дополнительного регулирования газовой среды при окончательном обжиге.

Различные технологические схемы изготовления деталей из керамических материалов на основе аморфного диоксида кремния с различной пористостью приведены на рис. 5.1.2.

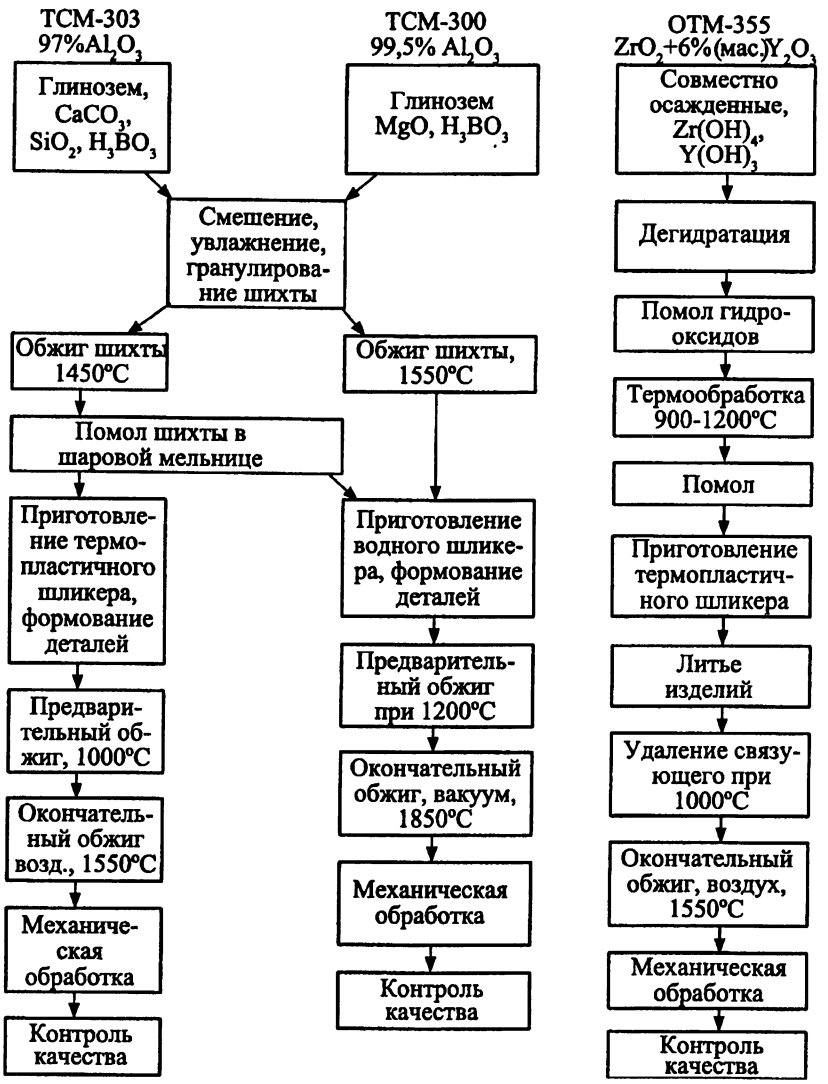


Рис. 5.1.1. Технологические схемы изготовления деталей из керамических материалов на основе Al_2O_3 и ZrO_2

Активаторы спекания материала ТСМ-107 – бор и его соединения – обеспечивают получение деталей с открытой пористостью 0...0,5 % на том же оборудовании и практически при той же температуре спекания.

Для спекания крупногабаритных, тонкостенных радиопрозрачных обтекателей из материалов ТСМ-107, Ниасит и других в ОНПП "Технология" разработаны и используются специальные электрические печи на рабочую температуру 1300 °С при скорости нагрева и охлаждения 50...500 °С. Высокая однородность температурного поля в деталях обеспечена автономным регулированием нагрева по шести зонам печи, вращением керамических заготовок вокруг оси и одновременным вращением пода печи, наличием специального подового нагревателя. В результате обеспечивается высокая однородность материала в керамических оболочках обтекателей.



Рис. 5.1.2. Технологическая схема изготовления деталей из керамических материалов на основе аморфного диоксида кремния

Разброс значений плотности и пористости по высоте обтекателей не превышает 1 %, прочности – 2...3 %, диэлектрической проницаемости – 2 %. Разброс этих же характеристик от обтекателя к обтекателю не превышает 3 %.

Технологические схемы (см. рис. 5.1.2) удобны для пользования при модифицировании материалов с целью изменения характеристик деталей: температурного коэффициента линейного расширения, коэффициента диффузного рассеяния, радиационной устойчивости, прочности, коэффициента черноты. Модифицирование осуществляется тремя методами: легированием исходного кварцевого стекла, введением добавок на операции приготовления водного шликера и пропиткой пористых заготовок водными растворами солей с последующим их термическим разложением.

Особенности механической обработки керамических изделий описаны в п. 5.1.2. Однако на обработке керамических оболочек обтекателей следует остановиться отдельно из-за крупных размеров, сложного профиля и жестких требований к точности геометрии. Оборудованием для механической обработки являются серийно выпускаемые промышлен-

ностью токарно-винторезные и шлифовальные станки. Токарно-винторезные станки дополнительно оснащаются специальными копирами для обработки внутренней и наружной поверхностей керамической оболочки, обеспечивающими воспроизведение профиля и толщины стенки оболочки с точностью до 0,1 мм. В качестве режущего инструмента применяют алмазные круги, сверла, фрезы, зенкеры. Относительно низкие твердость и модуль упругости позволяют вести механическую обработку с высокой для керамики производительностью по режимам: скорость вращения круга 30...35 м/с; частота вращения заготовки 30...40 мин$^{-1}$; продольная подача круга 0,2...0,3 мм/об; глубина резания 1,0...1,5 мм.

Глубина резания при завершающих проходах уменьшается на порядок. Высокая однородность материала и точность геометрии позволили исключить индивидуальную радиодоводку керамических оболочек радиопрозрачных обтекателей.

В технологической схеме изготовления изделий из реакционносвязанного нитрида кремния (РСНК) (табл. 5.1.3) для примера приведены основные контролируемые параметры после выполнения каждой операции. Взаимодействие кремния с азотом обеспечивает теоретическое увеличение массы на 66,7 %. Фазовый состав керамики следующий: $\alpha - Si_3N_4$, $\beta - Si_3N_4$.

Это типовая схема изготовления деталей из РСНК. Вариации технологии в основном обусловлены выбором и содержанием термопластичной связки при приготовлении шликера и состава пропитывающего полимера после механической обработки. Последняя операция решает две задачи: упрочнение материала продуктами деструкции полимера и защита поверхности детали от оксидирования. Эта операция повторяется до трех раз или совсем не проводится. Например, прочность при изгибе РСНК (марка ОТМ-904) без пропитки составляет 200 МПа (см. табл. 5.1.1), после трехкратной пропитки прочность возрастает до 270 МПа, а стойкость к оксидированию увеличивается на порядок. Для повышения прочности РСНК в исходный кремний вводят перед измельчением активирующие спекание добавки, и после реакционного спекания проводится дополнительное уплотнение при температуре примерно 1750 °С (материал УРСНК марки ОТМ-907). В результате этого прочность при изгибе возрастает до 500 МПа (см. табл. 5.1.1), линейная усадка при спекании возрастает до 4...6 %.

5.1.3. Технологическая схема изготовления изделий из реакционносвязанного нитрида кремния

Операция	Основные контролируемые параметры после выполнения операции
Измельчение	Удельная поверхность
Приготовление термопластичного шликера	Содержание связки
Формование заготовки, $T = 70...80$ °С	Неоднородности, сколы, трещины, внутренние дефекты (ренгеновская дефектоскопия)
Удаление связки, $T = 200$ °С	Остаточное содержание связки
Реакционное спекание в атмосфере азота, $T = 1450$ °С	Масса, контроль внутренних дефектов, визуальный контроль
Механическая обработка	Размеры, качество поверхности
Пропитка и термическая обработка, $T = 1300$ °С	Масса, внутренние и поверхностные дефекты, фазовый состав, микроструктура

Нитрид кремния начинает заметно диссоциировать в вакууме при температуре около 1400 °С, на воздухе и в атмосфере азота с давлением до 0,05 МПа при 1700 °С. При спекании заготовок из порошка нитрида кремния даже при введении активаторов спекания необходимы температуры не ниже 1900 °С. Для подавления диссоциации Si_3N_4 спекание проводят в вакуум-компрессионных печах при давлении азота не менее 2,0 МПА. Чем выше температура, тем больше давление азота. Изготовление деталей из нитрида кремния (материал СНК марки ОТМ-913) с использованием вакуум-компрессионной камеры осуществляется в такой последовательности: входной контроль исходных компонентов; жидкофазный помол и смешение компонентов (t = 100 ч); прокаливание шихты (T = 250 °С); приготовление термопластичного шликера; формование заготовки; удаление связки (t = 60...120 ч); компрессионное спекание (T = 1900 °С, p = 2,1 МПа);

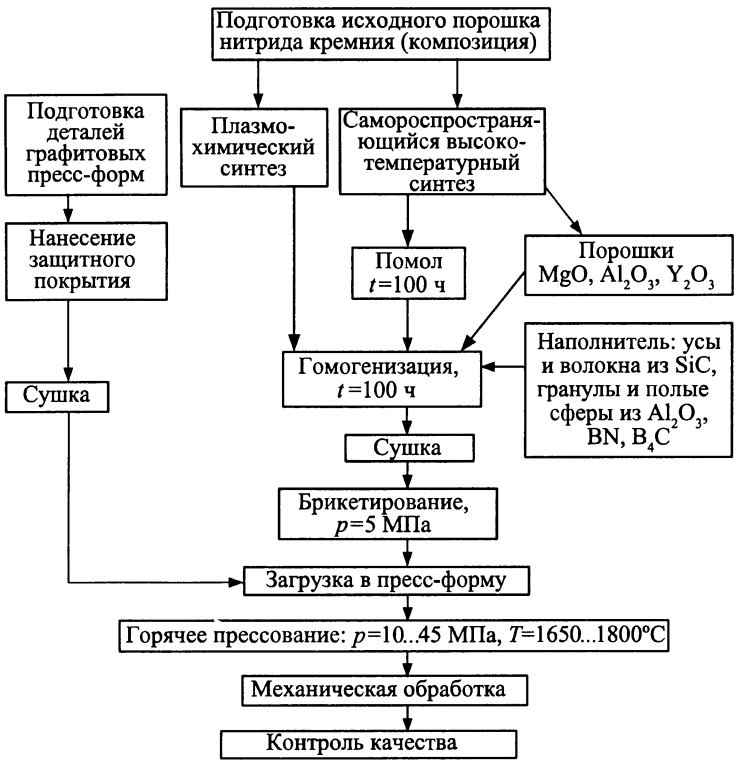


Рис. 5.1.3. Технологическая схема изготовления деталей из керамических и композиционных материалов на основе нитрида кремния методом горячего прессования

контроль качества; механическая обработка; контроль качества детали.

Еще большие значения прочности материалов на основе нитрида кремния получают при использовании метода горячего прессования (рис. 5.1.3).

К наиболее трудным относится технология изготовления деталей из чистого нитрида бора в связи с большой анизотропией кристаллической решетки и свойств материала. Нитрид бора с графитоподобной структурой порошка плохо формуется и спекается. Водное шликерное литье не применяется из-за взаимодействия с водой. При спекании заготовки увеличивают прочность, но увеличение размеров заготовки и пористости часто вызывает их растрескивание. Нужны специальные приемы, позволяющие преодолеть указанные трудности. Во-первых, это синтез ультрадисперсного порошка с сильно разупорядоченной кристаллической решеткой (аморфизированного порошка). Во-вторых, это введение в порошок полимерных добавок и временных связок, улучшающих формуемость порошка и полностью или частично удаляющихся в результате деструкции полимеров при спекании заготовок. В-третьих, это применение гидродинамического, взрывного прессования заготовок. Особенностью материалов на основе нитрида бора является их легкая обрабатываемость, в том числе металлическими резцами.

Завершающей операцией каждой технологии изготовления керамических деталей для машиностроения является контроль качества и отбраковка. В зависимости от жесткости требований по надежности и геометрии деталей объем контроля изменяется. Кроме того, для обеспечения требуемого качества готовой продукции и сокращения затрат вводится контроль исходных материалов и контроль после каждой технологической операции, как показано в табл. 5.1.3. Методы и оборудование для контроля керамических деталей и узлов двигателей приведены в табл. 5.1.4. Для контроля керамических обтекателей ракет применяют эти и другие методы. Например, отбраковку обтекателей проводят внутренним гидростатическим давлением в специально разработанной

5.1.4. Методы контроля качества и отбраковки керамических деталей для двигателей

Контролируемые объекты и параметры	Метод	Оборудование, приборы, инструменты	Диапазон рабочих параметров	Разрешающая способность (погрешность)
Исходное сырье и керамика	Химический	Спектрофотометр СФ-46	Длина волны 190...1100 нм	1 %
		Фотокалориметр КФК-2	T = 0,1...3000 К	1 %
	Рентгенофазовый	Дифрактометр ДРОН-3М	Номинальный ток 40 мА Номинальное напряжение 60 кВ	1 %
Поверхностные и подповерхностные де-фекты деталей	Люминисцентный	Нестандартное оборудование	–	10 мкм
	Визуально-оптический	Микроскоп МБС-9	7*	100 мкм
	Газосорбционный	Установка УГРД-1	–	0,1 мкм
Внутренние дефекты деталей	Рентгенографический	Аппарат РАП 150/300	Номинальное напряжение 50...100 кВ Номинальное напряжение 30...80 кВ	150... 200 мкм
	Рентгенотелевизионный	Аппарат РТУ (нестандартный)		50...100 мкм
Микроструктура керамики	Микроскопический	Микроскоп МИМ-8М	1000*	1 мкм
		Микроскоп МБС-9	7*	100 мкм
	Рентгенофазовый	Дифрактометр ДРОН-3М	Номинальное напряжение 60 кВ Номинальный ток 40 мА	1 %
Геометрия деталей	Ручной	Шаблоны Штанген-циркуль Микрометр	– 0...250 мм	– 250 мкм
	Автоматический	Нестандартное	–	50 мкм
Детали	Тепловая отбраковка термоциклированием	Газодинамический стенд	T = 1000...2500 К	2 %
		Электропечь	T = 300...1650 К	2 %

Продолжение табл. 5.1 4

Контролируемые объекты и параметры	Метод	Оборудование, приборы, инструменты	Диапазон рабочих параметров	Разрешающая способность (погрешность)
Устойчивость деталей к действию газового потока и центробежных сил	Газодинамический	Стенд ПД-101	T = 1000...5000 К	3 %
		Стенд ПЛ5-9/11 (МНПО "Союз")	T = 900...1900 К	2 %
	Инерционный	Стенд У-365 (ЦИАМ)	Частота вращения n = 18 000 мин$^{-1}$	–
		Стенд У-73 (Рыбинское КБ моторостроения)	n = 36 000 мин$^{-1}$	–

*Увеличение.

для этого камере. Прочность и другие важные параметры материалов для обеспечения работоспособности деталей контролируются стандартными методами на образцах-спутниках или вырезанных специально из предусмотренного технологического припуска деталей.

Технология изготовления деталей из сиалов подобна технологии изготовления изделий из нитрида кремния. Отличие состоит в том, что высокая реакционная активность системы и образование жидких фаз позволяют спекать заготовки без приложения давления и при более низких температурах. Например, при изготовлении деталей из иттриевого α-сиалона исходные порошки α-Si_3N_4, AlN и Y_2O_3 смешивают в шаровых мельницах, футерованных плиткой из α-сиалона, шарами из того же материала в среде гексана. Смесь сушат и формуют заготовки холодным изостатическим прессованием под давлением 147 МПа. Спекание заготовок осуществляют в среде азота при температурах 1700...1800 °С.

Технология изготовления деталей из композитов с керамической матрицей (ККМ) отличается от технологий изготовления изделий из керамики главным образом тем, что жесткие не спекающиеся волокна и усы препятствуют уплотнению матрицы, создавая в ней растягивающие напряжения. Только в методах принудительного уплотнения, при высоких давлениях и температурах, например, горячее прессование и горячее изостатическое прессование, технологические схемы изготовления ККМ и оборудование аналогичны применяемым при изготовлении деталей из керамики. Поэтому широкое развитие получили методы, основанные на введении матрицы в готовый каркас из армирующего наполнителя.

Методы формования каркаса из армирующего наполнителя в основном те же, что и при изготовлении деталей из полимерных композитов (ПКМ). Отличие состоит в наносимых защитных и податливых покрытиях на волокна, уменьшающих жесткость их связи с матрицей. Покрытие – это слой материала, наносимый или формирующийся на поверхности волокна, который контролирует механическое и химическое взаимодействие с матрицей. Как правило, покрытие формируют на основе углерода, нитрида бора и оксидов. Оно состоит из одного или нескольких слоев.

Методы введения матрицы в пористый каркас армирующего наполнителя основаны на пропитке жидкостями ее компонентов или конденсации из паровой фазы. При первом методе пористую волокнистую заготовку пропитывают жидким полимером, золем или суспензией под действием капиллярных сил или под давлением с последующей термообработкой для разложения пропитывающего состава

или сушкой суспензии и спеканием. Для уменьшения пористости заготовки и повышения прочности пропитку и термообработку повторяют несколько раз. Второй метод, чаще называемый химической инфильтрацией паров, основан на осаждении и разложении паров на разогретой до заданной температуры поверхности волокон заготовки. Метод позволяет получать плотные и прочные изделия из композитов, не требующие последующей термической и часто механической обработки. Однако он весьма длителен и сложен в управлении, поскольку температурное поле в заготовке и давление газа необходимо менять по мере уменьшения пористости. При изготовлении, например, композита на основе SiC матрицы и SiC волокна таким методом в процессе инфильтрации реализуются следующие реакции:

$$CH_4 \xrightarrow{1000\ ^\circ C} C + 2H2;$$

$$NH_3 + BCl_3 \rightarrow BN + 3HCl;$$

$$CH_3SiCl_3 + H_2 \rightarrow SiC + 3HCl + H_2.$$

Плотность готового материала составляет 85...90 % теоретической.

Кроме этих двух методов, реализуемых множеством технологий в зависимости от применяемых материалов, оборудования и решаемых задач, существует еще ряд методов, основанных на реакциях в системах твердое тело–жидкость, твердое тело–газ, для изготовления деталей из ККМ. Например, нанесение на волокна из SiC покрытия из Si и C с последующим формированием волокнистой заготовки и реакционным спеканием покрытия, а также пропитка заготовки из углеродных волокон жидким карбидообразующим металлом до полного или частичного превращения углеродного волокна в карбид. Матрица в заготовке из углеродных волокон может быть сформирована путем предварительного нанесения на волокно и/или пропитки высоконасыщенными полимерами, образующими при теплообработке карбиды или нитриды.

Все рассмотренные методы изготовления деталей из ККМ обладают определенными преимуществами и недостатками. При реализации любой из технологий стремятся: сохранить целостность волокнистого наполнителя и его исходные свойства, поэтому процессы ведут при минимально приемлемых температурах – ниже 1600 °С; создать плотную, прочную, устойчивую к оксидированию матрицу, сформировать на границе раздела волокно–матрица слой, обеспечивающий определенное проскальзывание волокна в матрице при приложении нагрузок.

5.1.4. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ

Из пп. 5.1.2 и 5.1.3 следует, что не имеется универсальной технологии и универсального оборудования для изготовления керамических деталей для машиностроения и что каждая технология имеет свои особенности и вариации в организации производства. Вместе с тем существуют особенности, характерные для всех технологий изготовления керамических деталей, которые следует учитывать при организации производства и которые рассматриваются ниже.

Выбор технологии и основного оборудования целесообразно выполнять на этапе разработки технологии с учетом типажа, назначения, технических требований объема производства. Несмотря на то что производство деталей из конструкционной керамики, как правило, является малотоннажным, требуемый объем производства может стать определяющим при выборе технологии. Например, при массовом многотоннажном производстве изоляторов свечей зажигания для автомобилей потребовалось применение холодного прессования на пресс-автоматах и проходных газовых печей непрерывного действия для спекания. Но и при малотоннажном производстве необходим анализ выбираемой технологии по производительности и себестоимости продукции.

Обеспечение технологической чистоты производства – непременное требование, решаемое на этапе подготовки производства. Все керамические материалы для машиностроения исключительно чувствительны к посторонним примесям и включениям даже в малом количестве. Поэтому каждая технологическая операция, как правило, выполняется в отдельном помещении. Недопустимо на одном и том же оборудовании работать с различными материалами – без тщательной очистки оборудования от остатков предыдущего материала.

Автоматизация всех технологических операций и контроля за соблюдением основных параметров необходима для обеспечения воспроизводимости свойств материала и характеристик деталей. Если на этапе разработки

технологии параметры отдельных технологических операций могут отрабатываться и на не автоматизированном оборудовании, то при подготовке производства эта задача должна решаться самостоятельно.

Контроль исходных как основных, так и вспомогательных материалов, результатов каждой технологической операции, готовой продукции, методы и параметры отбраковочных испытаний являются одной из важнейших составляющих производства керамических деталей машиностроения. Контролируемые параметры и методы контроля устанавливаются на этапе разработки материала и технологии. На этапе организации производства они модифицируются и автоматизируются с учетом технических требований и объема изготовления продукции. Например, в производстве керамических конструкционных материалов и деталей из них применяется только дистиллированная вода, однако дистилляторы производят разную воду и ее водородный потенциал и примесный состав должны контролироваться. Контролю подлежат и все применяемые в технологии газы, растворители, связующие. Для ответственных теплонапряженных изделий из керамики, таких, как обтекатели ракет, детали и узлы двигателей, агрегатов, при организации производства необходимо выбрать или разработать оборудование и методики термической и механической отбраковки готовых деталей. Это значительно повышает надежность выполнения служебных функций керамической деталью в составе сложной техники. Высокая надежность керамических обтекателей ракет в значительной мере обусловлена их отбраковкой при испытании внутренним давлением жидкости при напряжениях, составляющих примерно 80 % эксплуатационных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балкевич В.П.** Техническая керамика. 2-е изд. М.: Изд-во литературы по строительству, 1984.

2. **Янагида Х.** Тонкая техническая керамика. М.: Металлургия, 1986. 276 с.

3. **Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов. Л.: Энергия, Ленинградское отд., 1973. 333 с.

4. **Пивинский Ю.Е., Ромашин А.Г.** Кварцевая керамика. М.: Металлургия, 1974. 264 с.

5. **Уайэтт О., Дью-Хьюз Д.** Металлы, керамика, полимеры. М.: Атомиздат, 1979. 577 с.

6. **Власов А.С.** Керамика // Химическая энциклопедия: в 5 т. Т.2 / Редкол.: И.Л. Кунянц и др. М.: Советская энциклопедия, 1990. С. 371 – 372.

7. **Шаталин А.С., Ромашин А.Г.** Новые конструкционные материалы на основе керамики и композитов с керамической матрицей. Ч. 1. Конструкционные керамические материалы // Перспективные материалы. 2001. № 4. С. 5 – 16.

Глава 5.2

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

5.2.1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ИЗДЕЛИЯМ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Основными видами технического стекла, используемыми в машиностроении, являются упрочненное, безосколочное, термостойкое, отдельные виды оптического и кварцевого стекла. Другие виды технического стекла, в том числе светотехническое, электротехническое, электровакуумное, химико-лабораторное, полупроводниковое, дозиметрическое, а также стекловолокно, пеностекло, стеклянные трубы, стеклоизделия архитектурно-строительного назначения в настоящем разделе не рассматриваются.

Особенностью технических стекол для машиностроения является поставка их потребителю в виде готовых изделий, прошедших полный цикл технологической обработки.

Перечисленные в табл. 5.2.1 изделия из технического стекла одновременно выполняют две основные функции:

1. Конструктивную функцию, т.е. способность выдерживать при эксплуатации механические, тепловые, климатические и агрессивные воздействия вместе с конструкцией объекта, обладать необходимой надежностью, сохранять заданную герметичность;

2. Оптическую функцию, обеспечиваемую комплексом оптических характеристик (диапазон и уровень пропускания электромагнитного излучения, угловое отклонение, разрешающая способность и т.п.), сохраняемую в условиях эксплуатации.

5.2.1. Назначение изделий из технического стекла

Отрасль машиностроения	Изделия из технического стекла
Авиационная техника	Изделия остекления кабин и фонарей самолетов и вертолетов, встроенные фотолюки, обтекатели бортовых приборов
Космическая техника	Иллюминаторы космических аппаратов
Морская и глубоководная техника	Изделия остекления рубок, иллюминаторы
Наземные транспортные средства	Изделия остекления грузовых и легковых автомобилей, автобусов, троллейбусов, трамваев, локомотивов, вагонов поездов
Энергетические установки и высокотемпературные аппараты	Изделия (окна и смотровые люки) для котлов реакторов, сосудов высокого давления и т.п.)

Вследствие сочетания этих групп свойств такие изделия из технического стекла представляют особый класс – изделия конструкционной оптики (ИКО) со своими специфическими принципами конструирования, обеспечивающими благодаря применению различных прозрачных материалов и их сочетаний, склеивающих слоев, специальных покрытий, герметизирующих и соединительных материалов, разработке соответствующих технологий их производства и методов испытаний, успешное выполнение всех возлагаемых на ИКО функций в широком диапазоне условий эксплуатации и видов внешних воздействий.

Наиболее полный комплекс жестких технических требований предъявляется к остеклению авиационных и космических аппаратов.

Важнейшие требования к остеклению самолетов и вертолетов:

1. Выдерживать кратковременные и длительные статические, а также динамические нагрузки, соответствующие требованиям, предъявляемым к конкретному ЛА, с высокой надежностью и ресурсом, сопоставимым с ресурсом планера;

2. Светопропускание должно быть в пределах 60...85 %, светорассеяние не должно превышать 2,5 %. Остекление должно исключать недопустимые изломы линии горизонта, приближение и удаление, деформацию и игру изображения (нарушение пропорций частей рассматриваемых объектов), не должно пропускать излучения, вредно действующие на организм человека;

3. Поверхность остекления должна быть абразивостойкой, т.е. устойчивой к царапанию и воздействию абразивных частиц, вызывающих снижение пропускания и увеличение светорассеяния, выдерживающей дождевую эрозию, град;

4. Остекление не должно запотевать и обледеневать, для чего должен быть предусмотрен электрообогревающий элемент или другие средства;

5. Рабочие температуры в зависимости от типа ЛА могут меняться от –60 до +200 °С и выше;

6. Остекление должно быть как можно более легким.

Требования стойкости к внешним воздействиям – это стойкость к механическим факторам, синусоидальной и случайной широкополосной вибрациям, механическим ударам одиночного и многократного действия, линейному ускорению, акустическим шумам, воздействию ионизирующей радиации.

Все авиационные ИКО, попадающие в аэродинамический поток, должны быть стойкими к соударению с птицей массой 0,9...1,8 кг при всех скоростях полета на высотах до 2500 м. При столкновении остекление должно сохранять неразрушенным внутреннее стекло, обращенное в кабину; не должно происходить его опасного разрушения, потери герметичности, недопустимых нарушений видимости.

Для остекления боевых самолетов и вертолетов, наземной техники используются многослойные пулестойкие ИКО (прозрачная броня), конструкция которой зависит от заданных защитных свойств (калибр и скорость пули, угол встречи).

Основными климатическими факторами, стойкость к которым должна быть обеспечена, являются атмосферное пониженное давление, повышенная и пониженная температура, по-

вышенная влажность, соляной морской туман, роса и пыль, общее солнечное и ультрафиолетовое облучение.

Для защиты от обледенения в конструкцию ИКО вводится электронагревательный элемент, обогревающий наружное стекло. Защищенный от обледенения участок изделия должен перекрывать взлетно-посадочные и приборные зоны ИКО. Температура нагрева регулируется с помощью встроенного в конструкцию ИКО термодатчика. При питании переменным током под напряжением 200/115 В электронагревательный элемент выполняется в виде пленки на стекле. При питании постоянным током 27 В задача решается с помощью тонкой молибденовой проволоки, сетка из которой помещается между стеклами и не препятствует наблюдению через стекло. Возможно, также, применение токопроводящей пленки с сопротивлением менее 10 Ом. При средней удельной мощности свыше 0,5 Вт/см^2 электронагревательные элементы должны иметь не менее двух ступеней регулировки обогрева. При наличии противообледенителя нормативное светопропускание изделия должно быть не менее 60 %.

Комплекс разнообразных функций, выполняемых прозрачными оптическими элементами на борту космического аппарата, и жесткие условия их работы предъявляют к ним специфические требования в условиях жестких весовых ограничений.

Прозрачный элемент, являясь частью оптической системы и работающий в комплексе с оптической аппаратурой в различных диапазонах длин волн, должен иметь соответствующие характеристики диапазона и уровня пропускания, обеспечивающие работу оптического прибора или визуальное наблюдение и минимизацию оптических искажений в сложных условиях полета (космическая пыль, микрометеориты, высокие и низкие температуры с их темпами и градиентами, абляция материала и конденсация паров, интенсивное световое облучение и ионизирующая радиация, вакуум и т.д.). В то же время прозрачный элемент, являясь частью конструкции аппарата, испытывает вместе с корпусом корабля те же механические и тепловые нагрузки (в особенности на участках вывода на орбиту и спуска) и должен обладать надежностью, соответствующим запасом кратковременной и длительной прочности, жаропрочностью, ресурсом и т.д.

Для изделий, работающих в морской среде, основными требованиями являются прочность, химическая устойчивость, а также особые требования к герметичности конструкций, работающих под высоким давлением.

Стекла, используемые в смотровых окнах высокотемпературных аппаратов, сосудов под высоким давлением, энергетических установок, должны обладать высокими термомеханическими характеристиками, химической устойчивостью, а в отдельных случаях – повышенной радиационной стойкостью.

5.2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

Основным материалом для изготовления ИКО авиационного назначения является термически полированное листовое силикатное стекло, в состав которого входят 72...73 % SiO_2, 13...13,5 % Na_2O, 7...9 % CaO, 3...3,5 % MgO, 1,5...2 % Al_2O_3, 0,01 % Fe_2O_3, вырабатываемое методом формования на поверхности расплава олова (флоат-процесс)

Стекло вырабатывается в виде бесконечной ленты толщиной 3...20 мм, шириной 1200...3200 мм, которая режется на листы-форматки длиной 1600...6000 мм и шириной 1000...3000 мм или других размеров в соответствии с требованиями заказчика.

Силикатное стекло является абразиво-, водо- и кислотостойким материалом, растворяется только во фтористоводородной (плавиковой) кислоте и щелочах, что используется при упрочнении травлением. Температура размягчения 600...750 °С, температура начала деформации 510...530 °С, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) (85...90) · 10^{-7} K^{-1} в интервале 0...300 °С. Термические свойства стекла определяют выбор режимов упрочнения закалкой.

Пределы прочности стекла на растяжение и изгиб в 10 раз меньше, чем на сжатие, поэтому под прочностью стекла всегда подразумевают его прочность на изгиб или растяжение, так как именно эти величины определяют прочность изделий.

Теоретическая прочность стекла, рассчитанная на основе прочности внутренней химической связи между атомами, чрезвычайно высока и находится на уровне 25...30 ГПа, практически не завися от состава стекла. Однако реальная прочность стекла в сотни раз ниже из-за дефектов на его поверхности и кра-

ях, возникающих при выработке, резке, транспортировке, хранении, переработке и служащих концентраторами напряжений, поэтому требуются специальные меры по защите поверхности и кромки стекла. При увеличении поверхности стеклянного образца или изделия вероятность встретить опасные дефекты увеличивается, в связи с чем прочность снижается (масштабный фактор). При поперечном изгибе прочность сырого стекла не превышает 30...50 МПа. При испытании по методу центрального симметричного изгиба, исключающему влияние края стекла, прочность достигает 100...150 МПа.

Для защиты поверхности стекла от повреждения служат различные технологические покрытия, удаляемые с поверхности на последних стадиях технологической переработки. Это позволяет сохранить прочность сырого стекла на более высоком уровне.

При изготовлении ИКО используется в основном силикатное стекло, упрочненное различными методами.

Поскольку прочность стекла зависит главным образом от состояния его поверхности, его упрочняют, устраняя поверхностные дефекты (микротрещины, посечки, царапины) с помощью химического травления, или локализуют их разупрочняющее действие созданием в поверхностных слоях значительных сжимающих напряжений, препятствующих распространению трещин. Для создания таких напряжений используют термическую закалку стекла на воздухе и в кремнийорганических жидкостях, ионный обмен (обработка стекла в расплавах щелочных солей) или другие менее распространенные способы (поверхностная кристаллизация, накладные стекла).

Особенно эффективны комбинированные способы упрочнения, сочетающие улучшение качества поверхности с созданием сжимающих напряжений, например, закалка с травлением, ионный обмен с травлением (табл. 5.2.2).

Важнейшим материалом, используемым в настоящее время в качестве прозрачного элемента космического аппарата, жаропрочного остекления самолетов, свето- и ИК-прозрачных люков бортовых оптических приборов, является кварцевое стекло, обладающее высокими показателями отдельных свойств и их благоприятным сочетанием. Являясь практически однокомпонентным веществом (содержание SiO_2 99,99...99,999 %), кварцевое стекло может быть получено различными способами, не допускающими внесения нежелательных примесей.

5.2.2. Влияние обработки стекла на его прочность

Состояние стекла	Предел кратковременной прочности при изгибе, МПа
Сырое	30...80
Отожженное	90...120
Упрочненное:	
воздушной закалкой	120...180
жидкостной закалкой	200...400
ионным обменом	300...700
травлением	1500...2000
комбинированными способами	1700...2500

Большинство физических свойств кварцевых стекол различных марок одинаково: плотность 2,203 г/см^3, модуль упругости 74,5 ГПа, температурный коэффициент линейного расширения в интервале 20...1000 °С – около $5 \cdot 10^{-7}$ К$^{-1}$.

Среди известных стеклообразных материалов кварцевое стекло отличается наиболее высокой термостойкостью, способно выдерживать без разрушения резкие теплосмены или градиенты температур до 1000°. В то же время прочность кварцевого стекла невысока (при поперечном изгибе 50...70 МПа), а различные виды неоднородностей, возникающих при наплавлении блока стекла, приводят к расширению дисперсии прочности и, следовательно, к снижению ее расчетных значений. В связи с чрезвычайно низким ТКЛР кварцевое стекло не может быть упрочнено закалкой.

Для ИКО, работающих при температурах свыше 150 °С или испытывающих резкие теплосмены, в качестве прозрачных элементов используются термостойкие стекла оптического качества.

Термостойкость изделий из стекла, помимо свойств самого стекла, зависит от размеров и формы изделий, толщины стекла. Термостойкость наиболее сильно зависит от температурного коэффициента линейного расширения, поэтому можно считать, что термостойкость обратно пропорциональна его величине. Термостойкими являются все стекла с низким (менее $60 \cdot 10^{-7}$ К$^{-1}$) температурным коэффициентом линейного расширения, а также стек-

ла, подвергнутые закалке и химическому упрочнению.

По химическому составу термостойкие стекла подразделяют на следующие:

– боросиликатные (ЛК-5, ОТМ 007, ОТМ 010, СЭТ-1, МКР, симакс, пирекс и др.));

– алюмосиликатные (136, ТСМ 508);

– алюмоборосиликатные (316, ТСМ 504, ТРЛ 10, ОТМ 015, ТСМ 506, ТСМ 507).

Все эти стекла имеют низкий ТКЛР ($(37...48) \cdot 10^{-7}$ K^{-1}) и высокую температуру размягчения (650...850 °С), поэтому обладают термостойкостью на уровне 150...200 °С. После упрочнения закалкой термостойкость возрастает примерно на 150...200 °С, однако из-за реалаксации закалочных напряжений температура длительной эксплуатации закаленных стекол не должна превышать 300 °С.

Разработаны составы специальных щелочных алюмосиликатных стекол для ионного упрочнения (ТСМ 404, ТСМ 405, ТСМ 412, ОТМ 16, кемкор, геркулит). Эти стекла, несмотря на высокий ТКЛР ($(60...95) \cdot 10^{-7}$ K^{-1}), приобретают высокую прочность (400...450 МПа) и термостойкость (200...400 °С) после упрочнения в расплаве натриевой или калийной селитры.

Для изготовления ИКО, работающих в составе бортовых авиационных и космических приборов и систем в инфракрасной области спектра, требуются материалы, обладающие необходимым уровнем пропускания в заданном спектральном диапазоне, механической (конструкционной) прочностью, термостойкостью и химической устойчивостью. В этих целях используются несиликатные стекла:

– алюминатные (АКС-3, ТСМ 205, ТСМ 209, БС-14, ИКС-15);

– галлатные (ИКС-213, ТСМ 202, ТСМ 207, ТСМ 212);

– германатные (ГА-13-9, ТСМ 221М, ТСМ 233, ТСМ 224).

Они обладают рядом преимуществ по сравнению с ИК-прозрачными кристаллическими материалами, отличаясь высокой оптической однородностью, относительной простотой технологии, возможностью получения заготовок больших размеров различной формы. В связи с высокой ТРКЛ таких стекол ($(80...110) \cdot 10^{-7}$ K^{-1}) для повышения термостойкости требуется упрочнение. Кроме того, из-за их недостаточной химической устойчивости возникает необходимость нанесения ИК-прозрачных защитных покрытий.

5.2.3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Технология производства изделий из технического стекла включает следующие операции: резку, механическую обработку стекла (фацетирование, шлифование, полирование), формообразование (моллирование, прессование), упрочнение, нанесение покрытий и электроконтактов (шинок), сборку, склейку прозрачного элемента, обрамление и герметизацию (заделку в арматуру).

Резка стекла. Одной из начальных операций при производстве изделий является резка силикатного стекла на заготовки требуемых размеров. Наиболее распространенным способом служит механическая резка, заключающаяся в нанесении специальным инструментом глубокой царапины (трещины) на лист стекла по периметру заготовки с последующим созданием растягивающих напряжений, приводящих к разрушению стекла по линии надреза и отделению заготовки (отломке). В качестве режущего инструмента используется алмаз или твердосплавный ролик. Диаметр и угол заточки ролика выбирается в зависимости от толщины стекла: чем тоньше стекло, тем больше диаметр и острее угол. Заготовки вырезаются вручную по фанерным шаблонам с учетом припуска на последующую обработку края или по специально разработанной программе на автоматических столах резки.

Для резки стекла толще 15 мм используются алмазные диски, пилы и ленты. Таким же способом режутся специальные стекла и оптическая керамика. Другие способы резки стекла, например, газопламенная, плазменная, лазерная, электронагревательная, индуктивная, гидроабразивная, несмотря на определенные преимущества, пока не получили широкого распространения из-за аппаратурных и технологических сложностей.

Механическая обработка стекла. Качество края стеклозаготовки оказывает существенное влияние на прочность и надежность изделий, поэтому после вырезания детали ее край подвергается механической шлифовке (фацетированию) свободным или связанным абразивом. Получаемая кромка может иметь различный профиль-фаску (прямой, притупленный, валик, полувалик и т.п.). В необходимых случаях в целях повышения прочности

или снижения светорассеяния фаску дополнительно полируют.

Край обрабатывают свободным абразивом (водной суспензией порошка корунда или карборунда) на вращающейся чугунной шайбе. Для обработки связанным абразивом используют алмазный инструмент – диски с плоской или профилированной кромкой, ленты.

В последнее время начинают применять процессы тепловой обработки (оплавления) края силикатного стекла с помощью газовых горелок или плазмотронов, что несколько повышает прочность деталей по сравнению с механически обработанными, но требуются специальные меры по отжигу термических напряжений.

Термически полированное силикатное стекло (флоат-стекло), прошедшее входной технологический контроль на соответствие требованиям к авиационному остеклению, не нуждается в дополнительной механической обработке поверхности.

Для изготовления прецизионных оптических деталей из специальных термостойких и оптических стекол с высокими требованиями по плоскостности и форме поверхности необходима механическая обработка. Кроме того, такая обработка может одновременно повысить прочность материалов, не способных к упрочнению другими способами, например, кварцевого стекла. С этой целью используется многостадийный процесс глубокой шлифовки-полировки (ГШП), обеспечивающий устранение нарушенного трещиноватого поверхностного слоя стекла, образующегося при одностадийной шлифовке и лишь заглаживаемого при полировке.

Последовательность изготовления оптических деталей в процессе ГШП включает следующие стадии:

1. Грубое шлифование – процесс получения из полуфабрикатов шлифованной заготовки требуемой формы и размеров с припусками на последующую обработку. При этом удаляется значительное количество материала. Для грубого шлифования используют абразивные шлифпорошки различных фракций, а также грубозернистый алмазный или абразивный инструмент. Высота микронеровностей получаемых поверхностей составляет 20…80 мкм;

2. Среднее шлифование – процесс, целью которого является сглаживание и измельчение микрорельефа, полученного при грубом шлифовании, и придание заготовке более точных размеров. Обработка осуществляется тем же способом, высота получаемых микронеровностей 10…25 мкм;

3. Тонкое (мелкое) шлифование – дальнейшее измельчение микрорельефа и повышение чистоты поверхности с целью подготовки к полированию. Размер абразивных зерен инструмента не превышает 25 мкм, что дает тонкую матовую фактуру поверхности с высотой неровностей до 4 мкм. Поверхность контролируется на наличие допустимых царапин и других дефектов;

4. Полирование – процесс удаления матовой фактуры и придания поверхности заданной оптической чистоты и точности – осуществляется с помощью полирующих порошков, наносимых на упругопластичную поверхность инструмента. Средняя высота неровностей поверхности 0,05…0,1 мкм. .Допустимые дефекты регламентируются стандартом по классу чистоты оптических деталей.

Формообразование деталей из листового стекла. Для придания остеклению летательного аппарата формы, обеспечивающей необходимые аэродинамические характеристики, используется способность листа стекла, разогретого до пластического состояния, изменять свою форму под действием собственного веса (моллирование) или специальных приспособлений и устройств (гнутье, прессование) и сохранять ее после охлаждения. Существуют способы так называемого принудительного моллирования под действием механической нагрузки или вакуума и комбинированные способы формообразования, сочетающие свободное и принудительное моллирование. К гнутым стеклодеталям предъявляют следующие основные требования: соответствие заданной форме (минимальное отклонение от контрольного шаблона или координат контрольных точек); оптические показатели и качество поверхности стекла; пригодность для дальнейшей обработки.

Моллирование осуществляется на чугунных формах, кривизна поверхности которых соответствует форме изготовляемой детали (рис. 5.2.1). При моллировании на сплошных формах стекло контактирует с металлической поверхностью во всех точках. На такую массивную форму требуются большие затраты энергии на разогрев, кроме того необходимо высокое качество формующей поверхности,

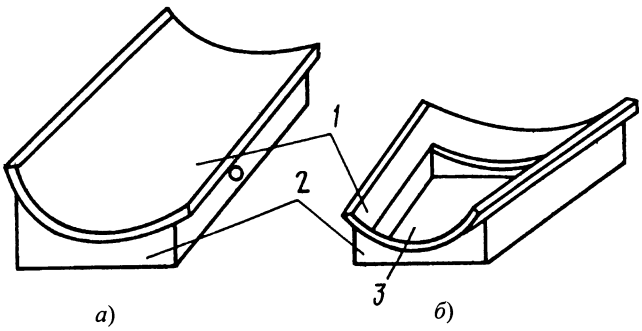


Рис. 5.2.1. Чугунные формы для моллирования:
а – сплошная, *б* – рамочная, *1* – формующая поверхность; *2* – опора, *3* – проем

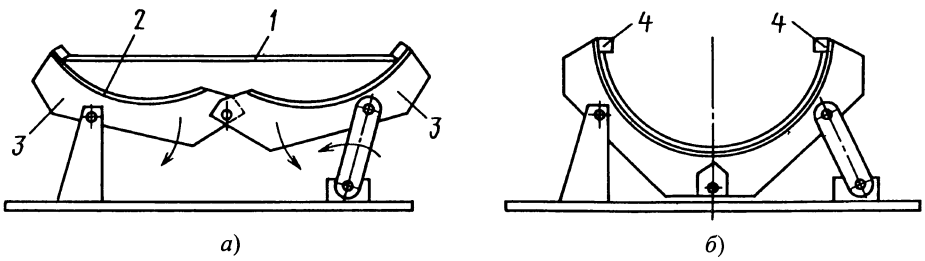


Рис. 5.2.2. Шарнирно-рычажная рамка для моллирования:
а – до изгибания стекла; *б* – после окончания моллирования, *1* – лист стекла, *2* – формирующая поверхность, *3* – полуформы; *4* – упоры-ограничители стекла (стрелками показаны направления движения вращающихся элементов рамки в процессе моллирования)

так как любые шероховатости и неровности отпечатываются на стекле, а попадание осколков стекла или инородных частиц на форму может привести к браку стекла. В то же время при такой форме не требуется тонкое тепловое регулирование процесса, обеспечивается полная воспроизводимость конфигурации всех снятых с нее деталей.

Повышения качества поверхности стекла, получаемого на сплошных формах, достигают путем применения технологических подложек (дополнительный лист стекла, стеклоткань), предохраняющих моллируемое стекло от соприкосновения с формой. Обдув воздухом нижней поверхности формуемого листа способствует удалению инородных частиц с формы, а кроме того остужает ее и делает стекло невосприимчивым к рельефу и дефектам рабочей поверхности формы.

Широкое распространение в США и Западной Европе получили керамические формы с воздушной подушкой, создаваемой струей горячего воздуха под давлением через капиллярные отверстия в форме.

Наибольшее распространение получили формы моллирования, имеющие проем в центральной части формующей поверхности (рис. 5.2.1, *б*). В этом случае лист стекла контактирует с формой только по периметру и не приобретает отпечатков, отлипов и других дефектов в рабочем поле.

В целях снижения массы и тепловой инерционности сплошных форм, а также создания универсальной переналаживаемой формующей оснастки применяют устройства с формующей поверхностью в виде гибкого жаропрочного листа с регулируемым профилем. Минимум контакта со стеклом обеспечивают "ножевые" формующие рамки.

Гнутые стекла сложной конфигурации с участками резкого перегиба или большим углом раскрытия получают с помощью шарнирно-рычажных или шарнирных рамок (рис. 5.2.2).

Важнейшим условием изготовления слоистой панели из нескольких листов стекла является эквидистантность поверхностей склеиваемых заготовок, при нарушении которой резко ухудшаются оптические характери-

стики композиций, возникают дополнительные напряжения при склейке. Способом избежать этого является совместное изгибание двух и более заготовок, предназначенных для склеивания. Для того чтобы при моллировании такого пакета стекла не смещались относительно друг друга, применяют установку ограничителей и упоров по контору пакета, а для их полного прилегания между собой создают более высокую температуру в верхней части печи, что сильнее размягчает верхние листы. Для устранения слипания стекол между собой на соприкасающиеся поверхности наносят слой мягкого порошка, например, углеродной сажи, оксида магния.

Одним из распространенных методов принудительного формования стекла является вакуумное формование, используемое для получения деталей сложной формы, в том числе такой, которую невозможно развернуть в плоскость (например, часть сферы).

Для получения деталей с разным знаком кривизны поверхности в различных участках используется прессование размягченного стекла между матрицей и пуансоном или моллирование с использованием промежуточных форм с окончательной доводкой детали под действием вакуума.

Упрочнение стекла. Важнейшей технологической операцией, обеспечивающей эффективное применение изделий из технического стекла, является упрочнение. Для производства упрочненного стекла наибольшее распространение получила воздушная закалка. Закаленное стекло (ЗС) отличается от исходного (сырого) стекла повышенной в 4–5 раз прочностью (120...300 МПа) и характером разрушения, дающего мелкие (до 2 см) округлые осколки. Воздушная закалка состоит в нагревании стекла в электрической печи до 530...750 °С в зависимости от температуры его размягчения, выдержке при этой температуре и резком охлаждении струями воздуха, нагнетаемого через обдувочные решетки различных конструкций, обеспечивающих двухстороннее равномерное охлаждение листа. Нагрев и охлаждение листа осуществляется в вертикальном или горизонтальном положении в агрегатах (печь + решетка) непрерывного или периодического действия. В результате закалки в поверхностных слоях листа создаются сжимающие напряжения, скомпенсированные напряжениями растяжения внутри листа (рис. 5.2.3). Вследствие нелинейного распределения напряжений поверхностное сжатие в 3 – 3,5 раза выше максимального растяжения. Так как разность сжимающих и растягивающих напряжений возрастает с увеличением толщины стекла, воздушная закалка наиболее эффективна для листов толще 5 мм. О прочности закаленного стекла можно судить по степени закалки, измеряемой величиной двупреломления (разности хода лучей, отнесенной к 1 см пути света и выраженной в порядках на N/см), наблюдаемого в рефрактометре при пропускании поляризованного света вдоль слоев, испытывающих растяжение. Степень закалки возрастает с увеличением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и модуля упругости стекла, толщины листа и интенсивности охлаждения. Поэтому для тонких (менее 4 мм) листов или стекол с низким ТКЛР (термостойких) воздушная закалка мало-

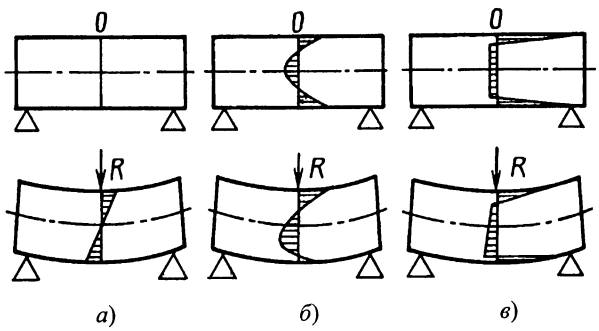


Рис. 5.2.3. Эпюры напряжений в отожженном (*а*), закаленном (*б*) и ионоупрочненном (*в*) стекле; *R* – внешняя нагрузка

эффективна. Для изготовления гнутых закаленных стекол им предварительно придают заданную кривизну прессованием или моллированием. Промышленное воздушно-закаленное стекло (секурит, сталинит) в виде плоских или гнутых листов толщиной 4,5...6,5 мм со степенью закалки 2...4 N/см широко используется для остекления легковых и грузовых автомобилей, автобусов, троллейбусов, трамваев, железнодорожных вагонов, морских и речных судов. Так как любая механическая обработка ЗС, за исключением небольших исправлений поверхности шлифованием и полированием, приводит к его разрушению, все операции по резке, обработке кромок, сверлению и другие проводятся до закалки.

Для повышения прочности листовых стекол до 300...400 МПа, а также закалки тонких и термостойких стекол применяется жидкостная закалка (ЖЗ). В качестве охлаждающей среды используются органические и кремнийорганические жидкости, металлические порошки, взвешенные в струе воздуха (псевдожидкая среда). ЖЗ осуществляется различными способами, в том числе погружением, распылением. С целью предотвращения опасных временных напряжений, возникающих при контакте сильно разогретых листов с жидкостью, вводят предварительное воздушное охлаждение стекла (двухстадийная закалка). Несмотря на высокую прочность получаемых стекол, ЖЗ пока не нашла широкого применения и используется в России, главным образом, для упрочнения небольших листовых деталей и фасонных изделий светотехнического назначения, а за рубежом также и для производства высокопрочного многослойного авиастекления (процесс "тен-твенти").

Все большее распространение получает технология упрочнения стекла ионным обменом, состоящим в диффузионном замещении щелочных ионов поверхностного слоя стекла на более крупные щелочные ионы из внешнего источника при температуре ниже размягчения стекла. Ионно-обменное упрочнение (ионный обмен, низкотемпературный ионный обмен, ионная набивка, химическая закалка) происходит при контакте листового стекла, содержащего Na, с расплавом KNO_3. В стеклах специальных составов, содержащих Li+, он может быть замещен на Na+ из расплава $NaNO_3$. При таком замещении собственных ионов стекла на более крупные сжимающие напряжения, в отличие от закалочных, сосредоточены в тонком поверхностном слое (до 120 мкм) и превышают закалочные в 3–4 раза, достигая 500...600 МПа при существенно сниженных растягивающих напряжениях внутри листа. Сжимающие напряжения и глубина сжатого слоя зависят от температуры и продолжительности обработки. Процесс ионного обмена осуществляется при погружении стекла в футерованную ванну с расплавом селитры при 450 °С и выдержке его в течение времени, необходимого для достижения заданной глубины сжатого слоя. Флоат-стекло с тонким сжатым слоем (20...50 мкм) получают за 5...10 ч. Большая глубина достигается при продолжительности обработки более 100 ч. Ускорение процесса диффузии ионов путем повышения температуры невозможно, так как происходит термическая релаксация полезных напряжений. Процесс интенсифицируется путем введения добавок – катализаторов в расплав.

Упрочнение стекла путем удаления поверхностных дефектов травлением (химическое полирование) приводит к наибольшему возрастанию прочности (до 2000 МПа). Несмотря на отсутствие остаточных напряжений, такое стекло при сильном изгибе или ударе благодаря высокой энергии деформации разрушается с образованием очень мелких осколков или стеклянного порошка. Травление проводится в футерованных кислотоупором ваннах с плавиковой кислотой при комнатной температуре. Для максимального упрочнения глубина травления должна быть не менее 150...200 мкм. Из-за большой чувствительности даже к незначительным повреждениям травленые стекла необходимо защищать непосредственно после упрочнения с помощью полимеризующихся покрытий, наносимых окунанием, поливом или распылением.

Нанесение пленочных покрытий. Для придания изделиям необходимых оптических, электрических, прочностных и других специальных свойств используют различного рода прозрачные покрытия: электропроводящие (электрообогревные, антистатические, СВЧ-защитные), оптические (просветляющие, солнцезащитные, теплоотражающие, светофильтрующие), защитные (абразивостойкие, химически стойкие).

Электрообогревный антиобледенительный элемент изделия получают путем нанесения на поверхность стекла слоя металла или полупроводникового оксида, толщина которо-

го определяется задаваемым удельным поверхностным сопротивлением и светопропусканием (с уменьшением толщины растут сопротивление и пропускание). Наибольшее распространение для этой цели получили оксиды олова, цинка, сурьмы, индия, никеля.

Подвод тока к электропроводящим покрытиям осуществляется с помощью силикатно-серебряных или медных шинок, наносимых на стекло и припаянных к ним токовводов.

В целях повышения пропускания, снижения отражения и устранения световых бликов, в особенности на приборных иллюминаторах, используют оптические покрытия на основе оксидов кремния, алюминия, таллия, фторида магния и их смесей. Применение одно-, двух- и трехслойных покрытий снижает отражение от каждой поверхности стекла с 4 до 0,5% в видимой части спектра.

Для просветления ИК-прозрачных оксидных стекол в области 1,8...5,2 мкм и одновременно повышения их химической стойкости используют защитно-просветляющие покрытия на основе фторида магния и оксида кремния.

Токопроводящие покрытия наносят на стекло термохимическими или вакуумными методами.

К первой группе методов относится получивший наибольшее распространение аэрозольный способ, при котором на разогретое до 600...700 °С стекло с помощью воздушных распылителей (форсунок) наносят водно-спиртовой раствор хлоридов олова или индия с добавками различных элементов. При этом на поверхности стекла последовательно проходят реакции, в результате которых пленка, содержащая оксид, диоксид и металлическое олово приобретает полупроводниковые свойства с заданным электросопротивлением, зависящим от температуры, концентрации раствора и легирующих добавок. Такого же рода гидролитическая реакция происходит при использовании хлорида индия.

Способ обладает высокой производительностью, пригоден для автоматического регулирования, обеспечивает широкий диапазон электрических и оптических характеристик покрытий. Недостатком его является необходимость разогрева стекла до температуры, близкой к области размягчения, что может вызвать деформацию пластины и ухудшение ее оптических показателей. Кроме того, необходимо принимать меры по удалению и нейтрализации паров соляной кислоты.

Вакуумные методы нанесения покрытий позволяют получать пленки с улучшенной структурой и высокой стабильностью характеристик при температуре подложки не более 350 °С. В числе этих методов – термическое испарение-конденсация легкоплавких металлов, например, индия, осуществляемое в вакууме $10^{-1}...10^{-4}$ Па, или электронно-лучевое испарение более тугоплавких металлов. Преимуществом методов испарения является возможность использования стандартной вакуумно-напылительной аппаратуры и отработанность технологии. К недостаткам относится невысокая адгезия покрытия, затрудненная регулировка процессов окисления металла при его конденсации, что снижает воспроизводимость характеристик пленки.

Эти недостатки отсутствуют в высокоэнергетических методах напыления, в том числе ионно-плазменном, катодном, высокочастотном катодном, магнетронном. Для катодного распыления, создающего большую однородность покрытия, прибегают к бомбардировке металлической мишени в электрическом поле ионами различных элементов, под действием которой происходит эмиссия атомов напыляемого металла и осаждение их на стекле. Для получения покрытия из оксидов распыление металла осуществляют в среде разряженного кислорода под давлением (реактивное катодное распыление). Наиболее часто катодное распыление проводят в тлеющем разряде (плазме), возбуждаемом в инертном газе.

Магнетронное распыление повышает производительность процесса благодаря использованию магнитного поля, перпендикулярного к электрическому, что приводит к более эффективному использованию ионов, которые двигаются по криволинейным траекториям. Благодаря высокой энергии осаждающихся частиц происходит ионная очистка поверхности, внедрение их в подложку с образованием переходного слоя, что обеспечивает высокую адгезию покрытия.

Оптические (интерференционные) покрытия, изменяющие пропускание и отражение света прозрачным элементом ИКО, как правило, являются диэлектрическими. Для их нанесения используют методы химического осаждения из растворов или газовой (парообразной) фазы при температурах 300....400 °С или вакуумными методами. При этом на под-

ложке происходят химические реакции с образованием соединения с необходимыми оптическими свойствами.

Склейка композиций. В целях предотвращения разлетания осколков сырого или закаленного стекла при его разрушении, а также сохранения высокой прочности ионоупрочненных и травленых стекол в условиях эксплуатации их используют внутри слоистых композиций (ламинированное стекло). Простейшим способом получения безопасных автомобильных стекол служит наклеивание (плакирование) прозрачной полимерной (полиуретановой, полиэфирной) пленки, удерживающей осколки при разрушении стекла. Более высокой безопасностью обладает ламинированное стекло, в том числе триплекс – трехслойное изделие из двух листов стекла, склеенных по всей площади промежуточным слоем прозрачной пленки (поливинилбутираль, полиуретан) толщиной 1...2 мм, или жидкого полимера (полиакрилат, полиуретан), затвердевающего в процессе склейки. Триплекс, изготовленный из листов толщиной 2...5,5 мм сырого, закаленного стекла или их сочетания, широко применяется в качестве ветровых стекол автомобилей, локомотивов и других транспортных средств, тракторной техники, защитных очков. В отдельных случаях (авиаостекление) применяется триплекс из органического стекла или его сочетания с силикатным (гетерогенный триплекс). Технология пленочной склейки триплекса при поточном производстве на горизонтальной линии состоит из операций сборки пакетов подготовленных листов стекла с пленкой между ними, прокатки (подпрессовки) пакетов между холодными вальцами для вытеснения воздуха, склейки изделий путем прокатки разогреваемых до 100 °С пакетов между горячими вальцами. При автоклавной склейке пакет помещается в замкнутый объем (резиновый или другой эластичный мешок), из которого откачивается воздух. Герметизированный мешок помещают в водяной или газовый автоклав, где при температуре 95...140 °С и избыточном давлении 1,5...2,5 МПа (в зависимости от типа пленки) происходит склейка. При полимерной склейке листы стекла, скрепленные на заданном расстоянии друг от друга, устанавливают в полимеризационной камере, после чего зазор заполняют полимеризующимся раствором, принимая меры по удалению воздуха, контролируя и регулируя параллельность листов. В зависимости от типа полимера склейка осуществляется под действием УФ-облучения или теплоты. Полимерная склейка отличается простотой применяемого оборудования, возможностью регулировать свойства изделия, изменяя состав полимера, но уступает пленочной по прочности.

Для изготовления безопасных изделий с повышенной ударной прочностью используется многослойное стекло. Авиаостекление, выдерживающее удар птицы на высоких скоростях полета, состоит из 3–4 листов упрочненного стекла. Ударостойкое остекление для защиты от различного стрелкового оружия (прозрачная броня) изготовляют из 4 – 7 листов сырого или упрочненного стекла. Толщина изделий различного класса защиты (вида оружия, типа пули) определяется прочностью стекла и свойствами склеивающих материалов. Для предотвращения разлетания осколков стекла к тыльной поверхности изделия подклеивают полимерную пленку или тонкое оргстекло. Прозрачная броня плоской и гнутой формы используется для остекления боевой наземной и воздушной техники, специальных (в том числе инкассаторских) автомобилей и железнодорожных вагонов, банковских сооружений, музейных витрин и в других случаях, где требуется защита людей или особых ценностей от ударного, огнестрельного или взрывного воздействия. Для изготовления многослойного стекла используется автоклавная и полимеризационная склейка.

Обрамление. Жесткое обрамление слоистых композиций для авиационного остекления, склеенных пленочными материалами, осуществляют профильными поливинилбутиральными лентами (жгутами) различной толщины и ширины, укладываемыми по периметру изделия. При автоклавном прессовании они затвердевают, приобретая форму жесткой обоймы.

Мягкое обрамление герметизирующими составами (виксинты, тиоколы и т.п.), используемое для панелей, склеенных полимеризационными материалами, выполняется путем нанесения предварительно подготовленной вулканизирующейся или полимеризующейся смеси на боковую поверхность изделия. В зависимости от конструкции обрамления (рамочное или безрамочное) нанесение герметика осуществляют различными способами – обмазкой, шприцеванием и др. Продолжительность операции нанесения герметика определяется его жизнеспособностью, поэтому порция подготовленной

смеси должна быть использована в течение отведенного времени. Отверждение герметика в зависимости от его состава происходит при нормальной температуре на воздухе (холодная вулканизация виксинтов) или тепловой обработке (тиоколы).

Обрамление ветровых и задних стекол автомобилей производится в основном профилированной резиновой полосой.

Безрамочное обрамление образует кант заданной толщины на боковой поверхности стеклоблока, рамочное создает заданный профиль герметизирующего слоя, заполняющего полость между контуром прозрачного элемента и металлической рамкой изделия.

Высокие требования к герметичности иллюминаторов космических аппаратов удовлетворяются путем использования термостойких вакуумных резин и прокладок из мягких металлов, например отожженной меди, поджимаемых или сжимаемых калиброванным усилием при сборке изделия.

5.2.4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Контроль и наземные испытания изделий конструкционной оптики (ИКО) предназначены для выявления соответствия фактически достигнутых показателей их значениям, закрепленным в технической документации на изделия. Проверки, осуществляемые при контроле и испытаниях, могут быть объединены в следующие группы: проверка конструктивных показателей; выявление и оценка дефектов; проверка и оценка работы электрообогрева; проверка оптических показателей; проверка стойкости к внешним воздействиям.

Конструктивные показатели проверяют путем измерения массы, монтажно-габаритных размеров и отклонения реальной формы поверхности от теоретической (плоской или гнутой). Массу изделия определяют взвешиванием, а монтажно-габаритные размеры – линейным измерительным инструментом необходимой точности.

Контроль формы готовых плоских изделий осуществляется по контрольному кольцу или привальной раме. Для контроля гнутых изделий используют контрмакет (объемный шаблон), представляющий собой металлическое подобие изделия, изготовленное с высокой точностью. При этом с помощью набора щупов измеряется величина зазора между поверхностью стекла и шаблона по контуру шириной 10...25 мм ("привальной" поверхности).

Все большее распространение получает способ контроля отклонений от теоретической поверхности. Теоретическая поверхность плоских ИКО задается уравнением плоскости, проходящей через три точки на контролируемой поверхности. Измерение фактических координат контрольных точек, принадлежащих контролируемой поверхности, осуществляется с помощью координатно-измерительной машины, основными узлами которой являются жесткая станина для размещения ИКО, датчик касания, выдающий сигнал к считыванию показаний в момент касания, измерительная система для определения значений координат, ЭВМ с математическим обеспечением.

В числе контролируемых дефектов – пороки стекла (свили, пузыри, царапины, выколки, сколы) и склеивающего слоя (отлипы, помутнения), выявляемые и измеряемые в проходящем и отраженном свете с помощью лупы и микроскопа.

Оцениваемыми показателями системы электрообогрева ИКО являются электрическое сопротивление электрообогревающего элемента, термодатчика (термистора) и изоляции токоведущих цепей, а также мощность, потребляемая элементом, с вычислением средней удельной мощности на 1 $см^2$. Кроме того, проводится проверка равномерности температурного поля на внешней поверхности ИКО при включенном электрообогреве с помощью тепловизора или плавления парафина. Эффективность электрообогрева для защиты от обледенения внешней поверхности ИКО и от конденсата на внутренней поверхности, обращенной в кабину, оценивается соответственно относительной площадью, покрытой льдом, и временем удаления конденсата при штатных режимах работы электрообогрева в интервале наружной температуры 0...30 °С и воздушном потоке со скоростью 180 км/ч и водностью 0,2...0,6 $г/м^3$.

К числу контролируемых оптотехнических показателей относятся: угол отклонения луча визирования (клиновидность), деформация изображения (максимальная алгебраическая разность углов отклонения в точках, расположенных на заданных расстояниях), нерезкость изображения (сходимость светового пучка после прохождения через ИКО), угол двоения изображения. Эти проверки осуществляют с помощью проекционной установки

(точность 0,5...1,0′) или теодолита (точность до 0,5″) в зависимости от требований к изделию путем измерения углов при установке изделия на пути луча и без изделия. Проверка фокусного расстояния приборных ИКО проводится на оптической скамье путем фокусировки изображения при наличии изделия и без него. На оптической скамье также проводится проверка разрешающей способности приборных ИКО путем нахождения наименьшего элемента штриховой таблицы (миры), различаемого через ИКО.

В особых случаях для прецизионных ИКО осуществляют проверки искажения волнового фронта (интерференционной картины), вносимого контролируемым изделием в ход параллельного пучка лучей.

Важнейшим контролируемым светотехническим параметром является коэффициент светопропускания (интегральный и спектральный). Измерения осуществляют на фотометре и спектрофотометре не менее чем в пяти точках светового поля ИКО.

При определении насыщенности цвета, зависящей от склеивающей пленки и условий склейки, на фотометре, снабженном соответствующими светофильтрами, находят коэффициенты пропускания изделия в синей и зеленой области. Их относительная разность для каждого из пяти участков нормируемой зоны ИКО используется для нахождения по градуировочному графику величины насыщенности цвета.

ИКО на основе закаленных стекол проверяют на контраст закалочных пятен, зависящий от конструкции закалочной решетки и режимов обдува и определяемый относительной разностью максимального и минимального коэффициентов пропускания в поляризованном свете с использованием полярископа и фотометра.

Коэффициент светорассеяния определяется отношением рассеянного изделием светового потока к падающему и характеризует относительное снижение контраста изображения при наблюдении через ИКО. Измерение контраста изображения с изделием и без него проводится на измерителе дальности видимости. В качестве высококонтрастного объекта используется полый цилиндр, оклеенный черным бархатом, помещаемый за отверстием в белом экране.

Оптическими методами определяется стойкость ИКО к эрозионному износу, который, вызывая мелкие царапины и выколки на поверхности прозрачного элемента, снижает коэффициент направленного светопропускания. Источником света в этом случае служит лазер, луч которого, ослабленный в зависимости от степени повреждения поверхности ИКО, регистрируется фотоприемником, расположенным в фотометрическом шаре.

Относительная эрозионная стойкость определяется массой абразивного материала, которая необходима для снижения пропускания испытуемым изделием по сравнению с массой абразива, до такой же степени повреждающей базовую (эталонную) поверхность в идентичных условиях.

К проверкам на стойкость к внешним воздействиям относится выявление дефектов стеклоблока и обрамления, а также изменений сопротивления электроизоляции токоведущих цепей после воздействия низкой (–60 °С) и высокой (85 °С) температур. Для этого изделие помещают соответственно в камеру холода на 3 ч или в термокамеру на 30 мин, после извлечения из которых проводят осмотр и измерения. В камере холода проводят проверку устойчивости к тепловому удару, вызванному включением электрообогрева, определяя максимальную температуру внешнего стекла в "горячих" точках, размеры и форму зоны заиндевения.

Аналогичным образом проводят проверку на стойкость к повышенной влажности (не менее 48 ч при температуре 40 °С и относительной влажности 96 %) и проверку термоводостойкости. В первом случае изделие помещают в камеру влажности, а во втором – в дождевальную камеру, обеспечивающую регулируемую интенсивность орошения, размер капель и высоту их падения. Перед дождеванием стекло разогревается внешним нагревателем до заданной температуры. Вода должна иметь температуру не выше 15 °С.

Прочностные характеристики ИКО выявляются в статических и динамических испытаниях. При проверке стойкости изделия к воздействию опрессовочного давления испытательная установка создает избыточное давление до 0,2 МПа со стороны кабины при комнатной температуре. При проверке стойкости к совместному воздействию перепада давлений и температур избыточное давление не превышает 0,1 МПа, но при этом изделие нагревают и охлаждают с внутренней и внешней сторон до заданных температур в соответствии с режи-

мом полета. После выполнения испытательного цикла проводят оценку состояния ИКО.

Запас прочности изделия определяется при испытании ИКО на разрушающую нагрузку. При этом оценивается целостность ИКО при заданном избыточном давлении (до 1,8 МПа) в течение заданного времени, а затем определяется предельное избыточное давление, приводящее к разрушению ИКО.

После разрушения основного (силового) стекла многослойной композиции изделие должно сохранять определенную работоспособность в менее жестких условиях, обеспечивая безопасное завершение полета. Диапазон этих условий (давления и температуры) определяется при проверке живучести (остаточной прочности) изделия. Для этой проверки используют изделия, частично разрушенные в предыдущих испытаниях или разрушенные с помощью специального металлического ударника. В таких разрушающих испытаниях подтверждается коэффициент безопасности, использованный при расчете изделия.

Динамическая стойкость остекления кабин определяется при проверке птицестойкости или пулестойкости.

Птицестойкость, т.е. способность изделия противостоять удару птицы в условиях полета и обеспечивать безопасность экипажа и возможность дальнейшего пилотирования самолета, определяется при осмотре изделия после его соударения с птицей. Соударения можно добиться "прямым" или "обращенным" методом. В "прямом" методе птица закрепляется неподвижно, а изделие, смонтированное в отсеке кабины или фонаре самолета, установленном на подвижной каретке, разгоняется по рельсовым направляющим с помощью ракетных двигателей. Несмотря на более полное воспроизведение реальных условий удара такой метод из-за сложности и высокой стоимости испытаний используется редко. Основным видом испытаний служит "обращенный метод", при котором изделие, смонтированое на опорной плите или в элементе кабины, остается неподвижным, а тушка птицы разгоняется с помощью энергии сжатого воздуха и выстреливается из пневматической метательной установки (пневмопушки). В испытаниях используются птицы стандартной массы 1,8 кг. В некоторых случаях (остекление легких самолетов) используется птица массой 0,9 кг.

Скорость птицы при ударе и угол встречи ее со стеклом задаются в технической документации и обеспечиваются давлением воздуха в пневмопушке и углом установки изделия по отношению к траектории птицы. При этом стекло должно иметь заданную температуру.

Изделие считается птицестойким, если удар птицы с заданными скоростью и углом соударения не приводит к опасному повреждению, вызывающему поражения глаз и кожи летчика осколками стекла или разгерметизацию кабины.

В целях наибольшей информативности испытаний на внутренней поверхности ИКО устанавливаются датчики напряжений и деформаций, на траектории помещаются датчики (контактные или бесконтактные) измерителя скорости.

Заключение о птицестойкости выдается по результатам испытаний не менее трех изделий.

К отдельному виду проверок относят ресурсные испытания изделий на специальных стендах, циклически воспроизводящих условия эксплуатации. В связи с высокой продолжительностью реальных эксплуатационных режимов ресурсные испытания, как правило, проводят на ускоренных и форсированных режимах с пересчетом их результатов на показатели технического, назначенного и гарантийного ресурса.

В период эксплуатации собирается информация о количестве и видах отказов, контролируется техническое состояние изделий. После статистической обработки результатов рассчитываются показатели надежности изделий: частота отказов, время наработки на отказ и другие, в результате чего корректируются величины ресурсов.

5.2.5. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

В зависимости от вида выпускаемой продукции организация производства изделий из технического стекла имеет свои особенности.

Изделия остекления автомобилей – это массовое поточное производство в объеме десятков тысяч изделий в год, поэтому для их производства используются высокопроизводительные агрегаты и линии. Для предварительной обработки стекла получили распространение комплексные автоматизированные системы, включающие резку листов, обработку и шлифовку кромок.

Для получения гнутых автомобильных стекол используются проходные горизонталь-

ные печи моллирования или прессования с производительностью 100 – 500 деталей в смену. Для закалки плоских и гнутых стекол применяют туннельные горизонтальные установки различных конструкций с электрическим или газовым нагревом, обеспечивающие выпуск до 1000 упрочненных стекол в смену. Склейка автомобильных триплексов осуществляется на горизонтальных установках непрерывного действия с использованием прокатки собранных пакетов (2 стекла с поливинилбутиральной пленкой между ними) при температуре до 100 °С.

Оборудование, используемое в массовом производстве, обладает достаточно широкими возможностями автоматического регулирования технологических параметров и способностью к быстрой переналадке при смене видов изделий (габаритные размеры, форма, толщина стекла). Для экономии энергии применяют агрегаты, совмещающие последовательные термические процессы, в частности, моллирование и закалку. Технологические установки встраиваются в поточные линии и согласуются по производительности.

Производство ИКО для авиационной техники отличается широкой номенклатурой при относительно небольших объемах выпуска продукции, поэтому организация этого производства имеет свою специфику.

Используемое технологическое оборудование – это, как правило, отдельные установки периодического действия (печи моллирования, закалочные печи и решетки, ванны травления и ионного обмена, вакуумные напылительные установки, автоклавы и полимеризационные камеры и т.п.). То же относится и к испытательным установкам и стендам. Многономенклатурность продукции обусловливает большое количество и разнообразие технологической, контрольной и испытательной оснастки.

При изготовлении ИКО для космической техники требуется сравнительно меньшее количество технологических операций. В основном это – процессы механической (оптической) обработки стекла, нанесения покрытий на детали и прецизионной тщательно контролируемой сборки изделий.

Технологическая подготовка производства ИКО осуществляется на основе технической (конструкторской и технологической документации). Основными конструкторскими документами, поступающими в производство, являются чертежи, технические условия и программы испытаний. В составе технологической документации – технологические инструкции, маршрутная карта технологического процесса производства изделия и технологический паспорт изделия.

Технологическая инструкция – это документ, содержащий описание правил и приемов работы по одной или нескольким взаимосвязанным технологическим операциям с указанием средств технологического оснащения, применяемых материалов, диапазона режимов обработки, требований техники безопасности, а также описание физических и химических явлений, протекающих при этой операции.

Маршрутная карта – это документ, описывающий всю совокупность и последовательность технологических и контрольных операций при изготовлении конкретного вида изделия (наименование и обозначение по конструкторской документации) с указанием оборудования, оснастки, участка или рабочего места, средств измерений, требований к квалификации персонала, материальных и трудовых нормативов, применяемых на каждой операции технологических инструкций с уточненными для данного изделия режимами обработки.

Технологический паспорт изделия содержит сведения о всех технологических операциях, которые прошло данное изделие (обозначение и № экземпляра) с указанием фактических режимов обработки, результатов контроля, сведения о технологическом и контролирующем персонале. Записи в технологический паспорт последовательно вносятся по мере прохождения технологического маршрута. Таким образом, паспорт содержит всю историю изготовления отдельного экземпляра изделия, что обеспечивает его идентификацию и прослеживаемость на стадиях производства, хранения, эксплуатации, ремонта, утилизации.

В связи с повышенной ответственностью и требованиями к надежности ИКО для авиационной и космической техники оценка качества продукции имеет свои особенности. Детали изделий на всех стадиях обработки подвергаются сплошному операционному контролю, а готовые изделия – сплошному приемосдаточному контролю и испытаниям. В тех случаях, когда показатели качества, в частности, прочность стекла, не могут быть определены без разрушения, испытанию подвергаются контрольные образцы-свидетели, прошедшие обработку вместе с рабочей деталью.

При статических испытаниях с целью разрушения изделия (определение запаса

прочности) или динамических испытаниях, вызывающих непреднамеренное разрушение изделия или его элементов (определение стойкости к удару или пулей), осуществляемых при разработке (исследовательские испытания), постановке на производство (предварительные испытания), в ходе установившегося производства (периодические и ресурсные испытания) или при внесении изменений в конструкцию или технологию изделия (типовые испытания) изготовляют образцы (как правило, не менее 3 шт.) по той же технической документации, что и поставляемые изделия.

С учетом вероятности возникновения брака на различных технологических операциях, обусловленной дисперсией свойств исходных материалов, статистической природой прочности стекла, а также случайными отклонениями технологических параметров производства, для оценки совершенства производства ИКО используется коэффициент запуска ($K_{зап}$), соединяющий в себе показатели выхода годной продукции (%) и коэффициент использования материалов, применяемых в машиностроении. $K_{зап}$ определяет количество материала (массу, объем или площадь) или количество исходных заготовок, необходимых для получения одной годной детали на рассматриваемой операции (операционный $K_{зап}$) или одного готового изделия (общий $K_{зап}$). При вычислении $K_{зап}$ учитывается использование вспомогательных листов стекла в качестве технологической оснастки, в том числе одноразового применения, а также образцов-свидетелей. Нормативный $K_{зап}$ устанавливается при отработке технологии изделия и используется для планирования объема запуска исходных материалов в производство, контроля технологических процессов, выявления несоответствий, осуществления корректирующих и предупреждающих действий.

Для обеспечения заданного качества продукции, стабильности и совершенствования производства, гарантии выполнения требований заказчика, демонстрации возможностей изготовителя на предприятиях, выпускающих изделия из технического стекла, все шире распространяются системы качества в соответствии с требованиями международных стандартов серии ИСО 9000 или ИСО 9001:2000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стекло:** Справочник / Под ред. Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.

2. **Богуславский И.А.** Высокопрочные закаленные стекла. М.: Стройиздат. 1969.

3. **Гудимов М.М., Сентюрин Е.Г.** Создание авиационного остекления // Авиационная промышленность. 1993. № 5–6. С. 46 – 50.

4. **Солинов В.Ф., Гринштейн Ю.Л.** Техническое стекло в авиации // Самолет. 1993. № 2. С. 26 – 28.

5. **Солинов В.Ф.** Проблемы создания, производства и применения изделий из стекла и керамики в авиации // Авиационная промышленность. 1996. № 10. С. 72 – 74.

6. **Солинов В.Ф., Гринштейн Ю.Л., Изотов Р.С.** Пути повышения надежности изделий конструкционной оптики летательных аппаратов // Авиационная промышленность. 1976. № 10. С. 72 – 74.

7. **Пестов А.В.** Моллирование листового стекла и технология получения криволинейных изделий // Наука производству. 1999. № 9. С. 33 – 36.

Раздел 6

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Глава 6.1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Нанотехнология – это междисциплинарная область в электронике, оптике, энергетике, машиностроении или в биофизике, биоинженерии и медицине, оперирующая процессами сборки и самосборки структур пониженной размерности на атомарном и кластерном уровнях в условиях проявления ими квантовых свойств, которые позволяют придать материалу принципиально новые физико-механические, химические и эксплуатационные свойства. Наноматериалы – одно из самых актуальных направлений современного материаловедения и многочисленных исследований фундаментального и прикладного характера. Под понятие **нано** ("карлик" с греческого) подпадают объекты с размером хотя бы в одном измерении в нанометрах (1 нм = 10^{-9} м). В пространстве между классическим микромиром с континуальными законами сплошных сред и атомарным, подчиненным законам квантовой механики, находится обширный мезоуровень (mesos – средний, промежуточный с греческого) метастабильного структурного состояния, где наночастицы со счетным числом атомов обладают свойствами "нанореактора", когда их физико-химические характеристики зависят от размера.

Среди разнообразных инноваций в этой области наиболее актуальным является развитие нанотехнологий для машиностроения. Нанотехнология в машиностроении – это совокупность процессов обработки, сборки, изготовления, изменения состояния, свойств и формы материалов со структурными элементами размером менее 100 нм. Именно в этом размерном диапазоне появляется возможность придания материалу принципиально новых физико-механических, химических, эксплуатационных и других свойств.

Истоки нанотехнологий связаны, в основном, с реализацией на практике парадигмы Р. Фейнмана "сборка на атомарном уровне снизу вверх" [27]. По Ж.И. Алферову [1], современная нанотехнология держится на трех китах: зондовой атомарной сборке, эпитаксиальном росте тонких пленок на поверхности кристаллов и самосборке гетероструктур. Например, нанотехнология в микроэлектронике включает атомную сборку молекул, новые методы записи и считывания информации, локальную стимуляцию химических реакций на молекулярном уровне и т.п. К таким собранным на квантовом уровне структурным системам относятся аллотропические формы углерода: нульмерные (фуллерены и фуллериты), двухмерные (одно- и многослойные нанотрубки, астралены) кластеры; квантовые точки, проволоки и др. Развитие нанотехнологии стимулировали разработки полупроводниковых наноструктур, формируемых методами молекулярно-пучковой и металлоорганической эпитаксии, созданием на этой основе принципиально новой наноэлектроники и оптоэлектроники. Ставшие традиционными планарные полупроводниковые технологии дают возможность создавать многослойные тонкопленочные структуры с функциями сенсоров, логической обработки сигнала, его хранения и передачи по электронным или оптическим линиям связи. В ближайшем будущем микрочипы с динамической памятью могут достигнуть размера ~ 10…20 нм, а при записи информации – плотности 1 Тбит/см, что обеспечивает равенство количества транзисторов в одной интегральной микросхеме и числа нейронов в человеческом мозгу (~ 10^{11}). Сканирующая тунельная (СТМ) и атомно-силовая (АСМ) микроскопия стали не только одним из основных методов диагностики наносостояний, но и средством активного воздействия на поверхностную структуру: на их основе получили развитие физические методы модифицирования поверхности, атомной манипуляции, наноплотной

записи информации и ее считывания. В качестве катализаторов, фильтров, поглотителей, сепараторов и молекулярных сит высокой селективности и газопроницаемости нашли применение нанопористые материалы – матрицы с регулируемыми нанопорами и каналами.

Известны десятки тонкопленочных методов CVD- и PVD-осаждения низкоразмерных квантовых структур: квантовых точек, ям, проволок и колец, структур с фрактальной (дробной) размерностью $1 < D < 2$ или $2 < D < 3$. Упорядоченные поверхностные квазирешетки из квантовых ям и точек используются в качестве лазерных источников света, фотоприемников, накопителей информации. Нанотехнологии нанесения сверхтвердых покрытий из нитридов, боридов и карбидов различных металлов, уступающих по твердости лишь алмазу, позволяют увеличить износо-, жаро- и коррозионную стойкость.

Проблемой мировой технологической науки долгое время оставалось объемное твердое тело со структурными элементами нанометровых размеров в связи с потерей наночастицами индивидуальных свойств "нанореактора", например, наноразмерных порошков, при консолидации и формировании реальной заготовки [28].

Прорыв в этой исключительно важной для машиностроительных и перерабатывающих отраслей инновационной сфере связан с открытием в России в конце XX века явления самоорганизации упрочняющих нанофаз в зонах структурных концентраторов напряжений (ЗКН) твердотельных метастабильных гетероструктур – своего рода защитной реакции материала на термосиловое воздействие [2, 3]. Наметились новые пути повышения физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, керамических, полимерных и композиционных конструкционных и функциональных материалов за счет технологических приемов формирования в традиционных материалах субмелкокристаллической (СМК) или ультрамелкозернистой (УМЗ) и нанокристаллической (НК) структуры без изменения их химического состава. Появилась новая технологическая парадигма "синергетики объемного наноструктурирования", в основу которой положен континуум когерентных наносостояний: "кластер (наночастица) → ансамбль наночастиц (нанофаза)" синтезирующихся на границах фрагментов матричной фазы в условиях интенсивных пластических деформаций (ИПД) сдвига на этапах эксплуатации и производства изделий [4 – 8].

По современным представлениям, наночастицы размером менее 100 нм находятся на границе квантового и классического микромиров, и это крайне нестабильное и неоднородное состояние определяет их уникально высокие физико-механические свойства, например, повышенную в 2 – 7 раз микротвердость (рис. 6.1.1), в 1,5 – 2 раза прочность при растяжении в сравнении с крупнозернистыми аналогами. Соотношения между прочностью и пластичностью показаны на рис. 6.1.2.

Наноразмерный эффект имеет две стороны: чисто масштабную, пространственную, и как физико-химическое явление, когда от размера (количества атомов и молекул) зависят свойства кластеров. Мир наноструктур,

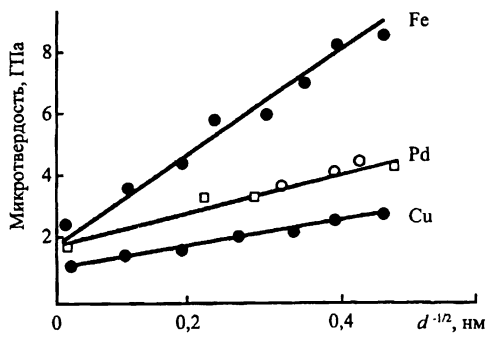


Рис. 6.1.1. Зависимость микротвердости от размера зерна d [15]

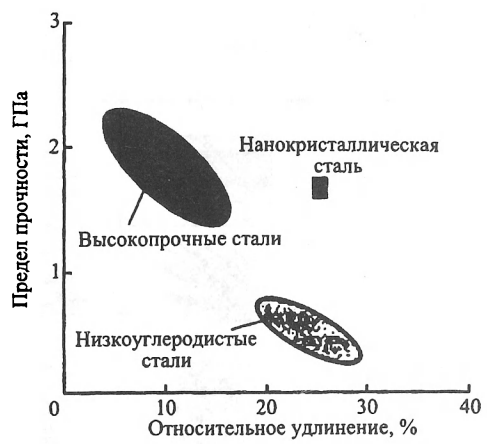


Рис. 6.1.2. Соотношение между прочностью и пластичностью [7]

состоящий из малых ансамблей атомов (молекул) – это огромный мир между одиночными молекулами (наночастицами) и континуальными системами, составляющими фазу. Верхняя граница наносостояния – это индивидуальные молекулы (наночастицы) со счетным числом атомов, обладающие квантовыми свойствами. Нижняя граница наносостояния (с химией высокодисперсных систем) определяется двумя важными соображениями: во-первых, соотношением понятий "наночастица" (размерный фактор) и "нанореактор" (когда свойства есть функция размера) и, во-вторых, насколько велики потери индивидуальных свойств наночастиц при формировании из них материалов или коллоидных систем [18].

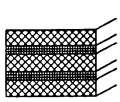
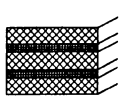
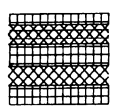
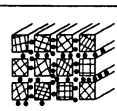
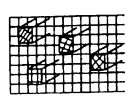
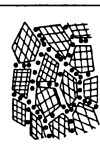
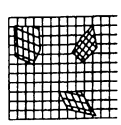
Единой общепризнанной международной классификации наноматериалов и нанотехнологий нет. Вместе с тем, существуют признаки, по которым пытаются классифицировать наноматериалы: химический состав, тип структуры, размеры, форма кристаллитов и расположение границ раздела (табл. 6.1.1). По Глейтеру [31] их разделяют на слоистые, волокнистые и равноосные по форме кристаллитов. По фазовому составу кристаллитов выделяют четыре группы наноматериалов: 1 – однофазные (слоистые поликристаллические полимеры или чистые металлы); 2 – многофазные с идентичными границами (многослойные структуры); 3 – многофазные с неидентичными границами (сталь или металлокерамика); 4 – многофазные с матричным строением (порошковые и кристаллизованные из аморфного состояния материалы).

Современным критерием наносостояния принято равенство объемных долей межзеренной и бездефектной внутризеренной компонент, что соответствует размеру устойчивых нанофаз со свойствами "нанореактора" от 5 до 30 нм. При размере нанофазы менее 10 нм значительно возрастает объемная доля тройных стыков – важного фактора наносостояния [32].

Размеры структурных образований, локальный химический состав зависят, в первую очередь, от концентрационной плотности дефектов кристаллического строения, которая, являясь технологическим признаком, оказывает определяющее влияние на физико-механические свойства. Например, по зависимости $\sigma_в - \rho_д$ (рис. 6.13) можно классифицировать все известные металлические материалы: от идеального бездефектного монокристала (бесконечная трансляция наноячейки) и нитевидных кристаллов до наноструктурированных и термически стабилизированных СМК-металлов и сплавов с армирующими границы когерентными нанофазами.

Изменяя условия термосилового воздействия в бифуркациях при ИПД, можно получать устойчивые наносистемы различного структурного и масштабного уровня, повышая

6.1.1. Классификация наноматериалов по структуре [31]

Форма кристаллитов	Фазовый состав и распределение кристаллитов			
	Однофазных	Многофазных		
		Идентичные границы	Неидентичные границы	Диспергирование в матрице
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

одновременно и прочность, и трещиностойкость материала. Например, уникально высокий эффект при использовании стабилизирующей термической обработки (СТО) в режиме "возврата" в 1-й бифуркации на этапе эксплуатации стали связан со стабилизацией декорирующих 50 нм "сетчатую" М-субструктуру когерентных К-нанофаз со свойствами "нанореактора" в интервале размером 5...10 нм. Появилась реальная технологическая возможность, наноструктурируя объемный поликристаллический материал (правая ветвь кривой на рис. 6.1.3), приблизиться к рекордным показателям прочности и жесткости, свойственным бездефектным нитевидным кристаллам.

Нанокристаллические композиты, обладающие повышенной по сравнению с аморфной структурой прочностью и магнитными свойствами, можно получать из аморфных сплавов, используя низкотемпературный отжиг.

Технологии ИПД могут обеспечить широкие возможности для получения объемных порошковых наноматериалов [7, 13]. Высокоплотные однородные порошковые материалы получают с использованием гидро- и газостатического прессования, кручением под высоким давлением или термоциклированием стандартных твердых сплавов. Например, с использованием горячего изостатического прессования и высокотемпературной газовой экструзии получены детали из нанопорошков Ni, Fe и WC–Co с повышенными прочностными свойствами [11, 29]. Деталь (инструмент) из стандартного твердого сплава системы WC–Co или WC–Ni подвергается циклическому фазовому наклепу (закалке), готовому разрушить его структуру, но при этом подбираются такие дозированные воздействия и СТО, при которых локальные объемы приближаются к прочности бездефектного кристалла [13].

Самоорганизация функциональных поверхностных слоев из ансамблей наночастиц (процессы "снизу вверх") при ионно-пучковой эпитаксии позволяет создавать на металлической или металлокерамической "подложках" сверхтвердую, с высокой демпфирующей способностью керамику инструментального и триботехнического назначения. Этого можно достичь, например, плазменным синтезом алмазоподобных оксикарбидов кремния при реализации условий алмазной ветви диаграммы "алмаз–графит" [13]. В режиме закаливания на атомарно чистой поверхности самоорганизуется алмазоподобная 3D-структура нанометрового масштаба на основе sp^2- и sp^3-гибридизации атомов углерода, а структурно-геометрическое соответствие фаз "подложки" и нарастающих фаз определяется условиями их сопряжения.

Классификация нанотехнологий для машиностроения представлена в табл. 6.1.2.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), в полимерную матрицу которых вводятся нанонаполнители: фулерены C_{60} и C_{70}, астралены, фуллериты (кристаллические структуры), нанотрубки, наночастицы металлов, оксикарбидов до 50 % (мас.), обладают уникальными электрофизическими, магнитными и

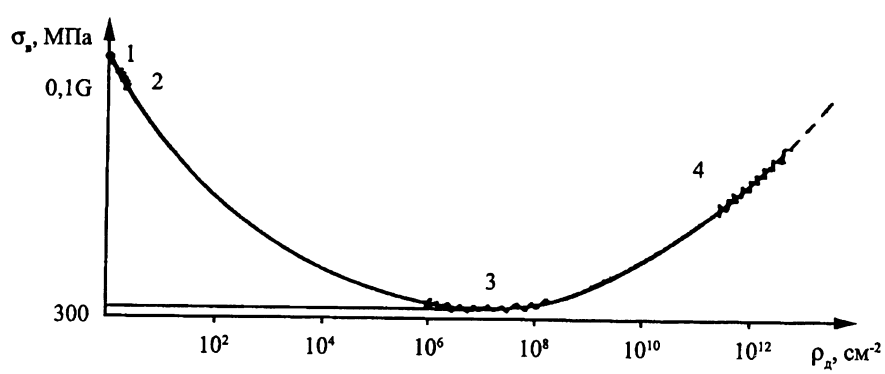


Рис. 6.1.3. Зависимость прочности $\sigma_в$ от концентрации дефектов кристаллического строения $\rho_д$:
1 – идеальный бездефектный монокристалл ($\sigma_в = 0{,}1G$, где G – модуль сдвига);
2 – бездефектные нитевидные кристаллы, нанотрубки, *3* – отожженные металлы и сплавы;
4 – СМК-металлы и сплавы → термически стабилизированные нанокристаллические композиты на СМК-основе → аморфные сплавы → диспергированные в аморфной матрице нанокристаллические фазы

6.1.2. Классификация нанотехнологий для машиностроения

Виды технологий	Физический процесс
Компактирование порошков	Газофазное осаждение и компактирование, прессование и спекание, ударное нагружение (взрыв), самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), ИПД
ИПД сдвига с СТО и в условиях высоких гидростатических давлений	Равноканальное угловое прессование (РКУП), кручение со сдвигом (ИПДК), свободная ковка, ротационная вытяжка, гидроштамповка, винтовая гидроэкструзия
Стабилизирующая термическая обработка на этапе эксплуатации	Синтез когерентных нанофаз в ЗКН
Термоциклическая обработка	Термоциклическое субструктурное упрочнение (ТЦСУ), $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ термоперекристаллизация при медленном нагреве
Тонкие пленки и модифицирование поверхности	Химическое (CVD) и физическое (PVD) осаждение из газовой фазы. Плазменная и ионно-пучковая эпитакция
Нанофазное упрочнение ПКМ	Диспергирование нанонаполнителя в полимер

функциональными свойствами [32]. Применительно к полимерным нанокомпозитам, углерод-углеродным и углерод-керамическим материалам эффективность наночастиц-наполнителей обусловлена их исключительно высокой активностью в атомарно-обменных процессах и способностью создавать когерентные связи с полимерной матрицей.

Широкое использование наноматериалов конструкционного и функционального назначения в промышленности могут обеспечить эффективные ресурсо- и энергосберегающие технологии производства деталей машин и механизмов с однородной нанокристаллической структурой.

Глава 6.2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Среди разнообразных инноваций в междисциплинарной области нанотехнологической науки и практики наиболее актуальными являются нанотехнологии для инновационного машиностроения и перерабатывающих отраслей. Наметились новые пути повышения физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, керамических, полимерных и композиционных конструкционных и функциональных материалов с помощью технологических приемов формирования СМК- и наноструктур.

Наибольшую перспективу для инновационного машиностроения имеет синергетика самоорганизации на этапе эксплуатации и на этапе производства в условиях интенсивных пластических деформаций (ИПД) сдвига иерархического ряда диссипативных наноструктур. Она основана на представлениях о гетерофазном материале как "интеллектуальной" структурной системе, способной защищаться от разрушающего термосилового воздействия путем самоорганизации упрочняющих нанофаз. Сопротивляемость материала разрушению зависит не столько от его исходной структуры, сколько от той динамической, которая формируется в процессе нагружения и обусловливает диссипацию энергии [3, 4]. Уникально высокую прочность и трещиностойкость обеспечивают упорядоченные в пространственно-временной гетеросреде нанофазы (нанокомпозиты) – продукт неравновесных процессов взаимодействия коллективных систем физических носителей ИПД, составляющих твердую фазу [4, 6, 8, 13, 14]. Этими процессами можно управлять в определенных точках бифуркации [критических состояниях (КС)] и получать устойчивые нанофазы различной иерархии.

6.2.1. СИНЕРГЕТИКА НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Теоретическая оценка накопленной деформации при мягком нагружении стали на этапе эксплуатации в макроупругой области с внешним напряжением $\sigma \leq 0{,}8\sigma_т$, когда в зонах структурных концентраторов напряжений (ЗКН) возникает ИПД сдвига (табл. 6.2.1), свидетельствует о ее наноструктурировании [3, 4].

ИПД – диссипативный процесс, протекающий в условиях неоднородного напряженного состояния и снижающий уровень внутренних напряжений в материале. Пластический сдвиг зарождается в ЗКН как локально-структурное превращение и распространяется как сугубо релаксационный процесс. Основу структурных уровней ИПД составляет иерархия ее физических носителей: дислокационные скопления → "сетки" → нанофазы → ячейки → → субзерна. Процесс их перестроек, как правило, носит характер фазового перехода (дискретного или непрерывного) и характеризуется точками бифуркации. С синергетических позиций гетерофазный материал – это открытая сильнонеравновесная система, в процессе эволюции которой при обмене энергией, веществом, информацией с окружающей средой происходит иерархическая смена диссипативных динамически упорядоченных структур (динамическая самоорганизация).

Фундаментальные свойства наносостояния: крайняя неустойчивость, структурная неоднородность и фрагментарность в совокупности с когерентностью, а также согласованность как следствие кооперативного характера структурных взаимодействий. Феноменологические связи между границей квантового и классического микромиров для рождающихся и умирающих когерентностей, пороговыми факторами, определяющими наносостояние, бифуркациями и структурами следующего уровня иерархии позволяют представить нанофазы (сильно неравновесную многовариантную систему) нанокомпозитами, собранными из "живых" строительных "кирпичиков" в условиях континуума [8, 10]. Например, наноструктурирование мартенсита (М) стали при малоцикловом упругопластическом нагружении состоит в том, что через когерентно связанную с ним (кубическая сингония) неустойчивую ε-фазу (гексагональная сингония $Fe_{2,4}C$) непрерывно от цикла к циклу в условиях фрагментации формируются более сложные сингонии, обеспечивающие уменьшение энтропии в гетеросистеме: спектр карбидных К-фаз нано- и микроуровневого масштаба с псевдоморфным сопряжением между собой (своего рода атомно-молекулярный насос). Каждому уровню иерархии присущи свои структурные мотивы, но одним из главных мотивов самоорганизации по принципу "снизу вверх" является способность не совместимых по меркам классической кристаллографии кластеров (наночастиц) объединяться в ансамбли (нанофазы) за счет эффектов когерентности на локальных участках ассоциации в условиях континуума [8, 10]. Континум наносостояний для стали можно представить иерархическим рядом: "кластер (наночастица) → ансамбль наночастиц (нанофаза)":

Метастабильные фазы — Гомогенизированная фаза

$$M \rightarrow \left| \begin{matrix} Fe_{2,4}C \rightarrow Fe_3C \rightarrow (Fe, Cr)_7C_3, (Fe, Cr)_{23}C_6, (Fe, Mn)_3C \rightarrow Me_6C\ [(Fe, W, Mo, Cr, V)_6C]. \\ VC(TiC) \end{matrix} \right.$$

Граница

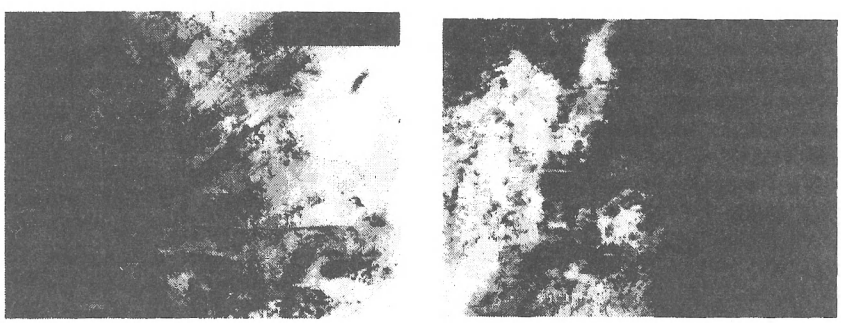
6.2.1. Накопительная деформация при мягком нагружении с $\sigma \leq 0{,}8\sigma_т$*

Накопленная деформация ε, %	Число циклов				
	1	5	20	50	150
Сталь Р18	0,1	0,6	3,1	15,5	813,0
Сталь 35ХГСА	0,05	0,3	2,7	9,8	301,3

*Характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) микроструктуры стали марок Р18 и 35ХГСА в первом полуцикле получены с использованием метода конечных элементов (МКЭ), расчет накопленной деформации выполнен по методике [24].

Процесс наноструктурирования М развивается поэтапно: 300...500 циклов – сетчатая субструктура (1-е КС) → 1000 циклов и более – ячеистая фрагментация (2-е КС) и накопление необратимой поврежденности (рис. 6.2.1). В конечном итоге продуктом эволюции М является малоуглеродистый пластически деформированный α-твердый раствор с тетрагональностью $c/a < 1{,}01$, где c и a – параметры решетки, и исключенными из числа обеспечивающих несущую способность детали гомогенизированными карбидами.

На этапе М → ε-фаза (рис. 6.2.2, 6.2.3), где наблюдается обратное растворение кластеров (атомно-молекулярный насос работает в обратном направлении) на границах фрагментов М-фазы, ориентационные соотношения несовместимы с классической кристаллографией (разве что как предельный случай). Это приводит к некоторой условности понятия когерентности для кристаллических структур, которое предполагает наличие на границах дислокационных стенок, что подтверждено экспериментально [17]. Из-за относительно малого числа атомов кластеры не имеют устойчивой кристаллической структуры. Имеются лишь искаженные фрагменты известных сингоний с чертами точечных, линейных, поверхностных или фрактальных объектов, характерные и нехарактерные для массивного твердого тела. Одни кластеры могут обладать высокой подвижностью внутри матрицы, другие – образовывать с атомами матрицы прочные химические связи (типичная длина связи между атомами в наномире примерно 0,15 нм). Обратное растворение выделившихся кластеров можно объяснить и с позиций традиционного металловедения: при высокой плотности дислокаций скорость сегрегации на дислокациях на несколько порядков выше, чем на границах.



а) *б)*

Рис. 6.2.1. Тонкая структура на просвет мартенсита стали 8Х4В2С2МФНЮТ (ЭК73) при циклировании с внешним напряжением σ = –2400...+300 МПа (×10^5):
а – 300 циклов – сетчатая субструктура; *б* – 1000 циклов – ячеистая фрагментация, накопление необратимой поврежденности

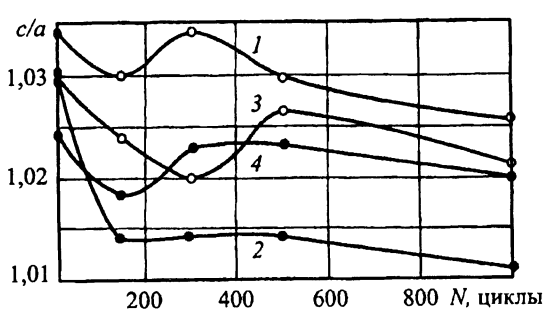


Рис. 6.2.2. Зависимость степени тетрагональности М от числа циклов наработки:
1, *3* – без СТО, *2*, *4* – с СТО; *1*, *2* – сталь ЭК73, *3*, *4* – сталь Р18 [8]; *c*, *a* – параметры решетки М

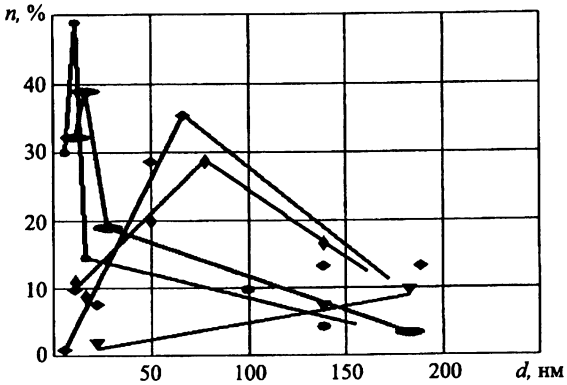


Рис. 6.2.3. Распределение дисперсных карбидов при циклировании стали ЭК73 ($\sigma \le 08\sigma_т$) [8]: ▼ – 0 циклов; • – 300 циклов, ⊙ – 300 циклов с СТО, ♦ – 1000 циклов, ⧫ – 1000 циклов с СТО, d – размер карбида, n – распределение карбидов по размерам

Адсорбция атомов внедрения с концентрацией C_0 на случайно распределенных в матрице зародышах может быть описана универсальной моделью Хэма [17], удовлетворяющей условиям деформационного старения пересыщенного твердого раствора по энергии связи и плотности дислокаций.

Если при $t = 0$ зародыша второй фазы нет, то снижение концентрации атомов внедрения в матричной фазе $C(t)$ для одной ячейки радиуса $R >> \sqrt{Dt}$, где t – время; D – коэффициент диффузии, будет удовлетворять зависимости:

$$C(t) = C_0 \exp(-t/\tau)^n,$$

где n – постоянная, связанная с геометрией выделений (n = 3/2 для сферического, n = 1 для цилиндрического зародыша, если выделение имеет форму пленки, то n = 1/2); $\tau = k(R^2/D)$ – время релаксации.

Если при $t = 0$ имеется зародыш конечного размера $r(t) \neq 0$, то при выделении вторичной фазы n будет равно 1 или 1/2, или 3/2.

Вопрос о пороговом размере фазовой составляющей, ниже которого проявляются ее квантовые свойства, а выше – свойства "нанореактора", является ключевым. Граница между волновым и классическим микромирами не определена. Этот вопрос оживленно дискутируется, и известный мысленный эксперимент Э. Шредингера с котом при описании β-распада, из которого следует, что мир может быть либо квантовым (кот умер), либо классическим (кот жив) и их суперпозиция невозможна, ставится под сомнение. По Б.Б. Кадомцеву [9], если ширина локализации частицы имеет масштаб ее собственных размеров ($b \approx L$, где b – ширина неравновесного волнового пакета; L – размер частицы), то она находится на границе между квантовым и классическим микромирами, обнаруживая как те, так и другие свойства. Оценка порядка величины L для "кентавров" диоксида циркония проведена в [10] из соотношений:

$$m = \rho L^3, \quad S_e = L^2 S_0,$$

где m – масса частицы размером L; ρ – плотность; S_0 – поток энтропии. Оказалось, что по числу атомов $n = 10^3 ... 10^4$ это согласуется с числом атомов в устойчивых "кентаврах" ZrO_2 размером L от 5 до 10 нм, где когерентно сосуществуют две сингонии с псевдоморфным сопряжением между собой.

Феноменология наносостояний позволяет, изменяя условия среды обитания в бифуркациях, получать наносистемы различного структурного и масштабного уровней, одновременно повышая и прочность, и трещиностойкость. Например, исключительно высокий комплекс физико-механических свойств наноструктурированной стали связан с термической стабилизацией размера вторичных нанофаз в пределах 5...10 нм, удовлетворяющих условиям "нанореактора" и необратимости (см. рис. 6.2.2, 6.2.3), и образованием устойчивых многослойных дислокационных стенок, представляющих собой декорированные этими

нанофазами субграницы 30...50 нм "сеток". Бифуркация 1КС определяет возможность эволюции структурной системы с вероятностью, по крайней мере, 1/2 → релаксации либо за счет микроразрушения, либо за счет эпитаксии армирующих субграницы когерентных нановыделений – этих двух необратимых во времени процессов. СТО реализует с достоверностью единица вторую возможность.

Подавление за счет СТО релаксационных процессов микроразрушения связано с подавлением процесса формирования ячеистой фрагментации. В таких завершенных дислокационных субструктурах присутствуют, как правило, границы раздела, по которым распространяются зародышевые микротрещины. В сетчатой субструктуре таких границ нет.

Таким образом, реализация на практике принципа И. Пригожина [26]: "Правильно организованное взаимодействие среды обитания с объектом оказывает большее влияние на его эволюцию, чем более сильное, но неадекватное его собственным целям воздействия" – позволяет в большей мере использовать скрытые резервы традиционных металлических материалов и получить с помощью технологических приемов наноструктурирования высокоэффективные композиционные материалы нового поколения при исключительно малых энерго- и ресурсозатратах.

6.2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Наносостояние позволяет коренным образом изменять эксплуатационные и функциональные свойства материалов на этапе производства деталей машин и инструментов.

Мотивация наноструктурирования сместилась в область ресурсо- и энергосберегающих технологий промышленного производства реальных изделий машиностроительного назначения из традиционных металлических, металло-керамических и полимерных материалов с нанокомпозиционной структурой: уникальное технологическое решение повышения долговечности на этапе эксплуатации, наноупрочнение твердых сплавов, коррозионностойких конструкционных и инструментальных сталей, титана, меди, алюминия и их сплавов, производство наноструктурированного коррозионно-стойкого дамаска, нанотехнологии производства синтетических алмазов со структурой трехмерных 3D-полимеров и алмазоподобных покрытий. Объемное наноструктурирование имеет решающее значение при холодной ротационной вытяжке тонких коррозионно-стойких оболочек и при гидроштамповке облегченных фитингов (крестовины, угольники, переходники) повышенной удельной прочности, износо-, жаро-, теплостойкости для пневмо- и гидросистем.

Производственные нанотехнологии ИПД, заключающиеся в обжатии с большими степенями деформации (сотни процентов) при относительно низких температурах (менее 0,3...0,4 $T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления материала) в условиях высоких гидростатических давлений, позволяют получать объемные беспористые СМК-металлы и сплавы с нанокристаллическими элементами структуры [5, 7, 12]. Кручение под гидростатическим давлением (ИПДК), равноканальное угловое прессование (РКУП) и знакопеременный изгиб позволяют достичь необходимых высоких степеней деформации и измельчения зерна в заготовках из железа, алюминия, меди, вольфрама, никеля, титана и их сплавов толщиной до 20 мм без изменения их сечения и формы. ИПД при холодной ротационной вытяжке тонких оболочек или при гидроштамповке фитингов из трубной заготовки позволяют достичь необходимых для наноструктурирования степеней пластической деформации аустенитных марок коррозионностойкой стали с уменьшением поперечного сечения заготовки [6, 8].

Реализовать наносостояние, коренным образом изменяющее физико-механические и функциональные свойства аустенитной стали, позволяет совмещение РКУП и "закалки вверх" [14].

Заготовки и детали из метастабильных, например, никелевых и хромоникелевых аустенитных марок стали можно наноструктурировать при прямом и обратном ("закалка вверх") мартенситном превращении $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ в условиях медленного нагрева [30]. Образование различно ориентированного нанокристаллического аустенита (пластинки толщиной 10...50 нм) в α-фазе представляет собой своеобразную закалку стали при нагреве в процессе $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения: прочность мартенсита увеличивается с 700 до 1200 МПа. Чтобы получить нанокристаллическую γ-фазу в результате размножения γ-ориентаций при прямом

$\gamma \rightarrow \alpha$ и обратном $\alpha \rightarrow \gamma$ мартенситных превращениях, необходимо исключить причины восстановления исходной γ-ориентации после цикла $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$. Медленный нагрев со скоростью 0,2...0,4 К/мин от 450 К до температуры начала $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения вызывает в сплавах железа с никелем (30...32 %, мас.) с аустенитно-мартенситной структурой перераспределение никеля между мартенситом и остаточным аустенитом. При этом в соответствии с диаграммой равновесия Fe–Ni аустенит должен обогащаться никелем, а мартенсит (на межфазной границе α/γ) – обедняться. В таких условиях нагрева вокруг мартенситных кристаллов образуется малоникелевый "буферный" слой. Он препятствует эпитаксиальному зарождению первых порций γ-фазы на границе с остаточным аустенитом, так как температура начала $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения в малоникелевом буферном слое более чем на 100 °С выше, чем внутри линзовидного α-кристалла. За 10 ч выдержки при 400 °С в сплаве Н31 толщина малоникелевого буферного слоя (с массовой долей никеля менее 25 %) на поверхности α-кристаллов достигает около 1 нм. При этом кристаллы γ-фазы при $\alpha \rightarrow \gamma$-переходе зарождаются не на границе с остаточным аустенитом (как это было при ускоренном нагреве), а внутри каждого α-кристалла, что вызывает измельчение аустенита до наноуровня.

На рис. 6.2.4 [30] представлены типы аустенита, формирующиеся в метастабильных аустенитных Fe–Ni и Fe–Cr–Ni сплавах.

В результате частичного $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения в мартенсито-стареющей стали Н18К9М5Т, вызывающего фрагментацию ферромагнитного α-мартенсита, удается перевести мартенсито-стареющую сталь в полутвердый магнитный материал с высокой прочностью и удовлетворительной пластичностью.

Основу технологии термоциклического наноструктурироваия металлокерамики вольфрам–кобальт (ВК), вольфрам–никель (ВН) и титан–кобальт (ТК) составляют физико-химические процессы изменения состояния фазовых составляющих при спекании в режиме закаливания или при закалке твердосплавных изделий и инструментов. Формирующиеся η-фазы сверхтонкой морфологии – нанокристаллические элементы фрагментованных WC-фазы и связки (кобальтовой, никелевой или железной) фиксируются СТО, что придает металлокерамике уникальные свойства (табл. 6.2.2).

Одним из основных факторов наноструктурирования при термоциклировании гетероструктурных материалов повышенной неоднородности являются поля мощных гидростатических давлений, создающихся в результате фазового наклепа. Специфика фазовых превращений состоит в том, что они осуществляются из огромного числа центров на мезо- и микроуровнях.

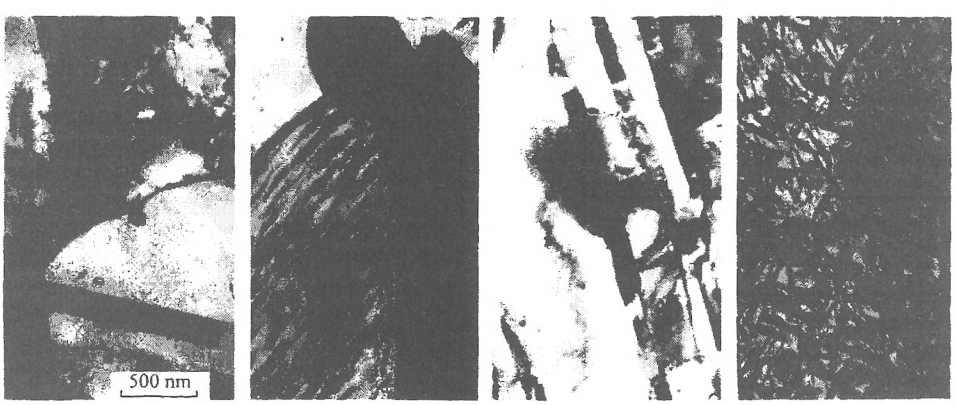


Рис. 6.2.4. Типы γ-фазы в аустенитной стали с массовой долей никеля 28...32 %:
а – гомогенный полиэдрический; *б* – концентрационно-неоднородный полиэдрический, *в* – одинаково ориентированный пластинчатый, *г* – нанокристаллический

6.2.2. Физико-механические характеристики твердых сплавов [13]

Сплав	HRA	$\sigma_{изг}$, МПа	ρ, кг/м^3	$K_{эфф}$
ВК8*	89...91	1800...2000	14 700...14 900	1,6
Carboloy	90...91	1800...2000	14 700...15 000	1;0

*Микротвердость поверхностных слоев, модифицированных SiC из плазмы, до 25 ГПа, глубина слоя достигает 7 мкм.

Модифицирование карбидами кремния из парогазовой фазы поверхностных слоев твердосплавных пластин для металло-, деревообработки, комбинированного строительного, горного и лезвийного стального инструмента, а также изделий триботехнического назначения реализовано на дуговом плазмотроне УПНС-304М с жидкостным питателем при атмосферном давлении без использования вакуумной камеры. При воздействии струи низкотемпературной ($T \approx 3000$ °С) аргоновой плазмы при определенной скорости перемещения "пятна" избыточная энергия потока ионов рассеивается на массу за пико- и микросекунды, что обеспечивает температуру "подложки" не выше 200 °С. При каждом замкнутом цикле имплантации Si и С из парогазовой фазы в условиях закаливания в результате хемосорбции появляется пленочная алмазоподобная наноструктура с квантовыми и новыми химическими свойствами (молекула), обладающая поверхностью (твердое тело), которая термически стабилизируется. В условиях когерентности границы перестают быть препятствием для формирования структурных единиц твердого вещества следующего уровня иерархии (рис. 6.2.5).

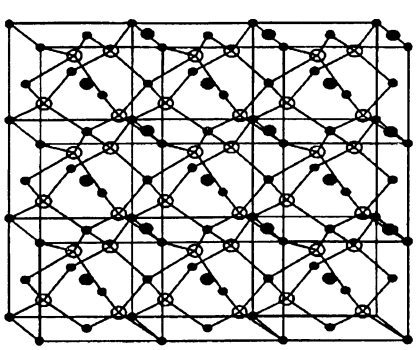


Рис. 6.2.5. Один из вариантов метастабильной композиционный керамики на основе SiC [3]:
○ – C; • – Si, ● – Co

Слой SiC эпитаксируется на границе разрыва ковалентных связей в решетке графита, трансформируя ее из плоской гексагональной в алмазоподобную путем sp^3-гибридизации решетки графита кремнием. Для образования слоя SiC на поверхности β-Co фазы исходной решеткой является решетка кремния, изоморфная решетке матричной фазы, ковалентные связи в которой усиливаются углеродом.

В трибологических процессах под воздействием больших нагрузок и температуры поверхностные слои материала пары трения фрагментируются, образуя поверхностную нанокристаллическую структуру (размер фрагментов от 3 нм), в результате чего в десятки раз увеличивается диффузионная подвижность атомов [2, 19]. На этом явлении основана нанотехнология самопроизвольного образования предотвращающего износ микропокрытия за счет специально вводимых в контакт с поверхностью трения нанопорошков, например, медьсодержащих из масляной суспензии или других смазочных дисперсионных сред. На дефектах поверхности под воздействием выделяемой при трении энергии они превращаются в активные центры зарождения и роста поверхностных наноструктур исключительно высокой износостойкости.

Технологический переход к наноразмерной области обусловил интерес к наноразмерным фрактальным пленкам. Обнаружено влияние фрактально-матричных структуризаторов (ФМС) на процессы конденсации тонких наноразмерных пленок с фрактальной структурой (имеющих несколько уровней самоподобия) из парогазовой и плазменной среды с использованием магнетронного ионно-плазменного напыления (медь, титан, алюминий) или термического вакуумного напыления (медь, индий, селенид свинца и т.п.), а также при нанесении тонких слоев жидких нематических кристаллов [11]. ФМС представляет собой сложную криволинейную дифракционную решетку, изображение которой формируется

на кремниевой или оптически полированной стеклянной подложке методом прецизионной оптической литографии. Применение ФМС позволяет создать на границе раздела "подложка – фрактальная пленка" световое поле, представляющее собой систему дифракционных максимумов и минимумов в пространстве над подложкой. Изменяя структуру светового поля, можно оказывать влияние на структуру и свойства формируемых фрактальных пленок.

Получаемые под воздействием ФМС металлические фрактальные пленки (образования кластерного типа с размером кристаллов 4...10 нм) обладают уникальными электрофизическими свойствами: их электросопротивление на порядок отличается от обычных тонких пленок, они купируют негативное воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне частот 1 ГГц на жизнедеятельность биологических структур, в том числе, устраняют негативное воздействие мобильных радиотелефонов на человеческий организм, не оказывая влияния на рабочий сигнал. Организовано промышленное производство нейтрализаторов электромагнитных аномалий (НЭМА) для мобильных телефонов.

6.2.3. НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На основе углеродных наноструктур-фуллеренов создан целый класс новых сверхтвердых материалов, в том числе синтетические материалы тверже алмаза. Фазовые переходы в конденсированных фуллеритах C_{60} и C_{70} при обработке высоким статическим давлением $p \approx 13$ ГПа и температурой до 1600 °С приводят к образованию метастабильных сверхтвердых кристаллических и разупорядоченных полимерных 3D-структур (синтетические алмазы и алмазоподобные пленки, нанотрубки). Физической основой трехмерной полимеризации сверхтвердых и ультратвердых углеродных фаз является формирование жестких пространственных каркасов на основе sp^2- и sp^3-гибридизации [15]. Многообразие вариантов упаковки молекул порождает многообразие физических свойств объемных полимеров. Например, сверхтвердые фазы со структурой 3D-полимеров и плотностью более 2500 кг/м^3 устойчивы при нагреве на воздухе до $T \approx 700$ °С и отличаются наибольшими значениями твердости и модуля упругости: синтетические наноалмазы и супертвердые фуллериты обладают микротвердостью 50...150 ГПа при модуле упругости соответственно 300...500 ГПа; ультратвердые фуллериты с микротвердостью 150...300 ГПа при модуле упругости 500...800 ГПа. Для сравнения: карбид кремния (SiC) имеет микротвердость 25 ГПа при модуле упругости 220 ГПа, а нитрид бора (BN) – соответственно 50 и 300 ГПа.

Это объясняет, почему наноструктурные углеродные материалы обладают механическими, тепловыми и электрическими свойствами, существенно отличающимися от традиционных графитовых, алмазных структур и углеродных волокон.

Нанотехнология с использованием углеродных фуллероидных структур вызывает все больший интерес у специалистов, занимающихся полимерными композиционными материалами (ПКМ). Применение фуллеренов, фуллеритов, нанотрубок и астраленов в качестве активных модификаторов традиционно используемых полимеров эффективно и экономически оправданно, так как позволяет достичь технически значимого эффекта при использовании микродоз углеродных наноматериалов [16]. Фуллероиды "лечат" несовершенную структуру полимера, устраняют рыхлости, улучшают морфологию матрицы, структуру границ раздела фаз. Влияние углеродных наномодификаторов проявляется уже на технологических свойствах полуфабрикатов в процессе формирования ПКМ. Разработаны технологии аппретирования, основанные на обработке углеродных армирующих наполнителей насыщенными растворами фуллерена C_{60} в ароматических углеводородах, а также способы приготовления суспензии из нерастворимых наночастиц: астраленов, нанотрубок с эпоксидными олигомерами и олигомер-полимерными системами. Применение углеродных наномодификаторов позволяет улучшить морфологию полимерных матриц и структуру границ раздела фаз "армирующее волокно – полимерная матрица", где образуются высокоориентированные слои значительной толщины.

Наномодификация перспективна и для придания полимерам тепло-, электропроводящих, радиопоглощающих, экранирующих от электромагнитного излучения и антифрикционных свойств. Разработано высокоэффективное молниезащитное покрытие для защиты углепластиковых конструкций планера самолета, выходящих на внешний контур в зоне

смещающихся электрических разрядов большой мощности [16]. Интерес вызывают "ковровые" полимеры с фуллеренами C_{60}, обладающие магнитной восприимчивостью. Суперпрочные и легкие "ковровые" углеродные пленки толщиной в доли микрона, обладающие металлической проводимостью, магнетизмом и эрозионной стойкостью, способны не только обеспечить защиту летной конструкции от внешних факторов, но и снизить ее полетный вес, улучшить аэродинамические свойства конструкции. За счет повышения адгезии на границе раздела фаз и когезионной прочности матрицы на 60 % возрастает прочность углепластиков при межслоевом сдвиге и сжатии в трансверсальном направлении. Существенно повышается показатель остаточной прочности композита, характеризующий трещиностойкость и, следовательно, вязкость разрушения. В связи с тем что неравновесная синергетическая система стремится включить наиболее эффективные каналы диссипации энергии, при сдвиге модифицированные ПКМ разрушаются не по границе раздела фаз "волокно–матрица", а по граничному слою матрицы. Астралены эффективно выполняют роль стопперов микротрещин: многочисленные дополнительные каналы рассеяния внешней энергии обеспечивают ПКМ повышенную живучесть. Применительно к ПКМ, углерод-углеродным и углерод-керамическим материалам эффективность фуллероидных нанонаполнителей обусловлена их исключительно высокой активностью в атомарно-обменных процессах и способностью создавать когерентные связи с полимерной матрицей.

Таким образом, получение качественно нового состояния традиционных металлических, керамических и полимерных материалов на основе технологических приемов самоорганизации упрочняющих нанофаз представляет важнейший компонент повышения конкурентоспособности изделий конструкционного, инструментального, трибо- и теплотехнического назначения. Объемное наноструктурирование имеет решающие значение при разработке отличающихся малой массой аппаратов с высокой удельной прочностью для авиакосмического, энергетического и транспортного машиностроения, для поддержания ресурса безопасности техногенных объектов, ТЭК, добывающих и перерабатывающих отраслей.

Глава 6.3

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Интенсивные пластические деформации (ИПД) сдвига, лежащие в основе самоорганизации диссипативных упрочняющих нанофаз, упорядоченных в твердотельной пространственно-временной гетеросреде, могут успешно использоваться при производстве машиностроительной продукции [6, 8, 12, 19 – 22]. Получаемые методами ИПД СМК- и наноструктуры являются сложными системами, поскольку характеризуются не только очень малым размером зерен, но и высокими внутренними напряжениями, специфической структурой границ и текстурой, а также изменениями фазового состава. Процессы динамической самоорганизации проходят на различных масштабных уровнях: микро-, мезо-, нано- и создают возможность достижения принципиально нового уровня свойств в наноструктурированных металлах и сплавах, которые не типичны для обычных материалов: уникально высокой прочности и пластичности, сверхпластичности при низких температурах и/или высоких скоростях деформации, рекордного сопротивления усталости, уменьшения деградации свойств при радиационных воздействиях. Композиционный материал, содержащий упрочняющие тугоплавкие нанофазы с низкой растворимостью в матрице и высокой устойчивостью к процессам коагуляции, имеет не только высокую прочность, но и высокую стабильность структурно-фазового состояния к температурным и температурно-силовым воздействиям. В полной мере это сочетание свойств удается реализовать у конструкционных и функциональных материалов на основе титана, железа и меди.

При разработке технологий производства объемных ИПД-наноструктурированных материалов потребовалось решить ряд фундаментальных и прикладных проблем: повышение однородности структуры для достижения стабильно высоких свойств заготовки (прутка, листа, проволоки), повышение пластичности (фундаментальной характеристики) при высокой твердости и прочности.

6.3.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ГИДРОШТАМПОВКЕ И РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ

Наиболее широкими технологическими возможностями формирования устойчивых наноструктурных состояний обладают такие способы деформирования, при которых заготовка подвергается всестороннему неравномерному сжатию, а свободные (не контактирующие с инструментом) поверхности отсутствуют. Высокое гидростатическое давление в очаге деформации повышает пластичность, а всесторонний контакт с инструментом предотвращает потерю устойчивости и искажение сечения детали. Для повышения эффекта наноструктурирования необходимо исключить деформацию растяжения в очаге ИПД, обеспечив преобладание сдвиговых деформаций.

Технологические особенности формирования нанокомпозиционной структуры ИПД показаны на примере гидроштамповки соединительной арматуры (фитинги ∅ 6...50 мм, толщина стенки 0,6...0,8 мм) для пневмо- и гидросистем и ротационной вытяжки тонких (толщина до 0,8 мм) оболочек из стали 12Х18Н10Т. Традиционные гидроштампованные фитинги изготовляют следующим образом: 1) мерную трубную заготовку завальцовывают с одного торца и заваривают оставшееся отверстие; 2) помещают в полость разъемной матрицы, заполняют рабочей жидкостью и осуществляют гидроштамповку, при которой пуансоном осевого сжатия проталкивают ее по полости разъемной матрицы с одновременной подачей внутрь заготовки жидкости высокого давления. Полость матрицы имеет форму угольника, а жидкость высокого давления внутри заготовки производит ее пластическое деформирование и придает ей форму полости матрицы. Гидроштамповка используется лишь как формообразующая операция – последующая аустенитизация при 1050 °С и отжиг при 850...950 °С возвращают сталь в исходное однофазное состояние, устраняя образовавшуюся субструктуру.

При гидроштамповке или ротационной вытяжке ИПД сдвига достаточно велика и откликом пересыщенного γ-твердого раствора на силовое воздействие является частичное бездиффузионное γ → α-превращение с образованием гетерофазной структуры матрицы (А + $М_{деф}$), способствующей активизации упрочняющих процессов с выделением по границам К-нанофаз. Схема эволюции γ-фазы подтверждена результатами анализа дефекта плотности и магнитного фазового анализа в зависимости от степени ИПД (рис. 6.3.1).

На этапе деформирование до Λ = 0,87 (первое критическое состояние – 1 КС) наблюдается обычная для известных схем обработки давлением прямая зависимость между увеличением доли магнитной фазы и уменьшением плотности материала (табл. 6.3.1). Преобладает активный процесс деформирования, способствующий формированию локальных зон концентрации напряжений (ЗКН). Релаксационные процессы здесь связаны с γ → α-превращением и формированием промежуточных метастабильных структур в условиях сильного возбуждения.

На этапе Λ = 0,87 (1 КС)...1,38 (2 КС) (см. табл. 6.3.1) наблюдается обратно пропорциональная зависимость между изменением плотности материала и долей магнитной фазы, дефект плотности уменьшается, достигая при Λ = 1,38 практически исходных значений. Начинает преобладать пластическая релаксация напряжений вследствие самоорганизации в опасных ЗКН новых элементов структуры: формирования в условиях фрагментации сетчатых полигональных субструктур, закрепленных выделениями К-нанофаз TiC и $Cr_{23}C_6$. При Λ > 1,38 фрагментованная структура достигает критического состояния в локальных

6.3.1. Влияние степени деформации на характеристики материала

Характеристики	ε, %		
	20	40 (1 КС)	60 (2 КС)
$\Delta\sigma_в / \sigma_в^0$, %*	2,8	5,6	18
Пластичность Λ	0,35	0,87	1,38
$\Delta H_v / H_v^0$, %	2,8	7,6	28
$(\Delta\rho_\Sigma/\rho_0)\cdot 10^{-2}$	–0,33	–0,6	–0,42
$(\Delta\rho/\rho_0)_{повр}\cdot 10^{-2}$	–0,25	–0,5	–0,33
Магнитная фаза, %	4	7	13

*$\sigma_в$ = 0,34 НВ.

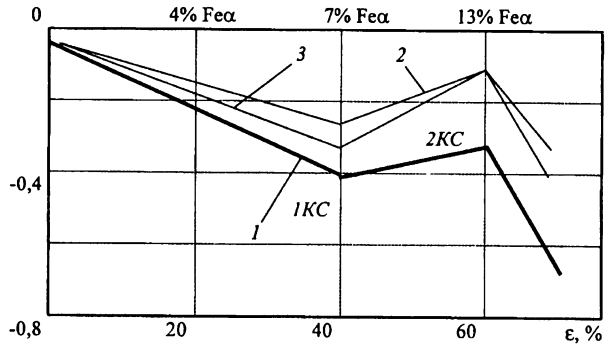
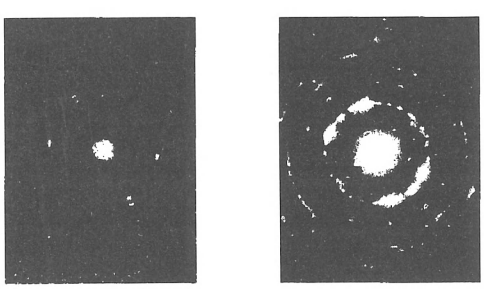


Рис. 6.3.1. Изменение плотности стали 12Х18Н10Т от степени деформации ε:
1 – экспериментальное изменение плотности, *2, 3* – расчетное изменение плотности за счет накопления поврежденности (см гл 6 4)

ЗКН, где исчерпан запас пластичности и дефект плотности резко возрастает.

Новое структурно-фазовое композиционное состояние стали (Fe_γ, $M_{деф}$, К-нанофазы) на этапах 1 КС...2 КС характеризуется повышенной удельной прочностью и трещиностойкостью (см. табл. 6.3.1, рис. 6.3.1). При Λ = 1,38 (три прохода при ротационной вытяжке или один при гидроштамповке) с низкотемпературной СТО наблюдается "размытие" границ сетчатой структуры, появившейся после первого критического состояния ($d \approx 30...50$ нм). На электронограммах (рис. 6.3.2) видны дополнительные рефлексы, которые свидетельствуют о выделении мелкодисперсных частиц типа (Fe, Cr)$_3$C, TiC (Ti_2C). Темнопольные изображения в рефлексе карбида (увеличение 100 000 крат) показали их распределение от 10 до 100 нм.

Кузнечное наноструктурирование в режиме высокотемпературного всестороннего



а) *б)*

Рис. 6.3.2. Электронограммы образцов стали 12Х18Н10Т:
а – ε = 20 %, СТО, *б* – ε = 60...70 %, СТО

обжатия $\varepsilon_\Sigma > 90$ % коррозионно-стойкой стали в условиях эпитаксии упрочняющих К-фаз нанометрового масштаба позволило получить лезвийный инструмент из стали 40Х13 мартенситного класса с твердостью 59...61 HRC, микротвердость поверхностной зоны H_{50} = = 6900...7500 МПа. Твердость стали 40Х13 (ГОСТ 5949–75) – 50 HRC [20].

6.3.2. НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА

Титан и сплавы на его основе широко применяются в аэрокосмическом, энергетическом и транспортном машиностроении, а также в медицине. С точки зрения биосовместимости в контакте с живым организмом или для длительно работающих в живом организме имплантатов предпочтительнее использовать технически чистый титан, который, в отличие от сплавов, не содержит вредных легирующих добавок. Однако в обычном состоянии он имеет низкие по сравнению со сплавами титана механические свойства. Эту проблему удалось решить путем формирования в титане технической чистоты нанокомпозиционной СМК-структуры, для формирования которой используются методы ИПД: равноканальное угловое прессование (РКУП), сдвиг под давлением (рис. 6.3.3) или всесторонняя ковка при температурах 673...723 К с последующей прокаткой при комнатной температуре [12, 22].

При такой обработке в титане формируется структура со средним размером зерен 200...400 нм в зависимости от режимов ИПД (рис. 6.3.4). Эти структуры стабильны до температуры порядка 673 К. При этом в условиях

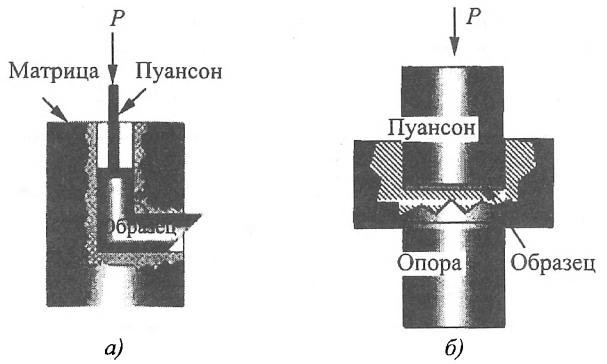


Рис. 6.3.3. Схемы ИПД:
а – равноканальное угловое прессование; *б* – сдвиг под давлением

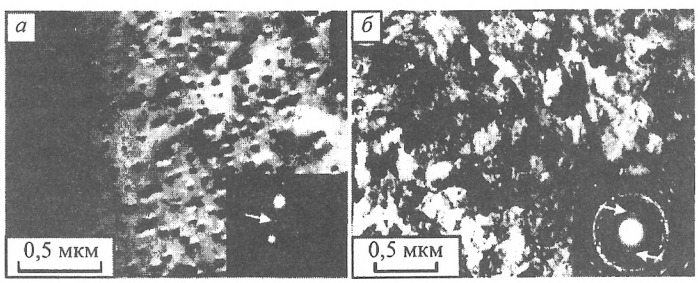


Рис. 6.3.4. Электронно-микроскопические снимки СМК-структурного титана

отжига ~ 523 К образуются выделения метастабильной нанофазы Ti_2C в виде дисков диаметром 10...40 нм (возможно, выделения этой фазы присутствуют уже после РКУП при комнатной температуре). Выделение метастабильной фазы Ti_2C при относительно низких гомологических температурах обусловлено наличием в технически чистом титане малорастворимой примеси углерода (мас. доля 0,1 %), что выше его предельной растворимости в титане при температурах ниже 773 К, а также высокими значениями коэффициентов диффузии в сформированном ИПД СМК-состоянии [19]. Варьируя температурой и временем в интервале температуры рекристаллизации, можно регулировать размер выделений Ti_2C и их распределение на границах матричной фазы. Другими словами, удается получить естественный композиционный материал с наноструктурным упрочнением и высокой термической стабильностью структурного состояния.

В результате нанофазного армирования СМК-структуры пределы текучести и прочности титана повышаются в 1,5 – 2 раза при сохранении удовлетворительной пластичности. Наряду с этим возрастают число циклов до разрушения и предел выносливости (табл. 6.3.2). Дополнительная пластическая деформация прокаткой при комнатной температуре приводит к уменьшению размеров СМК-структуры композита до 50...200 нм без уменьшения температуры рекристаллизации. Прочность такого наноструктурного композита достигает значений, характерных для многокомпонентных титановых сплавов при хорошей коррозионной стойкости. В результате формирования нанокомпозиционной структуры прочностные характеристики увеличиваются в 1,5 – 2,5 раза и достигают значений, характерных для легированных титановых сплавов при сохранении удовлетворительной пластичности; возрастают ограниченная долговечности и предел выносливости. Для полученной таким способом наноструктуры помимо малого размера зерен характерны высокая плотность дислокаций, неравновесное состояние границ зерен и высокие дальнодействующие поля напряжений.

6.3.2. Сравнительные свойства технически чистого титана и сплава ВТ6

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Деформация до разрушения, %	Предел выносливости, МПа	Число циклов до разрушения
Ti, крупнозернистый	436	360	24	300	$2{,}5...10^5$
Ti, СМК-структуры	840	760	14	520	$> 1 \cdot 10^6$
Ti, наноструктурированный Ti_2C	1100	850	10	600	$> 2 \cdot 10^6$
Сплав ВТ6	1070	960	15	550	

6.3.3. НАНОТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОРОШКА МЕДИ

Технологический процесс получения наноструктурного композиционного материала на основе порошка меди с ультрадисперсными частицами тугоплавкого оксида ZrO_2 (0,5 % мас.) включает в себя следующие операции:

получение композиционного порошка путем высокоэнергетического смешивания медного порошка и частиц ZrO_2 размером 40...100 нм;

прессование, спекание и интенсивные термомеханические воздействия при таких температурах и нагрузках, которые обеспечивают получение композиционного материала с пористостью не более 2 % и равномерное распределение по объему частиц ZrO_2;

формирование наноструктуры в медной матрице воздействием интенсивной пластической деформации при комнатной температуре методом кручения под давлением или всестороннего прессования.

Комплексная технология, сочетающая высокоэнергетическое смешивание в аттриторе порошка меди с наноразмерными частицами оксидов, компактирование и спекание полученного при этом композиционного порошка с последующей термомеханической обработкой позволяет получить композиционный материал с равномерным распределением частиц-наполнителей. Электронно-микроскопические исследования показали, что в композите сохраняется близкое к равномерному распределение частиц ZrO_2, формируется наноструктура без образования мезо- и макротрещин. Такое распределение частиц ZrO_2 сохраняется при изотермических отжигах при температурах не выше 500 °С, а наноструктура в медной матрице стабильна до 500 °С. При повышении температуры отжига до 600 °С равномерное распределение частиц ZrO_2 нарушается и на границах зерен образуются их скопления.

Размер зеренно-субзеренной структуры, прочность и пластичность композиционного материала (медь с массовой долей ZrO_2 0,5 %) существенно зависят от технологических режимов ее формирования. Например, при ИПД при комнатой температуре кручением под давлением 1300 МПа (истинная логарифмическая деформация $e \sim 5$) формируется СМК-структура с размером зерен примерно 400 нм: предел прочности 480 МПа; предел текучести 410 МПа; пластичность 7,4 %; термостабильность 400 °С.

Приведенные данные показывают, что комплексный метод, сочетающий высокоэнергетическое смешивание в аттриторе порошка меди с наноразмерными частицами оксидов, компактирование и спекание полученного при этом композиционного порошка с последующей термомеханической обработкой, позволяет получить композиционный материал с равномерным распределением частиц. Формирование в этом композите наноструктуры воздействием интенсивной пластической деформации методом кручения под давлением позволяет повысить его прочность при достаточно высокой термостабильности [22]. Материал перспективен для применения в электротехнической промышленности и энергетике, например, в качестве токосъемников и электрических контактов.

6.3.4. ТЕХНОЛОГИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Металлические сплавы с термоупругими мартенситными превращениями и термомеханической памятью относятся к конструкцион-

ным и функциональным материалам с уникальными физико-химическими характеристиками: силовые, соединительные, установочные, исполнительные устройства и конструкции, применяемые в авиакосмическом, энергетическом и транспортном машиностроении, электротехнике, робототехнике, в медицине. Сплавы на основе никелида титана TiNi в этой группе материалов выделяет комплекс чрезвычайно важных характеристик: высокие прочностные и пластические свойства, уникальные по величине эффекты термомеханической, однократной и обратимой памяти формы (ЭПФ), сверхупругость, демпфирование, высокая надежность, механотермическая, механоциклическая и термоциклическая долговечность, свариваемость, коррозионная стойкость, биологическая совместимость, сравнительная простота химического состава и технологичность как металлургического процесса, так и последующих производственных переделов (получение проволоки, ленты, листа, сложных профилей) и простота обработки [33, 34]. Сплавы TiNi обеспечивают не только надежное выполнение механических функций, но и химическую (сопротивление ухудшению свойств в биологической среде, сопротивление разложению, растворению, коррозии), а также биологическую надежность (биосовместимость, биоинертность, нетоксичность, отсутствие канцерогенности, сопротивление образованию тромбов и антигенов). Важным обстоятельством является миниатюризация принципиально новых высокоэффективных устройств различного назначения.

Характеристики традиционных сплавов с ЭПФ:

Предел прочности $\sigma_в$, МПа	500...2700
Предел текучести $\sigma_т$, МПа	5...2000
Относительное удлинение, %	5...10
Степень ЭПФ, %	95...100
Сверхупругая деформация, %	2...15
Реактивное сопротивление, МПа	300...1500
Температурный гистерезис превращения, °С	5...100
Интервал температур МП и ЭПФ,°С	–197...700
Циклическая долговечность	10^5...10^7

Улучшить комплекс функциональных параметров, достигаемых за счет обработки на ЭПФ, и получить существенно более высокие прочностные свойства сплавов можно с использованием объемного наноструктурирования методами ИПД [23, 34]. Альтернативный подход основан на использовании методов сверхбыстрой закалки, в том числе высокотехнологичного метода спиннингования струи расплава в тонкомерные объемные ленты. Компромиссным является способ жидкотвердого спекания объемных металлокерамик.

Для предельного измельчения зерна в поликристаллических сплавах TiNi при пониженных температурах деформации (0,2...0,3 $T_{пл}$), когда накопление дефектов максимально, а развитие релаксационных процессов заторможено, максимально эффективна технология ИПД кручением под давлением (ИПДК). Техника ИПДК обеспечивает в условиях высокого давления p = 5...6 ГПа предельные деформации e = 5...7 единиц за один полный оборот. Деформация за 5...10 оборотов приводит к практически полной аморфизации сплава. С использованием просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, вплоть до прямого атомного разрешения, обнаружено наличие в аморфной матрице большого количества нанокристаллических областей (размером 1...5 нм) с ближним атомным порядком по типу исходной B2-решетки сплавов, что согласуется с данными малоугловой нейтронографии и микродифракции электронов.

Аморфные сплавы на основе TiNi после ИПДК стабильны при охлаждении в криогенной области. Но их нагрев до температуры ~200 °С приводит к началу процесса нанокристаллизации. Это показано не только прямыми структурными исследованиями, но и методами температурных измерений электросопротивления, магнитной восприимчивости и дифференциальной сканирующей калориметрией. При низкотемпературном отжиге аморфных сплавов на основе TiNi продолжительностью до 30 мин легко удается реализовать наноструктурные и высокооднородные по размеру зерен состояния: 10...20 нм – после отжига при 250 °С, 20...30 нм – после отжига при 300...400 °С, 60...70 нм – после отжига при 500 °С. После аналогичных отжигов сплавов наноструктуры, близких по температурам мартенситных превращений и ЭПФ метастабильных сплавов, бинарных $Ti_{50}Ni_{50}$, $Ti_{49,5}Ni_{50,5}$, $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$, тройных, легированных, например, железом

или медью, аморфных после ИПДК, отличаются незначительно. Этот важный практический результат обусловлен тем, что после ИПДК аморфная, сильно наклепанная матрица уже содержит центры для последующей тотальной нанокристаллизации в виде наноразмерных включений с искаженной, но близкой к B2-решетке атомной структурой. Этот эффект ИПДК является физической основой нового способа создания наноструктурных сплавов, базирующегося на использовании их последующего низкотемпературного отжига из аморфного состояния.

Наноструктурные ИПДК сплавы TiNi при охлаждении и нагреве испытывают практически те же виды и последовательности мартенситных переходов, как и их исходные прототипы: $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ в Ti–Ni; Ti–Ni–Fe и Ti–NiCo, $B2 \leftrightarrow B19$ – в Ti–Ni–Cu. Но в таких сплавах реализуется совершенно иной структурный механизм сдвиговой перестройки: по типу "монокристалл – монокристалл", практически без внутреннего двойникования с инвариантной решеткой. Наблюдаются лишь редко расположенные нанодвойники типа $(001)_M//\{110\}_{B2}$ деформационно-адаптационного происхождения. Последние чаще встречаются в нанозернах, размер которых составляет 50...100 нм и более.

Из приведенных фактов следует: во-первых, квазиизотропная пространственная компенсация или аккомодация упругих напряжений, индуцированных сдвиговым мартенситным превращением, в наноструктурных сплавах TiNi достигается не в отдельных нанозернах, а в гораздо больших микрообъемах: в больших группах соседствующих нанозерен, ансамбли которых образуют самоаккомодирующую упругомягкую систему; во-вторых, отсутствие внутреннего двойникования в нанозернах мартенсита является экспериментальным доказательством того, что перестройка аустенитной решетки в решетку мартенсита происходит за счет чистого сдвига; в-третьих, в зернах, размер которых меньше критического, мартенситные превращения не происходят.

Нанокристадлизация приводит к рекордным значениям пределов прочности – 2700 МПа, текучести – до 2000 МПа, реактивного напряжения при реализации ЭПФ ~1300...1500 МПа при удовлетворительном относительном удлинении сплавов 20 %. При повышенных температурах испытаний до 400...500 °С нанонитинол также демонстрирует высокие структурную стабильность и свойства, в том числе прочность до 1500 МПа и деформируемость до 100...120 %.

ИПД методом РКУП с использованием до 10...12 технологических переходов по разным технологическим маршрутам при температурах 350...500 °С позволила создать в заготовках диаметром до 20 мм наноструктурное высокооднородное одно- или двухмодальное зеренно-субзеренное состояние со средними размерами СМК-структуры ~100...200 нм. При этом вдвое возросли прочностные характеристики: предел прочности до 1500 МПа, предел текучести до 1400 МПа, реактивное напряжение до 1000 МПа при высоких деформационных характеристиках (относительное удлинение 40...50 %, обратимая деформация 9 %). Наряду с эффектом однократной памяти объемные наноструктурные РКУП-сплавы приобретают узкогистерезисные эффекты многократно обратимой памяти формы и сверхупругости.

Основными механизмами структурных превращений в нитиноле при РКУП являются динамическая полигонизация, фрагментация и рекристаллизация. В сплавах TiNi после РКУП имеют место те же последовательности термоупругих мартенситных переходов $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$, причем мартенситы R и B19' имеют однопакетную двойниковоподобную морфологию в СМК-зерне с размером, близким к 100...200 нм. При этом наряду с отдельными двойниками по $(111)_{B19'}$ в большом количестве присутствуют деформационные нанодвойники по $(001)_{B19'}$.

Высокопрочные наноструктурные ИПДК и РКУП сплавы TiNi с ЭПФ обладают наряду с высокими прочностными и деформационными характеристиками большими реактивными силами, необходимыми при создании объемных элементов конструкций с памятью формы, и обратимыми мартенситными псевдоупругими деформациями.

Как способы дальнейшего улучшения механических характеристик и в качестве формообразующей обработки массивных наноструктурных деталей из сплавов TiNi с ЭПФ разработаны комбинированные технологии ИПД, например совместно с многократной прокаткой или волочением ($T_{деф} \le 0{,}2...0{,}3T_{пл}$). Многократная холодная прокатка с обжатием 30, 60 и 90 % переводит сплавы TiNi в сильно искаженное состояние. Но если прокатка ис-

ходных сплавов даже на 90 % обеспечивает лишь сильную фрагментацию структуры с элементами аморфной фазы, то аналогичная деформация сплавов в СМК-состоянии после РКУП переводит их в аморфизированное высокопрочное состояние, в котором, напротив, внутри аморфной матрицы присутствуют изолированные нанокристаллические зерна размером 5...10 нм, а для получения объемного наноструктурного состояния, как отмечалось ранее, требуется низкотемпературный отжиг.

Синтезированные быстрой закалкой (скорость охлаждения $10^3...10^6$ К/с и более) расплава (БЗР) металлические материалы принципиально отличаются по своему физическому состоянию и структуре от материалов, полученных при традиционных процессах затвердевания в условиях, когда скорости охлаждения составляют $10^3...1$ К/с. При спиннинговании или сплэттинге струи расплава в экстремальных режимах охлаждения могут быть достигнуты предельные скорости $10^7...10^8$ К/с. Метод спиннингования используется для получения высокопрочных наноструктурных сплавов TiNi с эффектами памяти формы, на основе которых созданы высокоэффективные сенсоры и актюторы. Если БЗР-сплавы TiNi находятся в мартенситном состоянии или при механических испытаниях в них происходит деформационный мартенситный переход, то они имеют весьма низкий предел сдвиговой мартенситной псевдотекучести с площадкой псевдоупругой мартенситной деформации e = 3...5 %. Предел псевдотекучести практически соответствует критическому напряжению мартенситного сдвига $s_м$. Затем следует стадия "линейного" деформационного упрочнения до "верхнего" нормального предела текучести (1200...1500 МПа), которую сменяет стадия параболического упрочнения вплоть до разрушения. Предел прочности БЗР нанокристаллических сплавов TiNi может достигать 2000 ГПа при относительном удлинении 15...20 %.

Глава 6.4

МЕТРОЛОГИЯ НАНОСОСТОЯНИЙ

Метрология наносостояний может быть построена на основе многоуровнего технологического мониторинга структурного состояния материала и условий ее формирования (определение точек бифуркации (КС) и управление структурной эволюцией, выявление физико-механических свойств, определяющих технологические параметры структурных перестроек на этапах производства и эксплуатации, оценка ресурса материала с учетом эффектов самоорганизации).

Процессы динамической самоорганизации проходят на различных структурных уровнях: микро-, мезо-, нано- и свидетельствуют о наличии нескольких факторов упрочнения. Одним из них является формирование сверхмелкокристаллических (СМК) и наноструктур, методы регистрации которых активно развиваются: просвечивающая электронная (ПЭМ), зондовая (SPM) и атомно-силовая (АСМ) микроскопии, наноиндентирование и наноскрабирование. Эти методы позволяют проводить комплексные исследования приповерхностных слоев и массива твердых тел, нанообластей, нанообъектов, гетероструктур, тонких пленок, определять вклад факторов упрочнения в повышение ресурса долговечности. Формирование СМК- и наноструктур приводит к значительному росту объемной доли границ зерен, что оказывает определяющее влияние на ресурс. Объемную долю границ зерен $V_{гз}$ можно оценить:

$$V_{гз} = [3\delta_г (d - \delta_г)^2] / d^3 \approx 3\delta_г / d, \quad (6.4.1)$$

где $\delta_г$ – толщина границ (1...10 нм); d – размер зерна.

Уменьшение размера зерна с микрометрового до нанометрового уровня приводит к увеличению объемной доли межзеренного вещества от 0,3 % до 87 %. Например, при размере зерна металлического материала ~5...10 нм объемные доли межзеренной и внутризеренной (бездефектной) компоненты равны.

В связи с наноразмерными эффектами наносостояния (см. гл. 6.2) методы и средства измерения линейных размеров наноструктур являются одним из главных направлений в нанометрологии: метрология обеспечения единства измерений в размерном диапазоне 1 нм < d < 1000 нм, основанная на принципах зондовой микроскопии и лазерной интерферометрии-фазометрии; эталонный комплекс средств измерений, обеспечивающий воспроизведение и передачу единицы длины с погрешностью ~ 1 нм.

В соответствии с современной концепцией обеспечения единства измерений передача размера от первичного эталона длины в нано-

размерный диапазон осуществляется 3D-лазерной интерферометрической системой измерения нанoперемещений: измерение линейных перемещений в реальном масштабе времени, калибровка системы сканирования и позиционирования в области точного машиностроения, микромеханике, робототехнике, микро- и наноэлектронике, сканирующей электронной и зондовой микроскопии. Для передачи размера от эталонной системы к потребителю используется специальная мера (эталон-сравнение), предназначенная для калибровки измерительных систем по трем координатам в диапазоне 10 нм $< d <$ 100 мкм. Аттестуемыми параметрами меры является шаг, ширина линий и высота (глубина) наночастицы или нанофазы.

Так, в растровой электронной микроскопии (РЭМ) калибруются увеличение и диаметр зонда, а в сканирующем зондовом микроскопе (SPM – Scaning probe microscopy) – цена делений по трем шкалам, ортогональность и линейность осей сканирования, а также радиусы острия зондов. Время калибровки составляет несколько минут.

В процессе ИПД перемещение дислокаций тормозится возле барьеров: границ субзерен, фаз, включений, формируя ЗКН, что приводит к накоплению избыточной энергии в опасных микрообъемах. Возбужденные микрообъемы интенсивно генерируют потоки дислокаций, вакансий, других дефектов кристаллического строения: движение дислокаций существенно ускоряется, формируются дислокационные скопления, трансформирующиеся в спектр дислокационных субструктур.

Эволюцию гетероструктур в условиях формирования ЗКН и стремлении системы вывести сильное возбуждение за ее пределы предопределяет конкуренция двух механизмов: пластическая релаксация внутренних напряжений за счет накопления микроповреждений и релаксация, обуславленная диссипативным процессом формирования спектра когерентных нанофаз. Введение новых условий – СТО в первых бифуркациях – способствует подавлению первого деструктивного процесса и реализации с вероятностью, близкой к единице, второго, повышающего надежность и безопасный ресурс.

Реализация данного алгоритма структурного технологического мониторинга самоорганизации упрочняющих нанофаз, упорядоченных в пространственно-временной гетеросреде, с учетом истории нагружения возможна с применением новой информационной технологии (ИТ) по типу CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support of Materials – непрерывный доступ и поддержка жизненного цикла (ЖЦ) материала). Это интегрированная система (ИС) ресурса: "гетероструктура материала ⇔ НДС конструкции ⇔ среда обитания (СО)", характеризующая ЖЦ материала на основе многоуровневого технологического мониторинга открытых гетеросистем через определенный набор КС при эволюции фаз в определенных условиях СО.

Структурно-чувствительными характеристиками, которые определяют макроскопическое поведение и ресурс материала, является:

а) степень деформации сдвига – управляющий параметр:

$$\Lambda = \{2\mathrm{ctg}(\Phi/2 + \beta/2) + \beta\mathrm{cosec}(\Phi/2 + \beta/2)\}, \quad (6.4.2)$$

где Φ, β – углы изгиба соответственно вогнутой и выпуклой поверхностей;

б) показатели прочности HB; HV; ACM, для большинства металлов и сплавов принято $H = 3\sigma_T$:

$$\Delta H_v / H_v^0 = \Delta H_v^{фаз}/H_v^0 + \Delta H_v^{суб} / H_v^0, \quad (6.4.3)$$

где микро- и нанотвердость субструктур $\Delta H_v^{суб} / H_v^0$ определяется методом индентирования (индентор движется по нормали к поверхности) и методом склерометрии (индентор движется по касательной к поверхности);

в) дефект плотности – интегральная многоуровневая (макро-, микро-, наноуровни) характеристика, позволяющая оценить изменение фазового состава, тонкой структуры и степени поврежденности материала:

$$(\Delta\rho_\Sigma / \rho_0) = (\Delta\rho_ф / \rho_0) + (\Delta\rho_д / \rho_0) + (\Delta\rho_{повр} / \rho_0), \quad (6.4.4)$$

где $\Delta\rho_\Sigma$ – изменение интегральной плотности; ρ_0 – исходная плотность; $(\Delta\rho_{повр} / \rho_0)$ – изменение плотности за счет накопления поврежденности; $(\Delta\rho_д/\rho_0)$ – изменение плотности вследствие накопления дефектов решетки; $(\Delta\rho_ф/\rho_0)$ – изменение плотности за счет фаз, определяемое из соотношений:

$$\rho_ф = [\rho_{матр} V_{матр} + \rho_к(100 - V_{матр})]/100;$$

$$\rho_{матр} = 100\rho_{л\ тв\ р}\rho_{л\ эл}/[\Sigma\rho'_{л\ эл}x' + \rho_{тв\ р}(100 - \Sigma x')];$$

$$\rho_{тв\ р} = [\rho_A A + \rho_M(100 - A)]/100,$$

здесь $\rho_{матр}$, $\rho_к$ – плотности матричной и карбидной фаз; $\rho_{л\ тв\ р}$, $\rho_{л\ эл}$, $\rho_{тв\ р}$ – плотность легированного твердого раствора, плотности легирующих элементов и твердого раствора; ρ_A, ρ_M – плотности аустенитной (A) и мартенситной (M) фаз; $V_{матр}$, A – объемные доли матричной, аустенитной фаз; x' – массовая доля легирующего элемента;

г) ресурс пластичности (предельная деформация), $\Lambda_р$:

$$\Lambda_р = \Phi(k; \mu_\sigma; H; \xi_i; \chi_i),$$

где $k = \sigma/T$ – показатель жесткости схемы НДС; μ_σ – показатель вида напряженного состояния Лодэ – Нодаи; H – интенсивность скорости деформации сдвига; ξ_i – характеристические параметры структуры (средний размер зерна, концентрация второй фазы и т.п.); χ_i – содержание химических элементов в сплаве.

Многоуровневый технологический мониторинг позволяет с единых позиций описывать разрушение как последовательные стадии единого процесса пластической деформации (ПД) на различных масштабных и структурных уровнях. Разрушение является заключительной стадией ПД, когда аккомодационные (релаксационные) возможности эволюционных процессов оказываются полностью исчерпанными. Используя процессы самоорганизации и, как следствие, изменения структурно-чувствительных характеристик, можно активизировать аккомодационные процессы в ЗКН, оптимизировать структурное состояние гетеросистемы, уменьшить опасность накопления микроповреждений и увеличить ресурс.

В первых бифуркациях можно оценить степень упорядоченности в условиях континуума и управлять динамикой самоорганизации. Возможность дальнейшего прогноза ограничивается горизонтом прогнозирования [26]:

$$T \approx 1/\lambda,$$

где T – время, на которое может быть дан достоверный прогноз; показатель Ляпунова $\lambda = \lim L/t \ln X(t)/X(0)$, означающий, что малое возмущение режима $X(0)$ во времени увеличивается экспоненциально: $X(t) = X(0)\exp(\lambda, t)$.

Физические методики рентгеновской дифрактометрии, внутреннего трения и ПЭМ, SPM и АСМ высокого разрешения в рамках данной методологии решают не только задачи диагностики КС – динамики процессов структурных перестроек, приводящих к изменению жесткости, прочности и пластичности. Эти прецизионные методики доступа к состоянию гетеросистемы позволяют подобрать условия СО, комфортные для реализации необходимых направлений эволюционного развития материала на всех этапах ЖЦ.

К параметрам порядка, оценивающим степень упорядоченности в условиях континуума в первых бифуркациях, можно отнести:

характеристики дисперсионного твердения (НВ – макроуровень, HV – микроуровень, АСМ – наноуровень);

запас пластичности (способность к сдвиговым деформациям) по отношению к эталону (например, армко-Fe) через соотношение диаметров отпечатков (ГОСТ 9012–59, ИСО 410–82);

концентрацию основного элемента матричной фазы во вторичных;

поврежденность.

Диагностика наносостояний: "кластер (наночастица) → ансамбль наночастиц (нанофаза)" осуществляется прецизионными силовыми методами, позволяющими определять механические свойства (упругость, прочность, способность сопротивляться разрушению) СМК-и нанообъектов. Их аппаратурная реализация мало отличается от зондовой микроскопии, но в связи с силовым характером воздействия иглы на поверхность образца их называют нанотестерами (наноиндентерами).

Принцип действия приборов для осуществления нанотестинга в поверхностных и приповерхностных слоях образцов и изделий толщиной от нескольких нано- до нескольких микрометров в широком диапазоне скоростей нагружения заключается в компьютерно управляемом приложении микронагрузки к алмазному наконечнику (пирамида Берковича, Виккерса, Кнуппа) или атомарно острой фулероидной игле и непрерывной регистрации силы сопротивления внедрению от перемещения в нормальном или тангенциальном направлении. При индентировании в областях с нанометровыми размерами развиваются напряжения, близкие к теоретическому пределу проч-

ности, и относительные деформации в десятки процентов даже в таких хрупких материалах, как карбиды, нитриды и бориды тугоплавких металлов. Ввиду локальной $R \approx 1$ мкм области деформации скорость относительной деформации $\varepsilon = d\varepsilon/dt = dR/R\ dt = v/R$ (даже при скорости абсолютного перемещения v < м/с) достигает значений 10^6 $с^{-1}$, характерных для деформации взрывом. Такие условия характерны для трения без смазочного материала, механического шлифования, абразивного износа, при тонком помоле порошков и в активаторах механохимических реакций, в вершине растущей квазихрупкой трещины. Появилась возможность уйти от усредненных характеристик трения и износа в область явлений на уровне отдельных элементарных событий в наноконтакте.

Несмотря на конструктивные различия, нанотестеры различных фирм-производителей построены по модульному принципу в зависимости от требований заказчика, но содержат одни и те же функциональные узлы: силовую ячейку, формирующую запрограммированный профиль силы внедрения в испытуемый материал, датчик вертикального перемещения индентора, сканирующее устройство, контроллер для синхронного управления всеми узлами, персональный компьютер. Возможно оснащение стандартных приборов (металлографических и инструментальных микроскопов, микротвердомеров типа ПМТ-3) головками и программным обеспечением для придания им функций наноиндентометра.

Основные технические характеристики наноиндентометров: диапазон сил, прикладываемых к зонду, – 1 мкН…2 Н; диапазон вертикальных перемещений зонда – 0,001...500 мкм; разрешение в генераторе силы – 1 мкН; разрешение в измерителе вертикальных и латеральных перемещений – 1 нм (дискретность оцифровки – 0,1 нм); диапазон времен приложения нагрузки – 10 мс…1000 с; частота следования импульсов нагрузки – 10^{-3}...10^2 Гц; разрешение в каналах измерения силы и перемещения – 0,3 мкс.

К видам наноиндентирования металлических сплавов, металлических стекол, мелкодисперсных керамик, композитов, фуллеритов, полимеров, тонких пленок, покрытий (фирменные нанотестеры производства MTS, Hysitron, Micro Materials ebc:, НТ МДТ) можно отнести:

непрерывное наноиндентирование программируемой нагрузкой (нанотвердость, предел текучести, скоростная чувствительность пластических характеристик, вязкость разрушения, пористость, толщина покрытия, размер зерен в многофазных материалах и композитах, локальные модули упругости, внутренние напряжения, сегрегация примесей);

многоцикловое нагружение нормальной нагрузкой (характеристики локального упрочнения, сопротивление усталости, моделирование условий наноконтактного взаимодействия в различных обработках: при трении без смазочного материала, эрозионном износе, шлифовке, тонком помоле);

наносклерометрия – контролируемое воздействие на поверхность аттестованным алмазным или фулероидным наконечником, перемещающимся под действием одновременно приложенных нормальной и тангенциальной сил (коэффициент трения в наноконтакте, износостойкость, характеристики адгезии покрытий и пленок к "подложке", моделирование абразивного и других видов износа);

нанопрофилометрия (исследование топограмм поверхности, рельефов на обработанных деталях и т.п.).

В любой из многочисленных модификаций АСМ используются Ван-дер-ваальсовы, электростатические или магнитные силы, возникающие между кончиком зонда и локальной поверхностью образца. Зонд (заостренная ультрапрочная алмазная или фуллеритовая игла с радиусом при вершине порядка 10 нм) устанавливается на одном из кончиков миниатюрной консольной балки – кантилевере (длина 10...100 мкм, ширина 3...10 мкм и толщина 0,1...1 мкм), другой конец которого закреплен на пьезоманипуляторе. Силу взаимодействия поверхности образца с иглой зонда измеряют по его изгибу, зная жесткость кантилевера (коэффициент жесткости кантилевера ≈ 0,01...1 Н/м на порядок меньше упругих констант межатомного взаимодействия в исследуемом материале). Деформацию измеряют фотоприемником, на который падает свет лазера, отраженный от нерабочей поверхности кантилевера, или пьезодатчиком. Тонкое сканирование осуществляется с помощью трехкоординатных пьезоактуаторов, обеспечивающих перемещение иглы или образца с точностью ангстрема на десятки микрометров по X и Y и на единицы микрометров по Z (рис. 6.4.1). При кажущейся простоте контактного индентирования велика вероятность повреждения поверхности образца и кончика иглы.

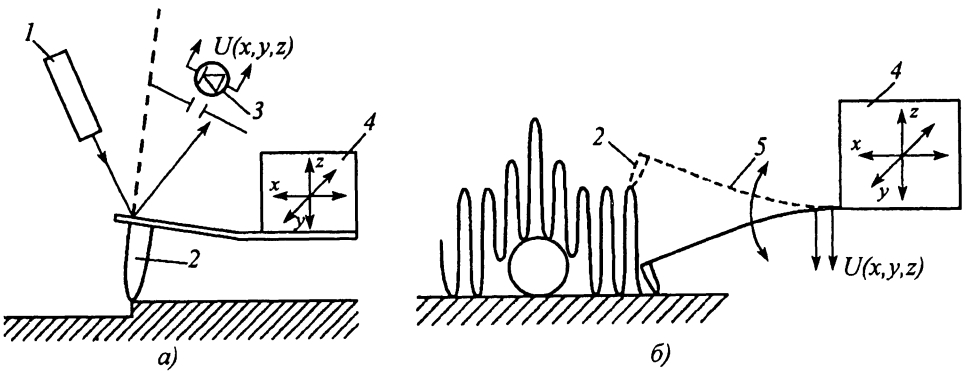


Рис. 6.4.1. Контактное (*а*) и квазиконтактное (*б*) наноиндентирование:
1 – лазерный источник, *2* - зонд; *3* – фотоприемник; *4* – пьезоманипулятор, *5* – кантилевер

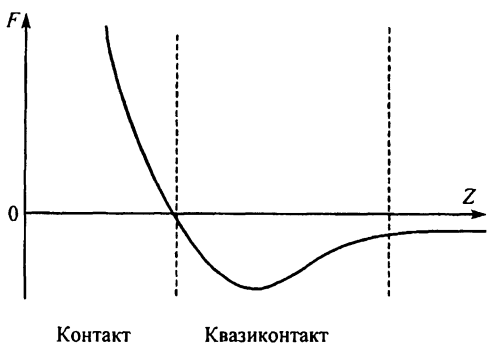


Рис. 6.4.2. Ван-дер-ваальсова сила взаимодействия иглы (*F*) в условиях сканирования поверхности образца (*Z*)

Квазиконтактный режим позволяет достичь атомного разрешения со снижением нагрузки в контакте "игла – образец": осуществляется путем измерения параметров собственных колебаний кантилевера, игла которого находится в десятках и сотнях ангстрем от поверхности образца и взаимодействует с ней посредством дальнедействующих сил Ван-дер-ваальса (рис. 6.4.2).

При низких и сверхнизких усилиях внедрения (микроньютоны), приводящих к образованию отпечатков нанометровой глубины, наблюдается масштабный эффект – практически все материалы, даже самые мягкие, начинают демонстрировать чисто упругое поведение с напряжением в наноконтакте, приближающемся к теоретически предельному ~ 0,1 *G*. Например, "мягкие" в стандартных условиях испытания кристаллы NaCl при наноиндентировании выдерживают напряжения в $10^3...10^4$ раз выше предела текучести. Значения критической глубины составляют от нескольких единиц до десяти нанометров, а рекордными являются измерения, проведенные на пленках толщиной в единицы нанометров. По-видимому, в таких условиях регистрируются механические характеристики бездефектной основы ОКР или нанофазы.

Благодаря быстродействию измерительных преобразователей и малой инерционности силовой ячейки становятся возможными не только классические (квазистационарные) испытания материалов на твердость, но и динамические испытания, при которых скорость относительной деформации материала под индентором достигает $\dot{\varepsilon} = 10^4...10^5$ c^{-1} для материалов с различной структурой – от полимеров до керамик и аморфных сплавов. При этом коэффициент скоростной чувствительности твердости возрастает с уменьшением глубины отпечатка. Во многих случаях (тонкие пленки, многослойные покрытия, многокомпонентные структуры и др.) наноиндентирование является единственно возможным инструментом выявления их механических свойств с исключением влияния подложки, соседних слоев и т.д. На диаграмме нагружения образование микротрещины характеризуется скачком, положение и амплитуда которого зависит от величины нагрузки на индентор. Количественно это позволяет оценить динамическую вязкость разрушения K_{1c} и исследовать влияние скорости деформирования на трещиностойкость.

Дальнейший прогресс в области наноиндентирования связан с фундаментальными исследованиями в области атомарных механизмов в локальной нанозоне ПД и их зависимости от ее размеров и скорости деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алферов Ж.И.** История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. Т. 32. № 3. 1998.

2. **Фришберг И.В. и др.** Воздействие ультрадисперсных порошков медного сплава на стальную поверхность при трении // ДАН. Т. 365. № 5. 1999.

3. **Чеховой А.Н.** О структурных изменениях в высокопрочной стали при малоцикловой усталости // Известия АН. Сер. "Металлы". № 6. 1989.

4. **Чеховой А.Н., Бельков О.В.** Эволюция мартенсита в условиях малоцикловой усталости // Тр. III Международного семинара "Современные проблемы прочности". В. Новгород, 1999.

5. **Валиев Р.З., Александров И.В.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: "Логос", 1999.

6. **Чеховой А.Н.** Перспективы интеллектуальной методологии новых российских нанотехнологий. Наукоемкие технологии. М., 2001. № 5. С. 28 – 37.

7. **Лякишев Н.П.** Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 5.

8. **Чеховой А.Н.** Синергетика объемного наноструктурирования металлических материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2004. № 1. С. 37 – 47.

9. **Кадомцев Б.Б.** Динамика и информация. Успехи физических наук. М., 1999. № 3. 400 с.

10. **Шевченко В.Я.** Структура, симметрия наночастиц и метаморфозы в наномире // Конструкции из композиционных материалов. 2004. № 4. С. 5 – 14.

11. **Серов И.Н., Жабрев В.Н., Марголин В.И.** Исследование воздействия фрактально-матричных структуризаторов на процессы образования и роста наноразмерных структур // Физика и химия стекла. 2004. Т. 30. № 1. С. 21 – 33.

12. **Валиев Р.З. Колобов Ю.Р., Чеховой А.Н.** Космическая прочность и космическая легкость // Интеграл. 2004. № 1.

13. **Чеховой А.Н.** Физико-химические основы наноструктурного упрочнения металлокерамики инструментального и триботехнического назначения // Конструкции из композиционных материалов. 2000. № 1. С. 5 – 14.

14. **Косицин И.И., Сагарадзе В.В., Копылов В.И.** Формирование высокопрочного и высокопластичного состояния в метастабильных аустенитных сталях методом равноканально-углового прессования // ФММ. 1999. Т. 88. № 5.

15. **Blank D.** New carbon materials on the base of fullerenes, nanotubes and ultrafine diamonds. International school "Problems and achievements of physical cyemistry and engineering science of nanomaterials", 7 session, Moscow, 2002.

16. **Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Ильченко С.И.** Структурная модификация полимерных и композиционных материалов углеродными наночастицами // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов. М.: Знание, 2004.

17. **Криштал М.А., Головин С.А.** Внутреннее трение и структура металлов. М.: Металлургия, 1977.

18. **Buchachenko A.L.** Nanochemistry as a direct way to higher technologies of the XXI century. International school "Problems and achievements of physical cyemistry and engineering science of nanomaterials", 7 session, Moscow, 2002. С. 14 – 28.

19. **Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др.** Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. Новосибирск: Наука, 2001.

20. **Чеховой А.Н.** Явление наноструктурирования // Перспективные задачи инженерной науки. Вып. 5. Днепропетровск: Изд-во "Gandeamus", 2003. С. 347 – 355.

21. **Чеховой А.Н.** Технологии объемного наноструктурирования металлических материалов // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов. М.: Знание, 2004. С. 564 – 574.

22. **Колобов Ю.Р., Грабовецкая Г.П., Дударев Е.Ф., Иванов К.В.** Получение, структура и механические свойства объемных наноструктурных композиционных материалов для медицины и техники // Вопросы материаловедения. 2004. № 1. С. 21 – 26.

23. **Pushin V.G., Gunderov D.V., Kourov N.I. et al.** Nanostuctures and phase transformations in TiNi shape memory alloys subjected to severe plastic deformation. Ultrafine Grained Materials-III. A publication of TMS, USA. 2004.

24. **Чеховой А.Н.** CALS-обеспечение интелектуальной методологии в системе качества машиностроения // Информационные технологии в проектировании и производстве. М., 2001. № 2. С. 75 – 78.

25. **Чеховой А.Н.** Диагностика критических состояний в CALS-идеологии нанотехнологий // Информационные технологии в проектировании и производстве. М., 2001. № 3. С. 41 – 45.

26. **Николис Г., Пригожин И.** Познание сложного. М.: Мир, 1990.

27. **Drexler E.K.** Unbounding the future: The nanotechnology revolution // N.Y. Quill Books. 1993.

28. **Morris D.G.** Mechanical behaviour of nanostructured materials. Trans. Tech. Publication LTD, Switzerland, 1998.

29. **McCandlish L.E., Kear B.N., Kim B.K.** Processing and properties of nanostructured WC-Co. Nanostr. Mat. 1992. V. 1. № 2.

30. **Sagaradze V.V., Danilclienko V.E., I Heritier Ph.** The structure and properties of Fe-Ni alloys with a nanocrystalline austeniteformed under different conditions of $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ transformations. Mat. Sci. Eng., A337, 2002.

31. **Gleiter H.** Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. Acta mater. 2000, v. 48.

32. **Siegel R., Fougere G.** Mechanical properties of nanophase metals. Nanostr. Mat. 1995. V. 6. № 1 – 4.

33. **Otsuka K., Shimizu K., Suzuki Y. et. al.** Shape Memory Alloys. Ed. H. Funakubo, Kyoto, Japan, 1984.

34. **Pushin V.G., Stolyarov V.V., Valiev R.Z. et al.** Development of method of severe plastic deformation for the production of high-strendth alloys based on TiNi with a shape memory effects. Phys. Met. Metallogr. V. 94. Suppl.1, 2002.

35. **Golovin Yu., Tyurin A., Farber B.** Investigation of time-dependent haracteristics of materials and micromechanisms of plastic deformation on a submicron scale by a new pulse indentation technique // Jornal of Materials Science, Vol. 37, 2002.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Авиаконструкции интегрального типа – Концепция создания 18

Автоматизация технологических процессов производства конструкций и оснастки из ПКМ – Схема 16, 19

АСТПП – основа автоматизации ТПП 128–131 – Подсистема автоматического проектирования формовочной технологической оснастки 133, 134

– Подсистема отработки конструкций из ПКМ на технологичность 132

– Подсистема проектирования технологических процессов 132, 133

– Подсистема расчета загрузки оборудования, механических рабочих мест 133

– Подсистема расчета программ 133

– Подсистема управления 131, 132

В

Водопоглощение матриц 40, 45

Волокна углеродные – Стадии производства 162 – Технологические схемы изготовления 162–165

Выкладка автоматизированная

– Головка выкладочная 177

– Схемы выкладки отрезков 179

– Технология производства деталей из конструкционных материалов 176–181

Г

Гибка волокнистых металлических конструкционных материалов (ВМКМ) – Обеспечение пластичности листовых ВМКМ 436–440

– Расчет параметров процесса 430–436

– Типизация форм деталей, оснастка и оборудование для изготовления типовых деталей 444–454

– Типовые схемы деформирования 440–444

Д

Детали из углерод-углеродных конструкционных материалов – Способы защиты от оксидирования 171

Ж

Жгуты волокон, пропитанные расплавом матрицы – Виды элементов конструкций 384

– Материалы для армирования жгутов 385

– Металлические матричные материалы 385

– Методы получения 385, 386

– Механические свойства 386, 387

Жидкофазное совмещение связующих с наполнителем – Контроль качества препрегов 94

– Пропитка волокнистых наполнителей без давления 89–92

– Пропитка волокнистых наполнителей под давлением 92–94

З

Заполнители сотовые – Методы изготовления 184–188 – см. также *Конструкции сотовые*

И

Изготовление заготовок деталей из ТКМ выкладкой 60

– намоткой 60, 61

– с посленамоточной пропиткой 61, 62

– с преднамоточной пропиткой 61

Изделия из ПКМ – Организация и управление процессом ТПП 123–127

– Структура производственных мощностей ТПП 127

Изделия из слоистых композиционных материалов (СКМ) – Особенности обработки 509, 510 – Утилизация отходов СКМ 510, 511

К

Каландрование 15, 33

Качество слоистых композиционных материалов 503–507

Компактирование при получении изделий из ВМКМ 404–406

Конструкции авиационные из ПКМ – Схема структуры производства 17

– клееные – см. *Конструкции сотовые*, *Заполнители сотовые*

– пассажирских самолетов – Применение ПКМ 21–24

Конструкции сотовые 181, 182

– Алюминиевые соты 182, 183

– Полимеросотопласты 183

– Стеклосотопласты 183, 184

Контроль неразрушающий качества изделий из ПКМ – Акустические методы и средства 213–218
– Контролируемые параметры 212
– Оптические методы и средства 227–229
– Радиационные методы см. *Радиационные методы и средства НК изделий из ПКМ*
– Радиоволновые методы и средства 232, 233
– Тепловые методы и средства 229–232
Контроль неразрушающий плотности и толщины стенок деталей из ПКМ – Акустические методы и средства 233, 234
– Радиационные методы и средства 234–239
– Радиоволновые методы и средства 242, 243
– Тепловые методы и средства 239
– Электроемкостные методы и средства 240–242
Контроль качества СКМ – Механические методы 503–507
– Неразрушающие методы 507

Л

Ленты-полуфабрикаты плазменного напыления монослойные – Применение 383, 384 – Схемы получения 383
Литье биметаллических заготовок непрерывное 471, 472
– центробежное 472

М

Материалы керамические – Особенности организации производства деталей 527, 528
– Особенности производства деталей 518–520
– Свойства 513–517
– Типовые технологические процессы и оборудование 520–527
Материалы композиционные 27
– волокнистые (ВКМ) – Понятие 371, 372
– слоистые – Соединения материалов, не взаимодействующих между собой 501–503 – Соединения разнородных сталей 499–501
Материалы композиционные волокнистые с металлической матрицей (ВМКМ) – Импульсные процессы обработки 454–460
– Нанесение металлических покрытий на волокна 373–375
– Подготовка и совмещение составляющих при производстве изделий 373
– Получение методом пропитки в вакууме и при нормальном давлении 409–413
– Покрытия из химических соединений 375, 376
– Производство изделий – см. *Производство полуфабрикатов и изделий из ВМКМ*
– Процессы принудительной пропитки 413–418
– Прочностные характеристики 371, 372
– Характеристики расплавов при жидкофазном получении 407
Материалы композиционные металлические слоистые – Классификация материалов и способов их получения 462, 463
– Контактные поверхности 469, 470
– Образование соединения при сварке металлов взрывом 467–469
– Общие сведения 461, 462
– Основы соединения металлов в твердой и жидкой фазах 463–467
Материалы конструкционные – Мировая структура применения 13
Материалы полимерные композиционные – Методика производства изделий 14, 15 – Методы и средства сборки узлов и агрегатов 189–193 – Технические характеристики 13
– нанокомпозиционные 555, 556
Материалы термопластичные композиционные (ТКМ) – Применение 45, 46
– Технологические свойства 46–49
Материалы термоустойчивые 40–43
Материалы углерод-углеродные композиционные – Методы соединений элементов конструкций 171–175
– Области применения материалов различных схем армирования 166
– Общая технологическая схема производства 165
– Способы получения 167,168
– Схема применения деталей 161
Матрица – Теоретическая прочность 27, 28
– Функции 27
Матрицы – Радиационная стойкость 45 – Химическая стойкость 44, 45
– полимерные – Влияние механических свойств матриц на прочность ПКМ 36, 37 – Эксплуатационные свойства 34, 35
Методы изготовления каркасов – Бесприбойное ткачество 81
– Выкладка 79
– Намотка и выкладка 79
– Намотка и прошивка 79
– Плетение и ткачество многомерных каркасов 80, 81
– Совмещение изготовления каркаса и намотки заготовок деталей 80
Метрология наносостояний 563–568

Н

Намотка – Методика испытаний конструкции намотанной детали 159, 160
– Оборудование и оснастка 148–155
– Общая характеристика и классификация видов 143–148
– Технологические параметры процесса 155–159
Наноматериалы – Классификация 546
Наноструктура в аустенитной стали – Особенности формирования 557, 558
Наноструктурирование материала с эффектом памяти формы 560–563
– технически чистого титана 558–560
Нанотехнологии – Классификация для машиностроения 547, 548
– перспективные производственные – Технологические особенности 552–555
Нанотехнология – Понятие 544
– производства композиционного материала на основе порошка меди 560
Наплавка многослойная 473
– под слоем обогреваемого шлака 473
– с вертикальным расположением плакируемой заготовки 474
– электрошлаковая горизонтальная 474
– электрошлаковая жидким металлом 473, 474
– электрошлаковая с наклонным расположением исходной заготовки 474
– электрошлаковая широкослойная 474

О

Оборудование для переработки пластмасс – Литье под давлением 347–351
– Прессование 351–356
– Термоформование 356–360
– Экструзия 360–363
Оборудование для производства препрегов – Назначение, область применения, основные типы 95
– Основные характеристики линий и установок 100–103
– Схемы оборудования, принцип действия и особенности конструирования 95–100
– Требования техники безопасности 100, 104
Оснастка для переработки пластмасс – Головки на экструдерах 369, 370
– для литья под давлением и прессования 363–367
– для формования объемных деталей из листовых и пленочных термопластов 367–369

П

Печь ретортная для корбонизации заготовок 168, 169 – Продукты карбонизации 169–171
ПКМ – Деформационная совместимость компонентов 34, 36
– Методы и средства сборки клееных узлов и агрегатов 189–193
– Применение в автомобилестроении 21, 23, 24
– Применение в конструкциях пассажирских самолетов 21
– Применение в судостроении 24, 25
Плакирование композиционных материалов холодное – Деформация слоистых полос 480–484
– Схемы и способы 479, 480
– Технология 486, 487
– Формирование структуры и свойств СКМ 484–486
Плакирование литейное 470, 471
Пластмассы – Методика производства изделий 14, 15
Оборудование для переработки – см. *Оборудование для переработки пластмасс*
Оснастка для переработки – см. *Оснастка для переработки пластмасс*
Применение в автомобилестроении 21, 23, 24
Пластмассы конструкционные – Понятие 280
Полуфабрикаты тканые 387
Полуфабрикаты ТКМ – Изготовление с применением матричных волокон 53, 55, 56 – Способы изготовления с применением матричных пленок 53, 54
– тканые 56–60
Препреги – Жидкофазный способ получения – *см. Способ получения препрегов жидкофазный, Жидкофазное совмещение связующих с наполнителем*
– Применение 82
– Твердофазное совмещения 82
Препреги ТКМ – Технология изготовления 50–52
Прессование литьевое реактопластов 298, 299
– полос и листов для формообразования изделий из ВМКМ – Оборудование и оснастка 388–391 – Технологические режимы 392–394
– прямое реактопластов 298

– слоистых композиционных материалов 476–478
– термопластов 299
Производство изделий из пластмасс – Особенности и перспективы развития 15–21
Производство полуфабрикатов и изделий из ВМКМ – Механическая сборка 376, 377
– Плазменное напыление 377–379
– Принудительная пропитка 380, 381
– Самопроизвольная пропитка 379, 380
– Склеивание 377
Прокатка ВМКМ вдоль волокон 397, 398
– поперек волокон 394–396
– с деформируемыми волокнами 398–400
Прокатка горячая пакетная 475, 476
Прутки биметаллические – Производство 478, 479

Р

Радиационные методы и средства НК изделий из ПКМ – Метод радиографии 218–220
– Метод радиометрии 222, 223
– Метод радиоскопии 220–222
– Рентгеновская вычислительная томография 223–226
– Специальные радиационные методы 226, 227
Реактопласты – Характеристики 285–291

С

САПР производства изделий из ВМКМ – Критерии разработки процессов 419–421
– Модели процессов изготовления изделий 421–425
– Применение элементов САПР ТПП 425–429
Сварка взрывом в производстве СКМ – Классификация технологических схем и области применения 490–493
– Схемы и параметры 488–490
Сварка деталей из пластмасс – Влияние свойств разнородных полимеров на относительную прочность их сварных соединений 314 – Понятия, механизмы и классификация 311–315
– вибровращением 330
– вибротрением 329, 330
– высокочастотная 330, 331
– закладным нагревательным инструментом 320–322
– инфракрасная 333
– лазерная 333
– литьем под давлением 332
– лучевая прессовая 332, 333
– нагретым газом 315–317
– нагретым инструментом – Основные стадии сварки 318, 319 – Режимы сварки 317
– расплавом 331, 332
– растворителем 333, 334
– световая 333
– трением 328–330
– экструзионная 331, 332
Сварка деталей из пластмасс ультразвуковая – Варианты подготовки стыкуемых кромок 325
– Выделяющаяся теплота 324
– Методы центрирования деталей 326
– Разновидности 323
– Схема 323
Сварка диффузионная – Оборудование и технология 496–499 – Особенности 493–469
– для формообразования изделий из ВМКМ – Оборудование и оснастка 388, 389 – Технологические режимы 392–394
Сварка полимерных композиционных материалов – Специфические особенности 194–197
– закладным нагревательным инструментом 201–206
– нагретым газом 197, 198
– нагретым инструментом 198
– трением 210, 211
– ультразвуковая 206–210
Сварка электрошлаковая 475
Связующие для ПКМ – Классификация 30 – Приготовление 30, 31 – Технологические свойства 31–34
Синергетика наноструктурирования на этапе эксплуатации 549–552
Склеивание деталей из пластмасс 334, 335 – Выбор клея 336, 337
– Технологический процесс – см. *Технологический процесс склеивания*
Соединения винтовые – Соединение с помощью винтов для металлов 264–266
– Соединение с помощью винтов и промежуточного резьбового элемента 268–274
– Соединение с помощью самонарезающих и формующих винтов 266–268

Соединения деталей из полимерных композиционных материалов – Классификация 243, 244 – Механическое крепление 248–251
– болтовые 261–264
– заклепочные – см. *Соединения заклепочные*
– замковые 247, 248
– прессовые 244–247
Соединения заклепочные – Клепка раскатыванием 255–257
– Прессовая клепка 253–255
– Соединение металлическими заклепками 251–257
– Соединение полимерными заклепками 257–261
– Ударная клепка 253
Соединения клеевые – Преимущества и недостатки 335, 336
формованные 274–279
Способ получения препрегов жидкофазный – Подготовка волокнистых наполнителей 85, 86
– Приготовление связующих 83–85
– Технологические характеристики волокнистых наполнителей 86–89
Средства технического оснащения ТПП 115–117
– Методы увязки и контроля обводообразующей оснастки 120–123
– Оснастка для узловой (агрегатной) сборки крупногабаритных интегральных конструкций 119, 120
– Оснастка для формования и склеивания 117–119
Станки намоточные – Лентоформующие тракты 148, 149, 152–154 – Схема 148
– с ЧПУ – Технико-экономические характеристики 150, 151
Стекло техническое – Контроль и испытания изделий 539–541
– Механическая обработка 532, 533
– Нанесение пленочных покрытий 536–538
– Области применения 528–530
– Обрамление 538, 539
– Организация производства изделий 541–543
– Резка 532
– Склейка композиций 538
– Технологические свойства 530–532
– Упрочнение 535, 536
– Формообразование деталей 533–535

Т

Теплостойкость матриц 38, 39
Термопласты – Характеристики 280–285
Термостойкость матриц 38–40
Техника безопасности в производстве изделий из ПКМ – Общие данные 138, 139
– Санитарно-гигиенические требования 142
– Требования к производственным помещениям, оборудованию 140–142
– Требования к технологическому процессу 139, 140
Технологическая подготовка производства (ТПП) изделий из ПКМ – Обеспечение технологичности проектируемых конструкций 106–111
– Общие принципы и методические основы 104–106
– Оптимизация и технико-экономическая эффективность – см. *АСТПП – основа оптимизации ТПП*
– Примеры технологических и нетехнологических конструкций 109, 110
– Разработка директивных материалов 113, 114
– Разработка технологических процессов 108, 112–115
Техническое оснащение – см. *Средства технического оснащения ТПП*
Технологический процесс склеивания – Монтаж склеиваемых деталей 345, 346
– Нанесение клея 343–345
– Открытая выдержка 345
– Подготовка соединяемых поверхностей 339–343
– Приготовление клея 338, 339
– Формирование клеевого слоя 346, 347
– Хранение клеев 337, 338
Трещиностойкость матриц 37, 38
Трубы биметаллические – Производство 478, 479
– из композиционных материалов – Прессовые процессы изготовления 400–403

Ф

Формирование армирующих каркасов композиционных материалов 76–78

Формирование волокнистых наполнителей – Борные волокна 73, 74
– Волокна из карбида кремния 75
– Коротковолокнистая арматура 75, 76
– Металлические волокна 75
– Органические волокна 73
– Стеклянные волокна 71–73
– Тканые армирующие материалы 76
– Углеродные волокна 73, 74
Формование – Перспективы развития 310
– вторичное 16
– из листов и пленок 305–310
– оболочек 15, 16
– раздувное 304, 305
– экструзионное 15
Формование деталей из пластмасс – Литье без давления 296, 297 – Литье под давлением 292–296
– центробежное 297
Формование деталей из ТКМ – Прессование 62, 63 – Термокомпрессионное формование 63, 64
– вакуумное в эластичной оболочке 68–70
– из листовых заготовок ТКМ 67, 68
– магнитно-импульсное 68
– намоткой 65–67
– осадкой 70
– пултрузией 64, 65
Формообразование полуфабрикатов и изделий из ВМКМ 382

Э

Экструзия 299–302
Эффективность ТПП технико-экономическая 134–138

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Боголюбов Владимир Семенович,
Сироткин Олег Сергеевич,
Головкин Геннадий Сергеевич и др.

МАШИНОСТРОЕНИЕ. ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Том III-6

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПЛАСТМАСС, СТЕКЛА И КЕРАМИКИ

Редактор *Т.С. Грачева*
Оформление художника *Т.Н. Погореловой*
Художественный редактор *Т.Н. Галицына*
Корректор *М.Я. Барская*
Инженеры по компьютерному макетированию:
Е.В. Кораблева, И.В. Евсеева, М.А. Филатова, Т.А. Сынкова

Сдано в набор 05.03.2006 г. Подписано в печать 14.11.2006 г.
Формат 70 × 100 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 46,8. Уч.-изд. л. 61,0. Тираж 1000 экз. Заказ 4832

ОАО "Издательство "Машиностроение"
107076, Москва, Стромынский пер., 4. www.mashin.ru

Оригинал-макет изготовлен в издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинал-макета ГУП ППП "Типография "Наука" РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6



РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК