



БИБЛИОТЕКА ИНСТРУМЕНТАЛЬЩИКА

# Инструменты из сверхтвердых материалов

# **Инструменты из сверхтвердых материалов**



БИБЛИОТЕКА ИНСТРУМЕНТАЛЬЩИКА

## Редакционная коллегия

**В.А. Гречишников**

*Председатель редакционной коллегии*

**А.Р. Маслов**

*Главный редактор*

**Ч л е н ы   р е д а к ц и о н н о й   к о л л е г и и :**

**Г.В. Боровской, С.А. Васин, Г.Е. Громов,**

**А.Н. Древаль** *(зам. председателя),*

**И.Н. Жесткова, В.И. Кокарев,**

**С.В. Кирсанов, А.А. Рыжкин,**

**А.Г. Схиртладзе**, *(зам. председателя),*

**О.В. Таратынов, В.Г. Якухин**

**Н.С. Раевская** (Украина),

**В.И. Ходырев** (Беларусь)



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 2014



БИБЛИОТЕКА ИНСТРУМЕНТАЛЬЩИКА

# Инструменты из сверхтвердых материалов

Под редакцией  
академика НАН Украины **Н.В. Новикова**,  
д-ра техн. наук **С.А. Клименко**

**2-е издание, переработанное и дополненное**



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 2014

УДК 621.9.025.7

ББК 34.63

И70

*Коллектив авторов:* Богатырева Г.П., Бурыкин В.В., Гаргин В.В.,  
Гурвич Р.А., Девин Л.Н., Дуб С.Н., Клименко С.А., Копейкина М.Ю.,  
Лавриненко В.И., Лошак М.Г., Майстренко А.Л., Манохин А.С.,  
Мельничук Ю.А., Никитин Ю.И., Новиков Н.В., Пасичный О.О.,  
Пашенко Е.А., Петасюк Г.А., Полушин Н.И., Рыжов Ю.Э., Рябченко С.В.,  
Соколов А.Н., Сороченко В.Г., Сохань С.В., Стахнив Н.Е., Федосеев Л.А.,  
Филатов Ю.Д., Химач О.В., Шейкин С.Е., Шейко М.Н., Шепелев А.А.,  
Шило А.Е., Шульженко А.А.

Рецензент: к.т.н. *Боровский Г.В.* — генеральный директор  
ОАО «ВНИИинструмент», председатель правления Ассоциации  
«Станкоинструмент», заслуженный машиностроитель России

**Инструменты из сверхтвердых материалов** / под. ред.  
И70 Н.В. Новикова и С.А. Клименко. — Изд. 2-е, перераб. и  
доп. — М.: Машиностроение, 2014. — 608 с.: ил. (Б-ка инстру-  
ментальщика)

ISBN 978-5-94275-703-8

Обобщен опыт производства и применения инструментов из сверхтвердых материалов (СТМ) — алмаза и алмазоподобного кубического нитрида бора. Систематизированы знания из области материаловедения СТМ, их производства, детально описаны абразивные и лезвийные инструменты из СТМ, обоснованы предпочтительные области и эффективность применения таких инструментов, показаны возможности дальнейшего развития их производства исходя из потребностей технического прогресса.

Издание 2-е (1-е изд. 2005 г.) переработано и дополнено в соответствии с современными достижениями в области материаловедения и производства инструментов.

Для технологов по механической обработке, специалистов-инструментальщиков, может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам машиностроительных вузов.

УДК 621.9.025.7

ББК 34.63

ISBN 978-5-94275-703-8 © ООО «Издательство Машиностроение», 2014

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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> . . . . .	10
<b>Глава 1. Инструментальные сверхтвердые материалы</b> ( <i>Н.В. Новиков, С.Н. Дуб, Л.Н. Девин</i> ) . . . . .	12
1.1. Физико-механические свойства СТМ. . . . .	12
1.2. Общая классификация СТМ . . . . .	27
1.3. Области применения инструментальных СТМ . . . . .	33
<b>Глава 2. Получение сверхтвердых материалов</b> ( <i>А.А. Шульженко, А.Н. Соколов, Гаргин В.В.</i> ) . . . . .	35
2.1. Синтетический алмаз. . . . .	35
2.2. Кубический нитрид бора . . . . .	46
2.3. Поликристаллические СТМ. . . . .	52
2.4. Алмазный материал, полученный CVD-методом. . . . .	60
2.5. Гибридные сверхтвердые материалы . . . . .	65
<b>Глава 3. Порошки из синтетического алмаза и кубического нитрида бора</b> ( <i>Г.П. Богатырева, Г.А. Петасюк</i> ) . . . . .	72
3.1. Извлечение алмаза из продукта синтеза . . . . .	75
3.2. Шлифпорошки из синтетического алмаза . . . . .	78
3.3. Микро- и субмикропорошки из синтетического алмаза . . . . .	89
3.4. Нанопорошки синтетического алмаза . . . . .	93
3.5. Порошки кубического нитрида бора . . . . .	95
3.6. Компьютерно-аналитические методы экспресс-диагностики характеристик порошков СТМ. . . . .	96
3.6.1. Адекватность значений характеристик порошков СТМ и методы количественной ее оценки. . . . .	97
3.6.2. Экстраполяционно-аффинная 3D-модель зерна порошков СТМ, ее инженерия и приложения. . . . .	100
3.6.3. Компьютерно-аналитическое определение количества и среднего значение угла заострения режущих кромок зерен, ситовой зернистости и показателей ситового зернового состава порошков СТМ . . . . .	103
<b>Глава 4. Методы испытаний инструментальных СТМ</b> ( <i>Н.В. Новиков, М.Г. Лошак</i> ) . . . . .	105
4.1. Определение характеристик алмазных порошков . . . . .	105
4.1.1. Основные характеристики . . . . .	105
4.1.2. Специальные характеристики . . . . .	116
4.2. Определение характеристик cBN-порошков . . . . .	120

4.3.	Корпуса и державки для инструментов на основе СТМ . . . . .	122
4.4.	Технологические (производственные) испытания СТМ . . . . .	123
4.4.1.	Приемо-сдаточные испытания . . . . .	124
4.4.2.	Периодические испытания . . . . .	125
4.4.3.	Сертификационные испытания . . . . .	126
<b>Глава 5.</b>	<b>Виды инструментов на основе СТМ (А.А. Шепелев).</b> . . . . .	<b>128</b>
5.1.	Инструменты с рабочей частью из моно- и поликристалла СТМ . . . . .	128
5.2.	Инструменты с рабочей частью, содержащей порошки СТМ . . . . .	131
5.3.	Абразивные инструменты с агрегатами и поликристаллическими СТМ . . . . .	135
<b>Глава 6.</b>	<b>Лезвийные инструменты из СТМ (С.А. Клименко, Л.Н. Девин, М.Ю. Копейкина, Ю.А. Мельничук, А.С. Манохин)</b> . . . . .	<b>138</b>
6.1.	Виды лезвийных инструментов из СТМ . . . . .	138
6.1.1.	Крепление режущих элементов в корпусе инструмента . . . . .	139
6.1.2.	Режущие пластины и вставки из СТМ . . . . .	144
6.1.3.	Резцы с режущими элементами из СТМ . . . . .	147
6.1.4.	Фрезы с режущими элементами из СТМ . . . . .	153
6.1.5.	Инструменты для обработки отверстий . . . . .	157
6.2.	Изготовление режущих элементов из СТМ . . . . .	159
6.2.1.	Разрезка заготовок поликристаллических СТМ и монокристаллов алмаза . . . . .	159
6.2.2.	Алмазно-абразивная обработка моно- и поликристаллических СТМ . . . . .	164
6.3.	Особенности эксплуатации инструментов с режущими элементами из СТМ . . . . .	190
6.3.1.	Инструменты с режущими элементами из природного алмаза . . . . .	190
6.3.2.	Инструменты с режущими элементами из синтетического алмаза . . . . .	203
6.3.3.	Инструменты с режущими элементами из ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора . . . . .	210
6.3.4.	Повышение эффективности обработки инструментами, оснащенными ПСТМ на основе cBN . . . . .	216
6.4.	Алмазное микроточение деталей оптики . . . . .	223
6.5.	Оценка работоспособности инструментов из ПСТМ . . . . .	225
6.6.	Области эффективного применения режущих инструментов с рабочими элементами из СТМ . . . . .	233
6.6.1.	Применение алмазных инструментов . . . . .	233
6.5.2.	Применение инструментов с режущими элементами из ПСТМ на основе cBN . . . . .	236

---

<b>Глава 7. Алмазно- и сВN-абразивные инструменты</b>	
(А.А. Шепелев, Е.А. Пащенко, О.О. Пасичный) . . . . .	242
7.1. Конструкции алмазно- и сВN-абразивных инструментов . . . . .	242
7.1.1. Композиты на металлической связке . . . . .	250
7.1.2. Композиты на гальванической связке . . . . .	257
7.1.3. Композиты на органической связке . . . . .	260
7.1.3.1. Композиты каучукоподобной связке . . . . .	268
7.1.3.2. Композиты на силоксаной связке . . . . .	271
7.1.3.3. Композиты, адаптирующиеся к условиям нагружения . . . . .	277
7.1.4. Композиты на керамической связке . . . . .	287
7.1.5. Инструменты с упорядоченным расположением зерен СТМ. . . . .	296
7.2. Эффективность применения алмазно- и сВN-абразивных инструментов . . . . .	301
<b>Глава 8. Правящие алмазные инструменты</b>	
(О.В. Химач, М.Н. Шейко) . . . . .	308
8.1. Технологические особенности изготовления инструментов из СТМ для правки и профилирования шлифовальных кругов . . . . .	319
8.2. Методы, условия и режимы эксплуатации. Области применения правящих инструментов и профильных алмазных шлифовальных кругов . . . . .	321
8.3. Технологические рекомендации по изготовлению алмазных правящих роликов . . . . .	330
<b>Глава 9. Заточка инструментами из СТМ (А.А. Шепелев)</b> . . . . .	332
9.1. Особенности заточки инструментов кругами из СТМ. . . . .	332
9.2. Способы заточки режущих инструментов . . . . .	343
9.3. Технологии заточки инструментов кругами из СТМ. . . . .	347
9.4. Заточка затупленных буровых коронок ударного действия . . . . .	362
<b>Глава 10. Инструменты из СТМ для комбинированных методов обработки (В.И. Лавриненко, Р.А. Гурвич)</b> . . . . .	365
10.1. Шлифовальные круги из СТМ для обработки плоских поверхностей режущих инструментов. . . . .	365
10.2. Инструменты для обработки поверхностей вращения . . . . .	380
10.2.1. Обработки наружных поверхностей . . . . .	381
10.2.2. Обработка круглых внутренних поверхностей . . . . .	382
10.2.3. Инструменты для алмазно-электрохимического сверления . . . . .	408



<b>Глава 11. Инструменты на основе СТМ для финишной обработки в машиностроении (Н.Е. Стахив, Ю.И. Никитин, Ю.Э. Рыжов, В.В. Бурыкин, С.В. Рябченко, С.Е. Шейкин) . . . . .</b>	<b>421</b>
11.1. Инструменты для финишной обработки . . . . .	421
11.2. Суперфиниширование . . . . .	423
11.2.1. Особенности процесса . . . . .	423
11.2.2. Инструменты для суперфиниширования . . . . .	426
11.2.3. Особенности эксплуатации инструментов . . . . .	427
11.3. Хонингование . . . . .	428
11.3.1. Сущность процесса . . . . .	428
11.3.2. Плосковершинное хонингование . . . . .	430
11.3.3. Инструменты для хонингования . . . . .	432
11.3.4. Инструмент для обработки мелкоразмерных прецизионных отверстий . . . . .	435
11.3.5. Особенности эксплуатации хонинговальных инструментов . . . . .	436
11.3.6. Хонингование отверстий в деталях из закаленных чугунов и сталей . . . . .	438
11.3.7. Хонингование эластичными брусками . . . . .	440
11.3.8. Технологические среды для хонингования . . . . .	441
11.4. Обработка лентами из СТМ и инструментами на их основе . . . . .	446
11.5. Лепестковые круги из СТМ . . . . .	454
11.6. Финишная обработка зубчатых колес кругами из СТМ . . . . .	458
11.7. Инструменты из СТМ для выглаживания и накатывания . . . . .	466
11.8. Доводочные инструменты . . . . .	469
11.9. Пасты и суспензии из порошков СТМ . . . . .	475
11.9.1. Структурные составляющие паст и суспензий . . . . .	475
11.9.2. Контроль качества паст и суспензий . . . . .	476
11.9.3. Технические характеристики и назначение паст и суспензий . . . . .	479
11.9.4. Технология и оборудование для производства паст и суспензий . . . . .	487
11.9.5. Области применения паст и суспензий из СТМ . . . . .	492
<b>Глава 12. Инструменты для медицины и обработки изделий медицинского назначения (С.В. Сохань) . . . . .</b>	<b>504</b>
12.1. Скальпели с режущим лезвием из алмаза и керамики . . . . .	504
12.1.1. Алмазные скальпели . . . . .	504
12.1.2. Алмазная заточка керамических скальпелей . . . . .	505
12.2. Стоматологический алмазный инструмент . . . . .	506
12.3. Обработка элементов эндопротезов из сапфира, керамических и композиционных материалов алмазным инструментом . . . . .	507

---

<b>Глава 13. Инструменты для обработки резины, полимерных композиционных и древесных материалов</b> ( <i>В.Г. Сороченко, Л.А. Федосеев</i> ) . . . . .	512
13.1. Совершенствование процессов алмазно-абразивной обработки изделий из композиционных материалов . . . . .	512
13.2. Алмазные отрезные круги . . . . .	516
13.3. Алмазные круги и барабаны . . . . .	519
13.4. Алмазные головки шлифовальные . . . . .	522
13.5. Алмазные ножовочные полотна . . . . .	524
13.6. Алмазно-абразивные сверла . . . . .	524
13.7. Зенковки из сверхтвердых материалов . . . . .	526
13.8. Режущие инструменты для обработки древесностружечных плит, слоистых пластиков, резины . . . . .	528
13.8.1. Алмазные барабаны . . . . .	528
13.8.2. Алмазные отрезные круги . . . . .	534
13.8.3. Дисковые пилы с алмазно-твердосплавными пластинами . . . . .	535
13.9. Особенности практического применения инструмента . . . . .	539
13.9.1. Алмазно-абразивная обработка древесностружечных плит, пластиков и резины . . . . .	539
13.9.2. Дисковые пилы с алмазно-твердосплавными пластинами для обработки древесностружечных плит . . . . .	544
13.10. Экологические аспекты алмазно-абразивной обработки полимерных композиционных материалов . . . . .	548
<b>Глава 14. Инструменты для финишной обработки изделий из стекла и камня</b> ( <i>Ю.Д. Филатов</i> ) . . . . .	552
14.1. Конструкции алмазных инструментов . . . . .	552
14.2. Особенности применения алмазных инструментов при обработке стекла . . . . .	554
14.3. Обработка изделий из природного и искусственного камня . . . . .	572
<b>Глава 15. Инструменты для строительной индустрии, горные и буровые породоразрушающие инструменты</b> ( <i>А.Л. Майстренко, Н.И. Полушин</i> ) . . . . .	579
15.1. Композиционные алмазосодержащие материалы для породоразрушающих инструментов и методы их спекания . . . . .	579
15.2. Применение алмазно-твердосплавных гранул в материалах для породоразрушающих инструментов . . . . .	591
15.3. Инструменты для отрезки, шлифовки, сверления элементов строительных конструкций . . . . .	593
15.4. Инструменты для разрушения горных пород . . . . .	601
<b>Список литературы</b> . . . . .	605

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее издание представляет обобщение опыта производства и применения инструментов из сверхтвердых материалов (СТМ) — алмазного углерода и алмазоподобного нитрида бора [20].

Появление синтетических алмазов в середине прошлого столетия стало одним из замечательных событий научно-технической революции. Оно по праву стоит в одном ряду с изобретением приборов электронной техники, лазеров, достижениями атомной физики, космической механики. Несколько столетий выдающиеся ученые, в числе которых были А. Лавуазье, К. Деви, М. Ломоносов, М. Каразин, Г. Муассан, а затем Нобелевский лауреат П. Бриджмен пытались осуществить фазовое превращение углерода из графита в алмаз. Все опыты оказались безуспешными. Необходимо было создать большие прессовые установки в тысячи тонн, нагреть реакционные ячейки до температуры плавления стали. И это оказалось возможным только в 1953—1954 гг. Хотя теоретическое предсказание физико-химической основы фазового превращения углерода было выполнено харьковским ученым О.И. Лейпунским и опубликовано в доступном академическом источнике в 1939 г. Впервые синтез алмаза был осуществлен в 1953 г. в Швеции в лаборатории фирмы «АСЕА», а затем независимо повторен в США в 1954 г. в лаборатории фирмы «Дженерал Электрик». Затем также независимо от других исследователей был выполнен в России в лаборатории Института физики высоких давлений Академии наук СССР.

Развитие производства СТМ, алмазных, а затем СВН-порошков диктовалось потребностями экономики, поддерживалось задачами инструментального производства. В 1961 г. московские ученые Л.Ф. Верещагин, Ю.Н. Рябинин и В.А. Галактионов удостоены Ленинской премии за научное достижение. В 1963 г. ученые Л.Ф. Верещагин (Москва) и В.Н. Бакуль (Киев) были удостоены звания Героя Социалистического Труда. А в 1972 г. О.И. Лейпунский получил диплом на открытие, определившее успех экспериментальных работ по синтезу алмаза в мире.

Сверхтвердые инструментальные материалы с середины XX века заняли важное место в технике и производстве. Их применение определяет возможность производительной механообработки наиболее высокопрочных и труднообрабатываемых конструкционных и функциональных материалов, удельное использование которых в новой технике непрерывно возрастает. Это прежде всего относится к автомобилестроению, производству авиатехники, ракетно-космических конструкций, изготовлению основных элементов радиоэлектроники и электротехники, выполнению изделий из гранита и других высокопрочных абразивных строительных материалов. Инструменты из СТМ определяют эффективность бурения нефтяных и газовых скважин, выполнения строительных и ремонтных работ с железобетонными конструкциями.

К отличительным особенностям инструментов из сверхтвердых природных и синтетических алмазов, кубического нитрида бора относятся не только наи-

высшая твердость, возможность изготовления архиострых лезвийных, самозатачивающихся высокоабразивных инструментов. Этим материалам свойственны высокие износостойкость, теплопроводность, коррозионная устойчивость, низкий коэффициент трения, что предопределяет малый износ, надежность, долговечность, большой рабочий ресурс, стойкость режущих инструментов. Инструменты из СТМ незаменимы при производстве изделий из стекла, полупроводниковых германия и кремния, технической керамики. Их использование позволило значительно повысить производительность труда в механообработке, получить высокое качество обработанной поверхности, улучшить структуру приповерхностного слоя материала деталей, а также обеспечило изготовление сложнопрофильных, уникальных ранее изделий в поточном производстве.

Опыт показывает, что роль механообработки в производстве не только не уменьшилась, а значительно возросла. Увеличилась доля труднообрабатываемых материалов, деталей с поверхностями сложного профиля, нуждающихся в комплексной обработке.

Прогнозируется увеличение выпуска компьютеризированного станочного оборудования для механообработки. В них будут использоваться информационно-управляющие компьютерные системы, позволяющие в реальном времени осуществлять адаптацию инструментального блока с большой гибкостью изменения параметров — подачи, скорости, сочетания различных операций. В этих системах исполнительные механизмы обеспечат инструменту до шести степеней свободы движения. Новая тенденция — предоставление возможности механическим устройствам малоинерционно следовать за исключительно гибкой способностью мощных быстродействующих вычислительных компьютерных комплексов — повысит перспективу использования инструментов из СТМ. Только их характеристики полностью соответствуют требованиям исключительной жесткости, динамической устойчивости, кинематической подвижности исполнительных механизмов новых станков.

В таких системах параметры обработки можно будет пооперационно уточнять в реальном времени, учитывая результаты предварительно достигнутого технологического состояния.

Для технического использования такого потенциала в новой концепции механообработки инструментальные системы должны иметь возможность самокалибровки, малоинерционной нелинейной смены режимов резания, полного контроля в любой момент рабочего цикла.

Среди известных инструментальных материалов сверхтвердые материалы наиболее соответствуют новым требованиям.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Г.В. Боровскому за ценные замечания, специалистам многих организаций — за предоставленную ими информацию, а также всем помощникам, техническим работникам, обеспечившим выпуск настоящей книги.

Авторы внимательно отнесутся ко всем замечаниям и предложениям об уточнении, дополнении, более ясном изложении материала.

*Н.В. Новиков,*  
академик НАН Украины, профессор

## Глава 1

# ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1.1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТМ

Твердость — это свойство материала оказывать сопротивление внедрению в него недеформируемого наконечника-индентора. После статического нагружения индентора определенным усилием на поверхности испытуемого материала (вследствие пластического деформирования части поверхностного слоя) остается отпечаток. В результате контактного воздействия имеют место и упругие деформации. При снятии разгружающего напряжения с индентора в испытуемом материале происходит релаксация упругих напряжений, в результате чего глубина отпечатка уменьшается.

Обычно индентор имеет форму шара, пирамиды или конуса. Его изготавливают из твердого сплава, закаленной стали или алмаза, чтобы обеспечить существенную разницу в деформационных свойствах испытуемого материала и индентора. Испытания СТМ проводят только алмазным индентором, заточенным в форме острой пирамиды, нагружаемым относительно небольшими ( $< 5$  Н) нагрузками. Используют инденторы следующих типов — Виккерса, Берковича и Кнупа, оставляющие отпечатки соответственно в форме квадрата, треугольника и вытянутого ромба (рис. 1.1 *а, б, в*).

После разгрузки индентора измеряют полученный отпечаток, и величина твердости находится как отношение приложенной нагрузки к размеру площади поверхности отпечатка. Твердость имеет размерность отношения единицы силы к единице площади —  $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$ . Такую же размерность имеют характеристики прочности, модулей упругости и давления.

Твердость по Бринеллю определяют путем вдавливания индентора в виде стального шарика, а по Виккерсу — алмазной пирамиды.

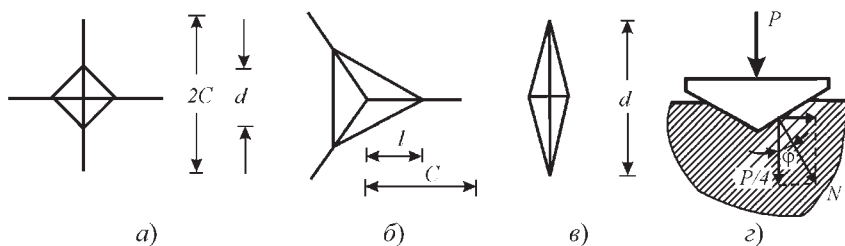


Рис. 1.1. Отпечатки инденторов Виккерса (а), Берковича (б) и Кнупа (в) в хрупких материалах и схема к расчету твердости по Мейеру (г) для пирамиды Виккерса:

$d$  — размер отпечатка по диагонали;  $C$  — длина радиальных трещин

Существуют два подхода к расчету твердости — по Мейеру и Бринеллю (табл. 1.1). В первом случае нагрузка относится к площади проекции отпечатка, во втором — к площади боковой поверхности отпечатка.

### 1.1. Расчетные формулы для определения твердости при использовании различных инденторов

Способ расчета твердости	Расчетные формулы для пирамид		
	Кнупа	Виккерса	Берковича
По Мейеру	$H = 14,23P/d^2$	$H = 2P/d^2$	$H = 1,732P/l^2$
По Бринеллю	$H = 12,96P/d^2$	$H = 1,854P/d^2$	$H = 1,57P/l^2$

Сумма нормальных сил, действующих на грани отпечатка, равна  $4N = P/\sin(\varphi/2)$ . Площадь поверхности пирамиды с квадратным основанием  $F_{\text{пов}} = d^2/\sin(\varphi/2)$ , где  $d$  — диагональ отпечатка (рис. 1.1, а). Тогда среднее давление, действующее на единицу поверхности отпечатка, равно

$$\frac{4N}{F_{\text{пов}}} = \frac{2P}{d^2}.$$

Таким образом, для определения твердости по Мейеру измеряют действующую нагрузку и площадь проекции отпечатка.

При использовании подхода Мейера твердость имеет ясный физический смысл — это среднее давление в области контакта инден-

тора с образцом. Подход Мейера нашел применение при испытаниях на нанотвердость (испытания на твердость по глубине отпечатка при нагрузках меньше 100 мН). При таких испытаниях регистрируется зависимость величины вертикального перемещения индентора  $h$  при росте нагрузки  $P$  и при ее снижении. В результате получают диаграмму вдавливания индентора (рис. 1.2). Внедрение индентора под действием увеличивающейся нагрузки происходит за счет объемного упругопластического деформирования материала образца. При разгрузке индентора происходит некоторое уменьшение глубины отпечатка из-за релаксации упругих напряжений (см. рис. 1.2). Величина упругого восстановления зависит от соотношения твердости и модуля упругости испытываемого материала. Размер диагоналей отпечатка уменьшается на существенно меньшую величину, чем глубина отпечатка. Для материалов с относительно малой величиной отношения твердости к модулю упругости  $E$  (например, металлов) уменьшение глубины отпечатка при разгрузке индентора незначительно (рис. 1.3). Для СТМ и хрупких материалов (например, техническая керамика) упругое восстановление глубины отпечатка значительно выше и может достигать 70 % (рис. 1.4; 1.5).

Анализ площади диаграммы вдавливания позволяет оценить соотношение работ упругой и пластической деформации. Общая работа, выполненная при вдавливании, пропорциональна площади  $OAB$  под кривой нагружения индентора (см. рис. 1.2). Работа пластической деформации пропорциональна площади  $OAC$ , ограниченной участками нагружения и разгрузки индентора, а работа упругой деформации — площади  $SAB$  под кривой разгрузки индентора. При внедрении индентора в металлы, работа, в основном, расходуется на пластическое деформирование материала в зоне нагружения. Алмазоподобные углеродные пленки при внедрении индентора ведут себя, как твердая резина. При разгрузке индентора глубина отпечатка уменьшается на 95 % (см. рис. 1.5). В этом случае почти вся работа затрачена на упругое деформирование пленки.

Перемещение индентора возможно измерить с точностью выше одного нанометра, что позволяет проводить испытания при нагрузках в доли микроныютона. В результате отпадает необходимость в трудоемком и часто ненадежном измерении размеров отпечатка, полученного при малых нагрузках на индентор. Информация о глу-

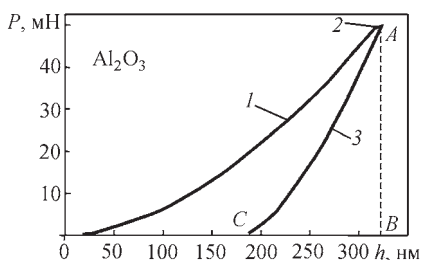


Рис. 1.2. Диаграмма внедрения индентора Берковича для монокристалла сапфира:

- 1 — участок нагружения индентора;  
2 — участок выдержки индентора;  
3 — участок разгрузки индентора

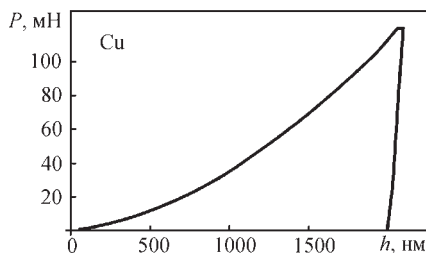


Рис. 1.3. Диаграмма внедрения индентора Берковича для меди

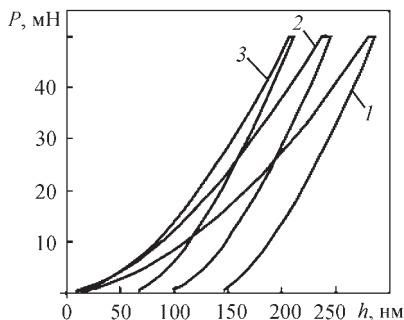


Рис. 1.4. Диаграмма внедрения индентора Берковича для:

- 1 — SiC; 2 — cBN; 3 — cBC<sub>2</sub>N

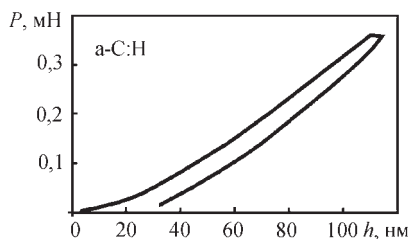


Рис. 1.5. Диаграмма внедрения индентора Берковича для алмазоподобной гидроуглеродной пленки

бине отпечатка под нагрузкой позволяет исключить влияние упругого восстановления на величину твердости. Так как процесс разгрузки индентора сопровождается упругим восстановлением, то по кривой разгрузки можно оценить модуль упругости испытуемого материала.

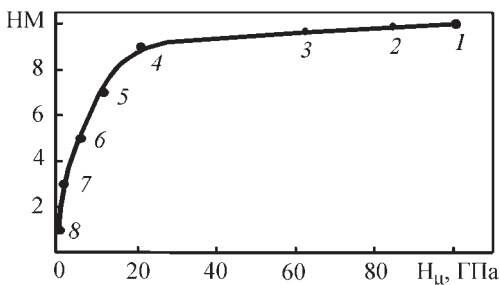
Испытание на твердость — высокочувствительный метод механических испытаний, не требующий изготовления специальных образцов. К особенностям измерения твердости относится его высокая локальность. Применяя малые нагрузки, можно оценить ме-



ханические свойства отдельных структурных составляющих размерами в несколько микрометров. Главным преимуществом метода твердости является его универсальность. Испытания на твердость можно провести как на очень мягких (тальк, графит), так и на очень твердых материалах. Благодаря высоким сжимающим напряжениям в отпечатке, при испытаниях на твердость возможно пластическое течение у самых хрупких и прочных материалов, таких как сапфир, кубический нитрид бора и даже алмаз.

Твердость талька, одного из самых мягких материалов, равна всего 0,03 ГПа, твердость отожженной меди — 0,8 ГПа, а сталь можно закалить до твердости около 10 ГПа. Наибольшей твердостью из известных в природе материалов обладает алмаз, микротвердость которого равна приблизительно 100 ГПа при нагрузке 5 Н. На шкале твердости минералов Мооса твердость алмаза обозначена наивысшим баллом — 10. У следующего за ним природного материала корунда твердость по Моосу составляет 9 баллов. Однако микротвердость корунда почти в 5 раз меньше, чем алмаза (рис. 1.6).

Класс СТМ — это материалы, микротвердость которых выше микротвердости корунда. Из природных материалов к сверхтвердым относится только алмаз. К настоящему времени синтезировано большое количество других сверхтвердых материалов. Самым твердым из них долгое время оставался кубический нитрид бора — cBN. В природе такой материал не обнаружен. Прямым превращением графитоподобного твердого раствора BN—C при давлении 25 ГПа и температуре 2100 К была получена новая сверхтвердая фаза, кубический карбонитрид бора —  $BC_2N$  [25]. Микротвердость и модуль упругости  $BC_2N$  являются промежуточными между алмазом и cBN (табл. 1.2), что делает его вторым после алмаза по твердости материалом.



**Рис. 1.6.** Соотношение твердости по шкале Мооса НМ с микротвердостью различных материалов:

1 — алмаз; 2 — кубический карбонитрид бора; 3 — кубический нитрид бора; 4 — корунд; 5 — кварц; 6 — апатит; 7 — кальцит; 8 — тальк

## 1.2. Механические свойства сверхтвердой кубической фазы $BC_2N$ при комнатной температуре

Соединение	Микротвердость, ГПа	Твердость по Кнупу, ГПа	Нанотвердость, ГПа	Модуль $E$ , ГПа	Коэффициент трещиностойкости $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
cBN	62	44	55	909**	3
cBC <sub>2</sub> N	76	55	75	980	4,5
Алмаз*	115	63	—	1141	5

\* Монокристалл.

\*\* Рассчитано по упругим постоянным монокристаллического cBN.

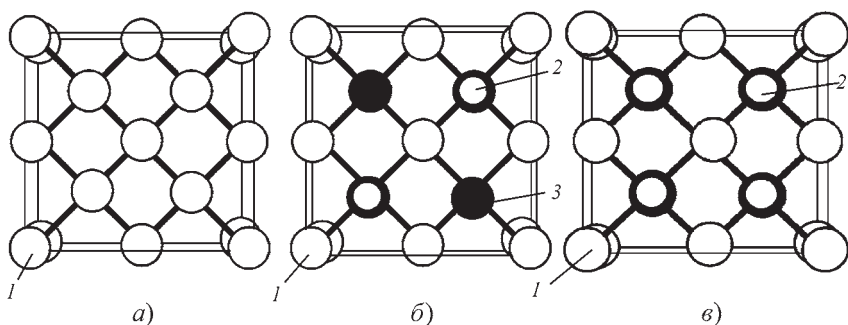
Уникальный комплекс физико-механических свойств алмаза и других СТМ определяется малым расстоянием между атомами, направленной ковалентной (очень прочной) связью атомов в кристаллической решетке, большой локализацией валентных электронов и образованием наиболее энергетически устойчивых электронных конфигураций на субатомном уровне. Исключительную твердость трех основных сверхтвердых материалов — алмаза, кубического карбонитрида бора и кубического нитрида бора связывают с симметричным направлением атомных связей в кристалле (рис. 1.7).

Внедрение индентора вызывает упругие, пластические деформации, инициирование и развитие микротрещин. В последнем случае образуются новые поверхности. Таким образом, микротвердость  $H_{\mu}$  можно представить суммой соответствующих составляющих:

$$H_{\mu} = H_{\text{упр}} + H_{\text{пл}} + H_{\text{тр}} + H_{\text{поверх}}, \quad (1.1)$$

где  $H_{\text{упр}}$ ,  $H_{\text{пл}}$ ,  $H_{\text{тр}}$ ,  $H_{\text{поверх}}$  — составляющие микротвердости соответственно упругая, пластическая, от инициирования и развития микротрещин (поверхностная).

Микротвердость связана с другими физико-механическими свойствами материалов. Соотношение между микротвердостью  $H_{\mu}$  и пределом текучести  $\sigma_T$  зависит от модуля упругости  $E$ . Для пла-



**Рис. 1.7.** Кристаллическая решетка алмаза (а), карбонитрида бора (б) и cBN (в): а — 1 — атомы углерода; б — 1 — атомы углерода; 3 — атомы азота; 2 — атомы бора; в — 1 — атомы азота; 2 — бора

стичных металлов, у которых  $\sigma_t/E \leq 0,01$ , соотношение между числом микротвердости и пределом текучести в координатах  $p_t/E$  и  $\sigma_t/E$  прямолинейно ( $p_t$  — давление, определяющее начало течения вещества, которое соответствует образованию валика материала, выдавливаемого индентором).

Для веществ, характеризуемых соотношением  $\sigma_t/E \geq 0,01$ , материал смещается радиально от точки вдавливания, деформирование происходит упруго вдали от индентора, валик не образуется. Для этого случая установлена следующую зависимость между давлением начала течения и пределом текучести [22]:

$$p_t = \sigma_t \left[ C + K \left( \frac{3}{3 - \lambda} \right) \ln \frac{3}{\lambda - 3\mu - \lambda\mu} \right], \quad (1.2)$$

где  $\mu = (1 + \nu)\sigma_t/E$ ;  $\lambda = 6(1 - 2\nu)\sigma_t/E$ ;  $C = 0,28$  и  $K = 0,60$  (по Д. Маршу);  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

У многих тугоплавких соединений предел текучести очень высок и близок к пределу прочности. Только некоторые из таких материалов могут пластически деформироваться в условиях изостатического нагружения в аппарате высокого давления (АВД) — карбиды титана и вольфрама, нитриды алюминия и оксид бериллия. Тут следует говорить скорее о сверхтвердом состоянии вещества в стесненных условиях деформирования. При очень высоком давлении (десятки гигапаскалей), которое достигается под инден-

тором, у многих тугоплавких соединений наблюдаются лишь небольшие сдвиговые деформации. У тугоплавких нитридов и карбидов следы пластических деформаций обнаружены только при очень высоких напряжениях в условиях объемной стесненной деформации.

Величина предела текучести алмаза и других СТМ не установлена, так как это очень хрупкие материалы. При выделении группы СТМ нельзя принять в качестве основного критерия наличие или отсутствие пластичности. На уровень пластических свойств как физическую характеристику влияют температура, стесненность деформаций (напряженное состояние), структурные и фазовые превращения под давлением. Микротвердость материалов, безусловно, связана с комплексом других физических и механических характеристик материалов, таких как упругость, пределы прочности и текучести  $\sigma_T$ ; с физическими и термодинамическими характеристиками веществ — энергией кристаллической решетки, энергией разрыва химических связей, поверхностной энергией, теплотой плавления. Иллюстрацией может служить табл. 1.3, в которой приведен ряд характеристик для некоторых металлов (в порядке увеличения их твердости). Твердость растет с возрастанием ряда характеристик физико-механических свойств, но аналитически определенную общую закономерную связь твердости с характеристиками прочности, упругости и пластичности материалов установить не удалось.

Твердость существенно зависит от типа кристаллической решетки, плотности упаковки атомов, межатомного расстояния, типа межатомной связи и особенностей конфигурации электронной оболочки атомов.

Воспользовавшись известными в физике и механике твердого деформируемого тела выражениями, преобразуем формулу (1.1):

$$H_{\mu} = K_1 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}} + K_2 \frac{Gb}{d_0} + K_3 \sqrt{\frac{2E\gamma}{L}} + K_4 \gamma, \quad (1.3)$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4$  — коэффициенты пропорциональности;  $E$  — модуль Юнга, ГПа;  $\gamma$  — свободная поверхностная энергия, кДж;  $G$  — модуль сдвига, ГПа;  $b$  — вектор Бюргерса;  $d, d_0$  — межатомное расстояние и расстояние между атомами в соседних плоскостях сдвига, мм;  $L$  — критический размер трещины, мм.

Используя выражения для определения зависимости энергии межатомной связи от упругих и термических характеристик

$$E \approx E_0 a_c / d^2; \quad G \approx E_0 a_c^3 / d^3; \quad \gamma \approx E_0 a_c / d^2, \quad (1.4)$$

где  $E_0$  — энергия межатомной связи, кДж;  $a_c$  — уровень валентности, получаем

$$H_\mu = M_1 \frac{E_0 a_c}{d^2 \sqrt{d}} + M_2 \frac{E_0 a_c^2 b}{d^3 d_0} + M_3 \frac{E_0 a_c}{d^2 \sqrt{L}} + M_4 \frac{E_0 a_c}{d^2}. \quad (1.5)$$

### 1.3. Твердость, прочностные и энергетические характеристики различных металлов

Металл	Микротвердость $H_\mu$ , ГПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Модуль упругости $E$ , ГПа	Молярная энергия кристаллической решетки, кДж/моль	Молярная теплота плавления, кДж/моль
Al	0,17	29	70	314	10,78
Au	0,22	—	77	345	12,66
Ag	0,25	53	81	290	11,28
Cu	0,34	69	127	342	13,04
Pd	0,46	—	121	390	16,72
Pt	0,55	—	180	510	19,64
Fe	0,61	112	223	405	13,75
V	0,63	114	131	503	23,03
Ni	0,64	78	196	426	17,47
Ta	0,87	271	186	775	31,35
Zr	0,90	129	68	584	20,90
Ti	0,97	147	104	470	17,13
Co	1,04	—	215	430	16,30
Mo	1,53	313	318	652	36,53
Be	1,67	227	311	322	14,63
Ir	1,76	—	528	641	26,30
W	3,43	700	394	905	35,19

Микротвердость веществ может быть аналитически выражена через энергию межатомных связей, уровень ковалентности, межатомное расстояние и характеристики сопротивления деформированию и разрушению, т.е. вектор Бюргерса, критический размер дефекта. В табл. 1.4 в качестве примера представлены данные о связи структуры и микротвердости некоторых тугоплавких соединений. Прослеживается связь микротвердости с плотностью упаковки для различных соединений из одних и тех же атомов.

#### 1.4. Структура и микротвердость тугоплавких соединений

Соединение	Элементарная ячейка	Структурный тип	Межатомное расстояние $d$ , $\times 10^{-10}$ , м	Микротвердость $H_{\mu}$ , ГПа
TiB	Ромбическая	FeB	3,81	27,0
TiB <sub>2</sub>	Гексагональная	AlB <sub>2</sub>	2,37	33,0
ZrB	Кубическая	NaCl	2,32	35,0
ZrB <sub>2</sub>	Гексагональная	AlB <sub>2</sub>	2,54	22,5
HfB	Кубическая	NaCl	2,31	32,0
HfB <sub>2</sub>	Гексагональная	AlB <sub>2</sub>	2,51	29,0
Nb <sub>2</sub> N		ZnS	1,88	17,0
NbN	Кубическая	NaCl	2,19	15,0
TiC			2,16	31,7
ZrC			2,34	29,5
TiN			2,12	20,5
ZrN			2,27	16,7
HfN			2,25	16,0

У прочных и твердых тел межатомные расстояния должны быть малы.

Теоретическая прочность при растяжении и сдвиге равна:

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{2\pi d_0}; \quad \sigma_{\max} = \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}. \quad (1.6)$$

Связи между атомами в ковалентных соединениях жесткие, и этим можно объяснить их хрупкость после некоторой упругой деформации.

Микротвердость можно выразить аналитически:

$$H_{\mu} = \frac{1}{3}\alpha(1-i)g\rho_c \cdot 10^{-18}, \quad (1.7)$$

где  $\alpha$  — степень локализованности валентных электронов в узлах;  $i$  — степень ионности химических связей;  $g$  — фактор гомогенности распределения сшивок в кристаллах;  $\rho_c$  — плотность сшивки ( $\rho_c = 0,5\Delta - N$ , где  $N$  — число атомов в единице объема).

Для алмаза характерна стабильная  $sp^3$ -конфигурация валентных электронов атома углерода и максимальная плотность сшивки. Однако такой признак, с которым можно связать высокую прочность и твердость алмазного кристалла, уникален. Поэтому представляется возможным отнести к сверхтвердым и такие материалы, у которых наличие  $sp^3$ -конфигураций электронов у атомов сочетается с некоторым числом нелокализованных электронов.

Взаимодействие связанных и «делокализующихся» радикалов способствует перераспределению электронов между атомами металла и металлоида и образованию характерной ионной кристаллической решетки. Комбинация радикалов с делокализованными электронами обеспечивает металлическую компоненту межатомных воздействий в указанных материалах.

Для карбидов, боридов и нитридов переходных металлов установлено (в отличие от алмаза) повышенное число валентных электронов на атом. При этом невозможна полная компенсация орбитальных и спиновых моментов всех электронов, что приводит к появлению радикальных состояний и определяет появление ограниченной микропластичности. В целом для этой группы высокотвердых материалов характерны более слабая локализация валентных электронов и менее прочные межатомные связи, отличающиеся повышенной ионностью.

Исходную твердость ряда соединений можно повышать закалкой. Выдержка после нагрева в жидком азоте, например, приводит к увеличению доли  $sp^3$ -гибридов вследствие сбора нелокализованных электронов. Полученное состояние сохраняется при обычной температуре, например, у карбидов циркония.

При плотной упаковке атомов в единице объема концентрируется много связей, разрушение которых окажется особенно затруднительным, если направленных связей будет больше трех.

К легким элементам, которые в наибольшей степени удовлетворяют указанным требованиям, можно отнести бериллий, бор, углерод, азот, кислород, алюминий, кремний, фосфор. Соединения этих элементов между собой относятся к неметаллическим тугоплавким соединениям. Они имеют преимущественно ковалентный тип химической связи. Уравнение (1.5) дает возможность проанализировать корреляционные связи твердости с ростом ковалентности межатомных связей.

Наиболее прочные и наиболее твердые из известных веществ состоят из указанных элементов или являются их соединениями с переходными металлами: титаном, цирконием, гафнием, ванадием, ниобием, танталом, хромом, молибденом и вольфрамом.

Анализ показывает, что корреляция микротвердости с энергией межатомной связи веществ, обладающих наиболее высокой твердостью, нелинейная (рис. 1.8). Фактор множественной корреляции составляет для оксидов, карбидов и боридов тугоплавких соедине-

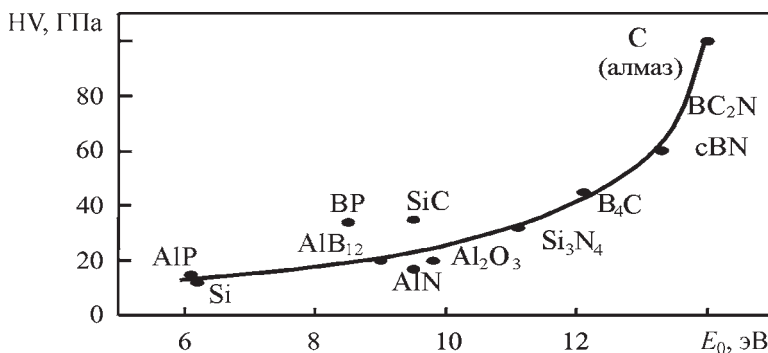


Рис. 1.8. Зависимость микротвердости от энергии межатомной связи для ряда веществ



ний 0,72. Его значение для зависимости твердости от фактора  $E_0 a_c / d^2$  [см. формулу (1.4)] составляет 0,8, а при оценке зависимости твердости от удельной энергии атомарной связи оно близко к единице.

Хрупкие вещества — это ионные и ковалентные кристаллы, у которых сдвиг сопровождается разрывом связей. Выделить из хрупких твердых веществ такие, которые относятся к сверхтвердым, без определенных допущений невозможно. Понятия сверхсвойств вводятся в физике обычно для обозначения резкого изменения свойств веществ при изменении такого важного термодинамического параметра, как температура. Важно проанализировать изменения твердости в связи с видом напряженного состояния, условием стесненности пластической деформации.

Давление — второй после температуры термодинамический параметр, определяющий состояние вещества. Поэтому сверхтвердыми можно было бы назвать, например, вещества, которые резко изменяют свою твердость при изменении (увеличении) давления. Однако такого определения недостаточно, поскольку в это семейство веществ попадут не только хрупкие высокотвердые, но и многие вещества, остающиеся все же пластичными после полиморфного перехода.

Если обратиться к такому параметру, как температура, то и в этом случае выделить сверхтвердые вещества не представляется возможным. У металлов, ионных соединений и кристаллов с ковалентной межатомной связью с повышением температуры сопротивление сдвиговой деформации монотонно снижается. Гомологическая температура характеризует переход от хрупкого состояния к пластичному. С понижением степени ковалентности материалов она уменьшается. Значения температуры перехода в вязкое состояние веществ с ковалентными связями приведены в табл. 1.5. Из нее следует, что нельзя установить температурной границы перехода у веществ с ковалентной связью, отличающей характер их разрушения (вязкий — хрупкий) от характера разрушения металлов и ионных кристаллов.

Следовательно, в настоящее время нет определенных физических оснований для определения класса СТМ.

Однако можно предложить в качестве основания определения СТМ критерии твердости. Выделяя СТМ в определенную группу,

### 1.5. Температура перехода в хрупкое состояние веществ с ковалентными связями

Вещество	Энергия активации движения дислокации $U_0$ , эВ	Параметры		Температура $T$ , К
		$\alpha$	$t_r^x$	
Ge	1,6	15,3	0,83	990
Si	2,2	15,1	0,82	1370
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9	9,7	0,65	1520
ZrC	3,1	9,5	0,65	2460
TiC	2,5	8,4	0,61	2160
WC	1,5	5,5	0,49	1770
NbC	1,8	5,7	0,48	1770
Fe <sub>2</sub> C	0,5	4,9	0,46	840
TiB <sub>2</sub>	1,1	4,1	0,42	1340
HfB <sub>2</sub>	0,8	2,9	0,35	1130
ZrB <sub>2</sub>	0,6	2,1	0,29	970
Be	0,4	3,0	0,35	550
Cr	0,2	1,0	0,20	440
Ta	0,3	1,0	0,20	650
Mo	0,2	0,5	0,17	490

Примечание. Степень локализованности валентных электронов в узлах  $\alpha = U_0/kT_{пл}$ ; гомологическая температура  $t_r^x = T/T_{пл}$ , где  $U_0$  — энергия активации движения дислокации, эВ;  $k$  — коэффициент;  $T_{пл}$  — температура плавления вещества, К;  $T$  — температура, К.

исходят из того, что их исключительная твердость существует в обычных по температуре и давлению условиях, тогда как сверхпроводящее и сверхтекучее состояние вызывается именно их изменениями и нуждается в количественном особом ограничении.

Таким образом, можно заключить, что к классу сверхтвердых относятся материалы главным образом с ковалентными направленными связями, с микротвердостью выше микротвердости природного корунда (т.е. более 20,6 ГПа), а также природный алмаз. Материалы,

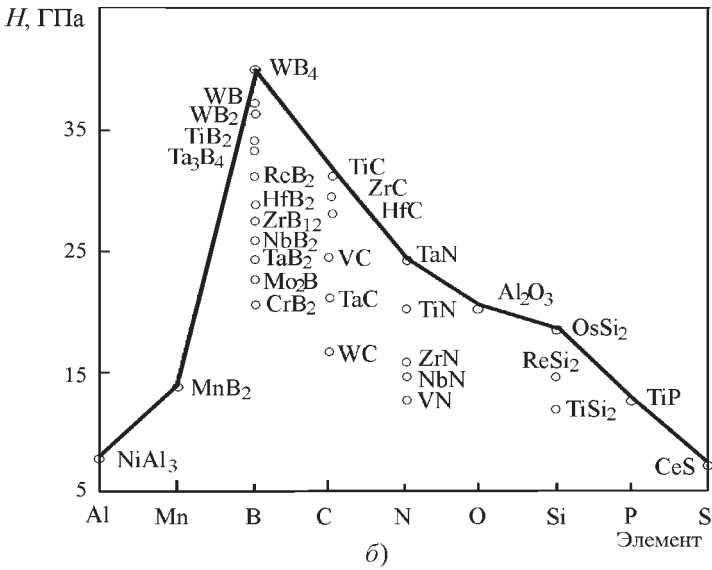
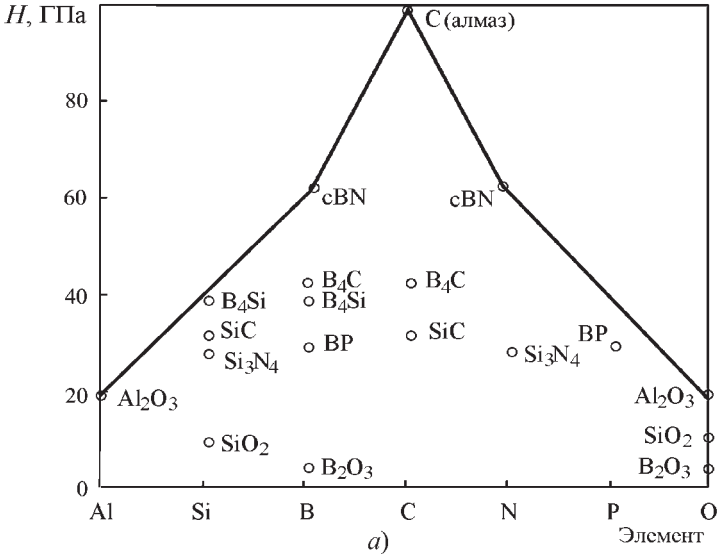


Рис. 1.9. Пирамиды твердости неметаллических (а) и металлоподобных (б) тугоплавких соединений

твердость которых выше, чем металлов (т.е. 5...20 ГПа), можно рассматривать как высокотвердые.

Неметаллические тугоплавкие соединения включают 10 сверхтвердых веществ, образующих «пирамиду» твердости, представленную на рис. 1.9, *а*. Среди веществ с ковалентными связями наибольшую твердость имеют карбиды, а вслед за ними — бориды, нитриды, оксиды.

Сверхтвердых соединений среди металлоподобных тугоплавких веществ значительно больше (рис. 1.9, *б*). Наибольшую твердость имеют на диаграмме твердости бориды, за ними следуют карбиды. Принимая граничным для группы СТМ значение 20,6 ГПа, к ней относим по приведенным диаграммам из числа ныне известных веществ 57 боридов, 15 карбидов и 2 нитрида. Всего 74 металлоподобных соединения.

Новые вещества, обладающие особой твердостью, следует искать на основе принципов изовалентного замещения и образования тройных и четверных неметаллических соединений, используя технику экстремально высоких давлений и температур. Об успехе в этом направлении свидетельствует получение кубического карбонитрида бора.

## 1.2. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СТМ

В качестве основного классификационного критерия сверхтвердых материалов принимается характеристика структурного строения, исходя из степени кристалличности, числа фазовых составляющих и однородности структуры. При этом можно выделить три основные группы СТМ. К первой группе отнесем монокристаллы СТМ, ко второй — однородные поликристаллические СТМ (ПСТМ), к третьей — однородные и неоднородные композиты.

Другой основной классификационной характеристикой, разделяющей группы СТМ, следует считать технологию их получения. Технологией определяются многие особенности структурного состояния СТМ, внутренняя и поверхностная дефектность, характер вхождения в структуру примесей, а следовательно, и основные физико-химические свойства. Для каждой из указанных групп можно выделить три подгруппы, различающиеся по способам получения СТМ.

К первой из них относятся способы получения СТМ при экстремально высоких статических и динамических давлениях и высокой температуре. Ко второй — горячее изостатическое прессование при высоком давлении в газостатах, электроразрядное спекание под высоким давлением. В этих способах достигается рабочее давление 10...20 МПа, но при этом реализуется в наиболее полной мере всестороннее сжатие в изотермических условиях. К третьей подгруппе относятся лазерный синтез, плазменное осаждение, детонационное напыление, т.е. способы, где высокое давление достигается в твердом теле в результате переходных термодинамических процессов.

Классификация СТМ основана на различиях в структурном состоянии и учете особенностей технологии получения СТМ (табл. 1.6).

### 1.6. Классификация сверхтвердых материалов

Структура	Основа материала	Способ получения
Монокристаллы	Углерод	Кристаллизация из расплава при высоком динамическом давлении, прямая перестройка решетки Кристаллизация из расплава при высоком статическом давлении Кристаллизация при низком давлении из расплавов и растворов, эпитаксиальное осаждение Лазерное и радиационное облучение, плазменное осаждение, детонационное напыление
	cBN	Фазовое превращение или кристаллизация из расплава при высоком динамическом давлении, прямая перестройка решетки Кристаллизация из расплава при высоком статическом давлении Кристаллизация при низком давлении из растворов и расплавов, эпитаксиальное осаждение Лазерное и радиационное облучение, плазменное осаждение

Окончание табл. 1.6

Структура	Основа материала	Способ получения
Поликристаллы	Углерод	Высокотемпературное спекание при высоком динамическом давлении Высокотемпературное спекание при высоком статическом давлении Горячее изостатическое прессование и спекание в газостатах Эпитаксиальное осаждение
	cBN	Высокотемпературное спекание при высоком динамическом давлении Высокотемпературное спекание при высоком статическом давлении Горячее изостатическое прессование и спекание в газостатах Эпитаксиальное осаждение
Композиты (однородные и неоднородные)	Углерод	Высокотемпературное спекание при высоком динамическом давлении Высокотемпературное спекание при высоком статическом давлении Горячее изостатическое прессование и спекание в газостатах Лазерное облучение, плазменное осаждение, детонационное напыление
	cBN	Высокотемпературное спекание при высоком динамическом давлении Высокотемпературное спекание при высоком статическом давлении Горячее изостатическое прессование и спекание в газостатах Лазерное облучение, плазменное осаждение, детонационное напыление

Сверхтвердые материалы, которые выпускают в промышленных объемах, делят на две большие группы — на основе алмаза и на основе кубического нитрида бора.

СТМ выпускают в виде порошков или поликристаллов (ПСТМ), а также используют в составе инструментальных композиционных материалов как наполнители.

В зависимости от размера зерен и назначения порошки СТМ делят на четыре группы:

- 1) шлифпорошки (размер зерен от 40 до 2500 мкм);
- 2) микропорошки (размер зерен от 1 до 60 мкм);
- 3) субмикропорошки (размер зерен от 0,1 до 1 мкм).
- 4) нанопорошки (размер зерен от  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  мкм)

В зависимости от вида сырья, из которого их изготавливают, шлифпорошки делят на две группы — АС и АР. Шлифпорошки типа АС получают методом отсева порошков из продукта синтеза алмазов на ситах. Шлифпорошки типа АР получают путем дробления ПСТМ.

Шлифпорошки различных марок отличаются по прочности, по форме зерен, их морфологии.

Микропорошки получают дроблением шлифпорошков или по специальным технологиям синтеза. Они выпускаются промышленностью в двух диапазонах зернистости — узком и широком, которые обозначаются марками АСМ и АСН.

Субмикропорошки получают разделением на высокооборотных центрифугах из предварительно отобранного продукта размером менее 1 мкм.

Классификация поликристаллов СТМ также основана на способе их получения и особенностях структуры. Их делят на две большие группы — на основе алмаза и на основе сVN.

Некоторые физико-механические характеристики основных классов инструментальных материалов приведены в табл. 1.7.

На рис. 1.10 приведены данные о твердости и трещиностойкости СТМ и керамики [12]. Существует закономерная корреляция — наблюдается рост трещиностойкости при снижении твердости. Комплекс свойств — твердость и трещиностойкость — определяют износостойкость резца, а в совокупности с прочностью — вероятность его разрушения. Таким образом, выбор материала для режущего инструмента — всегда компромисс между его механическими свойствами. При этом также необходимо учитывать условия работы инструмента, вид обработки, характер химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов.

## 1.7. Физико-механические характеристики инструментальных материалов

Материал	Твердость HRC, HRA*	Микро- твердость $H_{\mu}$ , ГПа	Предел прочности, ГПа		Теплостой- кость, К	Темпера- турный коэффици- ент ли- нейного расшире- ния, $\times 10^{-6}$ , $K^{-1}$
			При изги- бе $\sigma_{и}$	При сжа- тии $\sigma_{с}$		
Быстро- режущая сталь	62...67	—	2,00...6,00	2,5...4,0	900...1000	9,0...12,0
Твердый сплав	88...89*	13...14	0,75...2,60	3,5...5,9	1100...1300	3,0...7,5
Минера- локера- мика	91...94*	20...23	0,25...0,60	1,3...3,0	1500	6,3...9,0
ПСТМ на осно- ве алмаза	—	60...100	0,90...1,00	0,4...5,0	800	—
ПСТМ на осно- ве cBN	—	30...40	0,40...1,50	2,0...6,5	1200	4,9...7,9

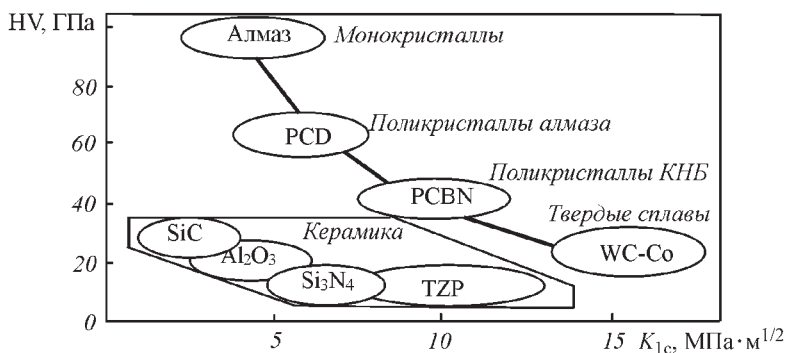


Рис. 1.10. Механические свойства наиболее твердых материалов



Большое значение для инструмента имеет соотношение коэффициентов трения инструментального и обрабатываемого материалов. Это соотношение определяет величину силы трения в контактной зоне, а значит, надежность и стойкость резца. Как правило, СТМ (особенно на основе алмаза) имеют более низкий коэффициент трения, чем традиционные инструментальные материалы. Это делает их применение особенно выгодным для чистовых операций обработки (табл. 1.8).

### 1.8. Коэффициенты трения сверхтвердых материалов на основе алмаза

Материал	Алмаз		
	природный	синтетический	поликристаллический
Медь М1	0,05...0,07	0,1...0,14	0,16...0,22
Латунь Л62	0,05...0,07	0,1...0,13	0,16...0,24
Алюминиевый сплав АК12М2МгН (АЛ25)	0,09...0,11	0,18...0,19	0,30...0,32
Алюминиевый сплав АЛ26	0,1...0,12	0,2...0,22	0,32...0,35
Магнийевый сплав МА8	0,07...0,08	0,14...0,16	0,18...0,21
Бронза БрАЖ9-4	0,09...0,1	0,17...0,19	0,25...0,28
Сталь 20	0,05...0,1	0,14...0,17	0,2...0,25

К важнейшим физическим свойствам инструментального материала относится теплопроводность. Это связано с тем, что в процессе обработки в зоне резания мгновенные значения контактной температуры превышают 2000 °С [30]. Отвод тепла способствует снижению температуры резания, достижению требуемых параметров состояния поверхностного слоя изделий, долговечности резцов, алмазных кругов. Высокая температура в зоне обработки не только ухудшает обработку, но и приводит к росту остаточных напряжений в поверхностном слое обработанной детали.

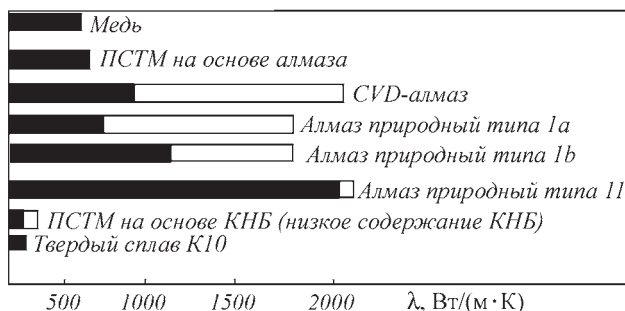


Рис. 1.11. Теплопроводность алмаза и других материалов [21]

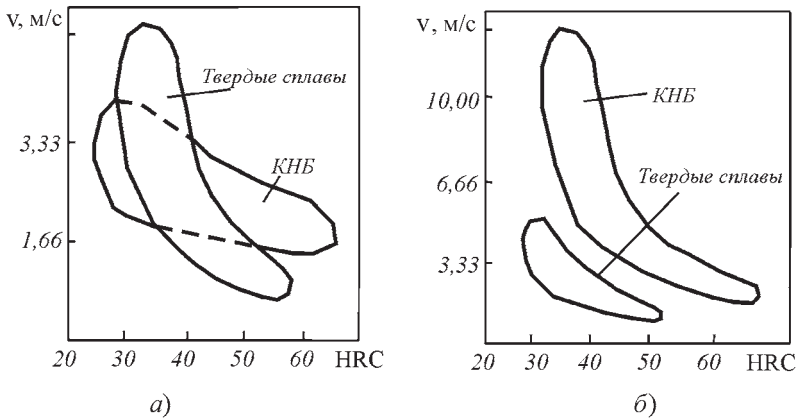
На рис. 1.11 приведены данные о теплопроводности различных СТМ в сравнении с медью — одним из самых теплопроводных материалов. Видно, что СТМ на основе алмаза имеют более высокую теплопроводность.

### 1.3. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТМ

Порошки из СТМ применяют в основном для абразивных инструментов в технологиях обработки особо труднообрабатываемых металлических и неметаллических материалов, а также используются как сырье для изготовления поликристаллов и композиционных материалов.

ПСТМ используются в качестве лезвийных инструментов при точении, фрезеровании, сверлении высокопрочных высокоабразивных как металлических, так и неметаллических материалов: алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния, угле- и стеклопластиков, высокопрочных сталей и жаропрочных сплавов, термообработанных (в первую очередь закаленных) сталей, различных наплавленных материалов. При этом наиболее существенно различаются инструменты на основе алмаза и cBN. Причина — химическая нестабильность алмаза при высоких температурах в присутствии материалов на основе железа.

Несмотря на то, что твердость cBN несколько ниже твердости алмаза, его химическая инертность и температурная стабильность до 1300...1500 К делает инструменты, оснащенные cBN, незамени-



**Рис. 1.12.** Области оптимального применения резцов из твердых сплавов и cBN при точении (а) и фрезеровании (б)

мыми при обработке закаленных сталей, жаропрочных сплавов и наплавленных покрытий на основе металлов группы железа.

На рис. 1.12 приведены области оптимального применения инструментов из твердых сплавов и cBN при точении и фрезеровании закаленных сталей. В случае точения, при близкой производительности, инструменты из СТМ имеют существенно большую стойкость, а при высокой твердости обрабатываемого материала они предпочтительнее и по производительности. Использование инструментов из cBN при фрезеровании предпочтительно для высокоскоростной обработки в широком диапазоне твердостей обрабатываемых материалов.

## Глава 2

# ПОЛУЧЕНИЕ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1. СИНТЕТИЧЕСКИЙ АЛМАЗ

Алмаз является самым твердым минералом в природе [20]. По качественным характеристикам алмазы делятся на ювелирные и технические.

На рис. 2.1 и 2.2 показаны кристаллические решетки алмаза и графита, а в табл. 2.1 представлены некоторые физико-механические свойства графита и алмаза.

Теория синтеза алмаза впервые была предложена О.И. Лейпунским. На основе экспериментальных данных об обратном переходе алмаза в графит были сформулированы условия перехода графита в алмаз и рассчитана кривая равновесия графит–алмаз при высоких давлениях.

Применение соответствующей среды (растворителей) может значительно снизить параметры ( $p$ ,  $T$ ) процесса синтеза. В системе

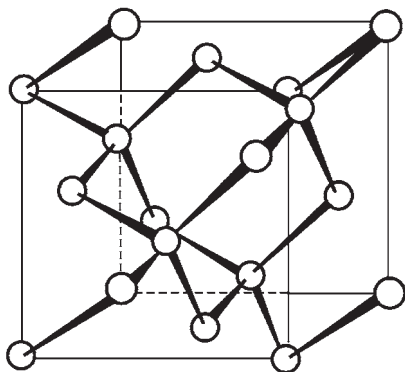


Рис. 2.1. Кристаллическая решетка алмаза

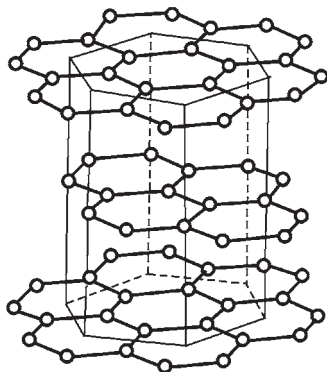


Рис. 2.2. Гексагональная кристаллическая решетка графита

## 2.1. Физико-механические свойства графита и алмаза

Показатель	Графит	Алмаз
Кристаллическая структура	Гексагональная	Кубическая
Постоянная решетки, нм	0,669	0,356
Минимальное расстояние между атомами в слое $d$ , нм	0,142	—
Минимальное расстояние между атомами $d_0$ , нм	—	0,154
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,26 (теоретическая)	3,49...3,54 (фактическая)
Теплостойкость, К	~4000	~1000
Микротвердость HV, ГПа	Зависит от марки графита	100
Коэффициент уплотнения при переходе из гексагональной модификации в кубическую	1,55	—

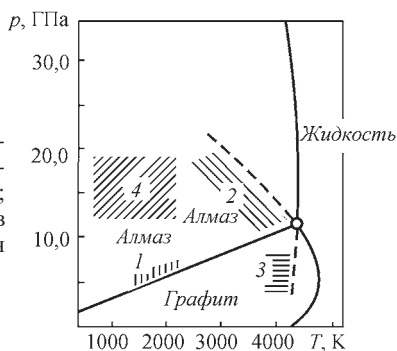
Fe—C можно выкристаллизовать алмаз (или вызвать рост затравки) при температуре 1500...1700 К, для чего потребуется давление 4,5...5,0 ГПа.

В 1972 г. О.И. Лейпунскому был выдан диплом на открытие (приоритет открытия — август 1939 г.) закономерностей образования алмазов со следующей формулировкой: «Теоретически установлено неизвестная ранее закономерность синтеза алмаза из углерода — образование алмаза в области его стабильности в жидкой среде, растворяющей углерод или вступающей с ним в нестойкие химические соединения, при давлении и температуре (более 1400 К), отвечающих условию  $p \geq 5,5 + 26,4 \cdot 10^{-3} T$  (К) тыс. ат.»

Фазовые диаграммы углерода, построенные Берманом, Банди и Диккинсоном, указывают на фазовые границы между графитом и алмазом и их ликвидусами (рис. 2.3). При давлении свыше 60 ГПа имеется участок, свидетельствующий о существовании металлической фазы углерода-3. Синтез алмаза из графита при высоких ста-

**Рис. 2.3. Фазовая диаграмма углерода:**

1 — область синтеза алмаза из графита в присутствии растворителей углерода; 2 — область прямого перехода графита в алмаз; 3 — область прямого превращения алмаза в графит; 4 — область прямого превращения графита в лонсдейлит

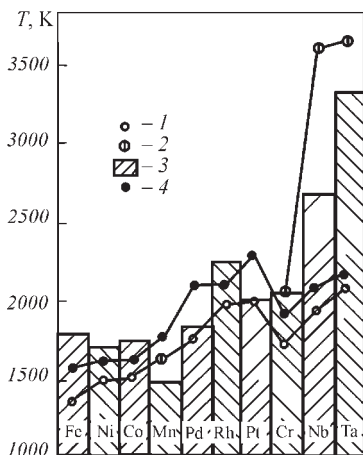


тических давлениях (более 4,0 ГПа) и температурах (свыше 1400 К) осуществляется в присутствии металлических растворителей углерода. В качестве растворителей углерода используют следующие металлы: Ni, Fe, Co, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Cr, Mn и Ta.

Экспериментально установлено, что для каждого типа растворителя можно выделить определенную область  $p$ ,  $T$ -условий образования алмаза. Если расположить металлы-растворители углерода в ряд по росту температуры плавления, а именно, марганец, никель, кобальт, железо, платина, хром, ниобий, тантал, то какой-либо корреляции с минимальными параметрами процесса синтеза установить не удается.

Наименьшие значения температуры плавления характерны для железа, кобальта, никеля, марганца, что соответствует и минимальным температурам синтеза алмаза в этих системах (рис. 2.4). Значения температур синтеза алмаза несколько отличаются от минимальных температур плавления  $Me-C$ , так как при высоком давлении температура плавления систем  $Me-C$  повышается. Однако прямая зависимость параметров процесса синтеза от температуры плавления растворов углерода в металлах очевидна. Исследование различных систем  $Me-C$  при высоких давлениях показало, что алмаз зарождается и растет в условиях пересыщенного раствора углерода в металле, который в определенный период оказывается пересыщенным в отношении концентрации алмаза, но недосыщенным по отношению к графиту.

Зародыш кристалла должен иметь не только определенное строение и свойство поверхности, но и размеры. При появлении за-



**Рис. 2.4. Температура плавления металлов:**  
 1 — температура плавления стабильных эвтектик; 2 — то же, перетектик; 3 — то же, метастабильных эвтектик; 4 — минимальные температуры синтеза алмазов в соответствующих системах

родыша метастабильная фаза превращается в более устойчивую стабильную фазу.

Экспериментальным путем установлено, что кристаллиты графита являются источниками центров кристаллизации алмаза. Кристаллиты представляют собой частицы графита с высокой степенью упорядоченности. При растворении металлом эти частицы достигают определенного размера и становятся центрами кристаллизации алмаза.

В дальнейшем рост кристаллов происходит за счет транспортировки атомов углерода через расплав, а не за счет притока алмазных частиц. На основании экспериментов по кристаллизации алмаза установлено, что, когда растворителем углерода является никель, градиент отношения изотопов  $C^{13}:C^{12}$  в 2 раза ниже, чем при использовании в качестве растворителя Ni—Mn. Изучение градиента отношения изотопов углерода в алмазных зернах показало, что углерод, перешедший в синтетический алмаз, должен был предварительно диссоциироваться на атомы во время процесса диффузии.

Следовательно, образование алмаза при статических давлениях в системе, растворяющей углерод, представляет собой рост кристаллов из пересыщенного раствора углерода в расплаве металла, а рост кристаллов осуществляется за счет диффузии атомов углерода через расплавленный металл. При этом источниками центров кристаллизации являются кристаллиты графита.

При давлении, большем 12 ГПа, и температуре более 4000 К происходит прямое превращение графита в алмаз (переход мартенситного типа). В таких условиях графитовая решетка трансформируется в алмазную без присутствия растворителя углерода. При давлениях и температурах, более низких, чем соответствующие условиям прямого перехода, в присутствии растворителя углерода возможен рост кристаллов за счет диффузии атомов углерода и микрогруппировок графита через расплавленный металл.

Следовательно, при синтезе алмаза из графита в зависимости от условий синтеза рост кристаллов алмаза может осуществляться по различным механизмам:

1) при синтезе монокристаллов алмаза (при малых пересыщениях) рост кристаллов происходит за счет диффузии атомов углерода через расплавленный металл;

2) при синтезе поликристаллического алмаза (при больших пересыщениях) рост кристаллов может осуществляться одновременно за счет диффузии атомов углерода и микрогруппировок через расплавленный металл;

3) при экстремальных условиях (условия прямого перехода графита в алмаз без использования растворителей углерода) происходит трансформация графитовой решетки в алмазную (переход мартенситного типа).

Для кристаллизации из растворов в расплавах особое значение имеет знание фазовой диаграммы участвующих компонентов, исходя из которой можно выбрать параметры кристаллизации, прежде всего температурный режим (рис. 2.5 и 2.6).

Основные требования к металлу-растворителю углерода для получения более крупных кристаллов алмаза:

- он должен растворять углерод в достаточных количествах;
- значительно снижать температуру алмазообразования;
- оставаться жидким в широком интервале температур;
- обладать довольно высокой степенью чистоты;
- иметь с углеродом только эвтектику (т.е. не образовывать соединения, например, карбиды).

Для синтеза крупных и прочных кристаллов наиболее подходящим является графит с меньшей структурной упорядоченностью, а для мелких и хрупких, наоборот, графиты с большей степенью совершенства, так как в этом случае они содержат большое количество



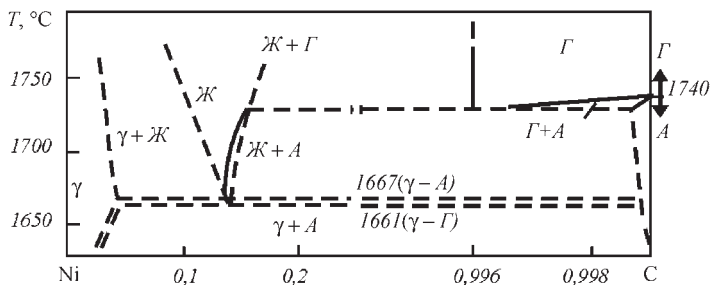


Рис. 2.5. Диаграмма состояния системы Ni–C при давлении 5,4 ГПа

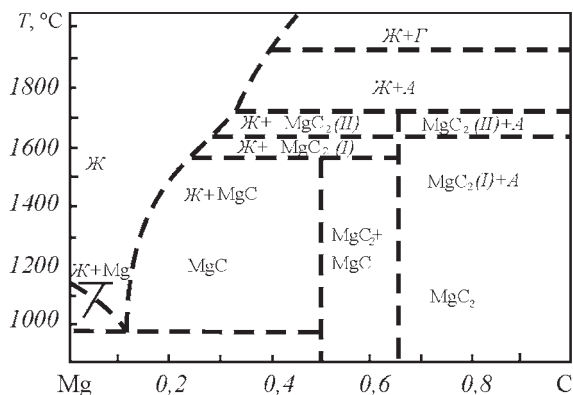


Рис. 2.6. Диаграмма состояния системы Mg–C при давлении 7,7 ГПа

во центров кристаллизации. Выбор марки графита должен определяться свойствами и размерами синтезируемого алмаза.

В качестве растворителей углерода при синтезе алмазов кроме переходных металлов используется ряд нетрадиционных растворителей, способных в условиях высоких давлений и температур растворять углерод и обеспечивать необходимое пересыщение. К ним относятся медь, магний, цинк, оксиды ртути и свинца, хлористое серебро, карбонаты, сульфаты, карбиды, оксиды и гидроксиды щелочных и щелочноземельных металлов.

Для получения полупроводникового алмаза разработаны способы синтеза в присутствии магнезия, алюминия и титана. В первом

случае геттером азота является магний, способный в условиях синтеза образовывать нитрид магния, что способствует внедрению в решетку алмаза неконтролируемой примеси бора. Полученный таким способом полупроводниковый алмаз представляет собой голубые кристаллы кубического габитуса.

Алюминий и титан выполняют роль геттера азота, а акцептором является бор.

Полупроводниковый алмаз используется в качестве быстродействующих датчиков температуры.

Для получения кристаллов алмаза ювелирного качества размером 5...8 мм используется способ выращивания на затравке при температурном градиенте ( $T$ -градиенте). Чтобы достичь постоянного пересыщения, необходимо разместить питательный материал в некотором удалении от затравки и по возможности удерживать постоянный  $T$ -градиент. При этом реакционный состав отделен от растущего кристалла мембраной из платины или слюды. Необходимым требованием выращивания при изотермических условиях в  $T$ -градиенте является возникновение высокого пересыщения в области кристаллизации.

Аппаратура высокого давления в производстве сверхтвердых материалов (СТМ) (алмаза, кубического нитрида бора и поликристаллических материалов на их основе) определяет производительность процесса и себестоимость СТМ.

Особого внимания заслуживают аппараты высокого давления (АВД), с помощью которых реакционная ячейка, состоящая из различных материалов, подвергается высоким давлениям и нагреву до высокой температуры в течение длительного времени, превышающего время, необходимое для достижения теплового равновесия. Как известно, все вещества сжимаемые. Поэтому равновесное статическое давление в реакционной ячейке можно получить, только помещая ее в прочную замкнутую камеру АВД. Практически это означает, что одна стенка камеры должна быть подвижной и что подвижные части камеры должны быть оснащены уплотнениями, препятствующими вытеканию содержимого камеры. Тогда достижимые давления ограничиваются лишь степенью сжатия образца или разрушением стенок камеры.

Все конструкционные материалы имеют ограниченную область напряжений, при которых они ведут себя упруго, и большую об-

ласть напряжений, при которых они пластически деформируются без разрушений. Важной характеристикой конструкционных материалов, применяющихся при изготовлении высоконагруженных деталей аппаратов высокого давления, является модуль сдвига.

Геометрические параметры и распределение напряжений являются не менее важными факторами, чем прочность используемого материала. Например, в толстостенных цилиндрах, внешний диаметр которых в несколько раз больше внутреннего, приложение давления к внутренней стенке вызывает большее растягивающее напряжение внутренней части цилиндра, чем внешней. Таким образом, напряжение пластического течения достигается вначале на внутренней стенке, и с повышением давления в цилиндре внешняя стенка начинает испытывать все большую и большую нагрузку до тех пор, пока цилиндр не разрушится. Максимальная прочность толстостенного цилиндра может быть получена путем создания такого предварительного напряженного состояния материала стенок, чтобы при нулевой нагрузке внутренние части стенок находились в состоянии сильного сжатия, а внешние части — в состоянии сильного растяжения. Когда же прилагается полное давление, все части стенок растягиваются до предела, близкого к пределу текучести.

Еще один метод, наиболее часто используемый в современных конструкциях аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов, заключается в изготовлении цилиндра, состоящего из двух или большего числа концентрических слоев. Размеры слоев подбираются так, чтобы внутренний слой можно было с усилием запрессовать во внешний для получения первоначального распределения напряжений.

Наибольшее распространение получили аппараты следующих типов: «белт», «чечевица» (рис. 2.7), кубический и тетраэдрический. Аппарат типа «чечевица» состоит из верхней и нижней блок-матриц 1, скрепляемых кольцами 4 и снабженных углублениями диаметром  $d$ , образующими полость высокого давления, в которую помещен контейнер 2 из литографического камня (95 % —  $\text{CaCO}_3$ ; остальное — оксиды  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и др.) с реакционным составом 3. Блок-матрицы, помещенные между опорными плитами, под усилием пресса сближаются, контейнер из литографического камня деформируется и заполняет пространство между ними, образуя камеру высокого давления (рис. 2.7, б).

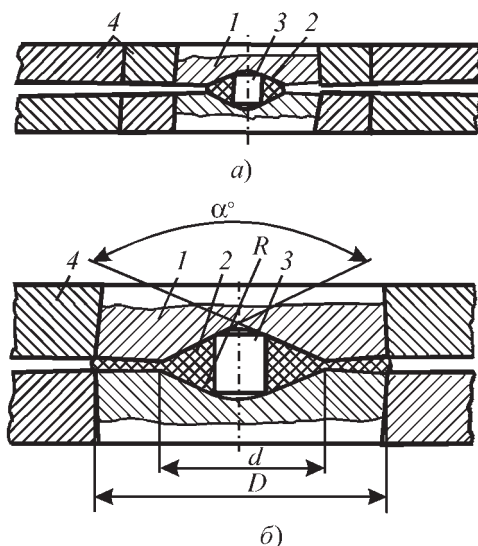


Рис. 2.7. Аппарат высокого давления в ненагруженном состоянии (а) и под давлением (б):

1 — твердосплавная блок-матрица; 2 — контейнер из литографского камня;  
3 — реакционный состав; 4 — скрепляющие кольца

Оптимальный объем углубления в матрице, который был определен экспериментально, равен объему приведенного цилиндра с диаметром, равным диаметру углубления  $d$ , и высотой  $0,14...0,15$  диаметра лунки. Все это выполняется, если угол  $\alpha$  конической части принять равным  $100^\circ$ .

Контроль давления в аппарате осуществляется при комнатной температуре по скачкам электросопротивления висмута, таллия, бария.

К материалам контейнера деформирующих уплотнений, используемых в ячейках (контейнерах) высокого давления, предъявляется ряд жестких требований.

Материалы должны:

- хорошо передавать давление, обеспечивая гидростатику в объеме реакционного состава;
- обеспечивать необходимое перемещение деталей АД;
- обладать хорошими теплоизоляционными свойствами;
- быть электроизолятором;

- не иметь фазовых превращений в условиях, отвечающих процессам синтеза и спекания;
- не взаимодействовать с компонентами шихты;
- не выделять в условиях высоких давлений и температур летучих компонентов;
- не взаимодействовать с материалом нагревательных элементов.

Материалов, которые удовлетворили бы полностью этим требованиям, в природе нет. В этой связи при синтезе и спекании сверхтвердых материалов используют ряд технологических приемов, которые в какой-либо степени способствуют выполнению большого количества требований. Например, применяются составные контейнеры, защитные экраны из тугоплавких материалов, выполняется предварительная термическая обработка материалов, передающих давление, и т.д. Так, для аппарата типа «белт» требуется давление достигается за счет применения деформирующей прокладки из блочного пирофиллита. В аппаратах типа «чечевица» в качестве среды, передающей давление, используется кальцит (литографический камень). В этих аппаратах в качестве внутренней части контейнера может применяться втулка из смеси хлористого натрия с диоксидом циркония, что позволяет значительно улучшить теплоизоляционные свойства среды, передающей давление, температура на стенках матрицы снижается с 250 до 150 °С.

Наличие металлических включений в кристаллах алмаза приводит к снижению их прочности и особенно термостойкости. Известно, что нагрев порошков синтетического алмаза, начиная с температуры 850 °С, может привести к снижению их прочности. Температура спекания алмазного слоя для инструментов, работающих в особо тяжелых условиях, составляет не более 1000...1220 °С. Но и при таких температурах спекания исходная прочность алмаза может снижаться, что приводит к ухудшению их работоспособности.

Известны механизмы образования включений в кристаллах алмаза. Один из них заключается в захвате включений вершинами кристалла (при малых пересыщениях) и ребрами (в условиях больших пересыщений), другой — в зарастивании маточного раствора в центральных пирамидах нарастания в местах встречи слоев.

Включения в кристаллах можно условно расклассифицировать на две группы:

- 1) ориентированные, когда захват включений осуществляется вершинами и ребрами кристалла (рис. 2.8);

2) локальные крупные включения, зарощенные центральными пирамидами нарастания (рис. 2.9).

Формирование этих типов включений связано, в первую очередь, со скоростью роста, которая определяется степенью пересыщения раствора. Возникновение в одном кристалле двух типов включений связано с тем, что они образовались в различных стадиях роста, при которых неизбежны изменения параметров процесса ( $p$ ,  $T$ ). При более высокой температуре термической обработки кристаллов в последних возникают трещины (рис. 2.10).

Образование трещин в кристаллах после нагрева связано с резким увеличением объема включений сплава-растворителя. Эти процессы проходят еще до плавления растворителя.

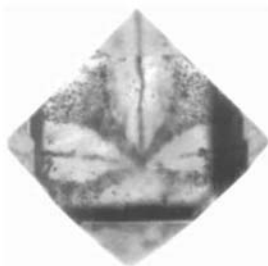


Рис. 2.8. Синтетический алмаз с ориентированными включениями (до нагрева)



Рис. 2.9. Синтетический алмаз с крупным локальным включением (до нагрева)

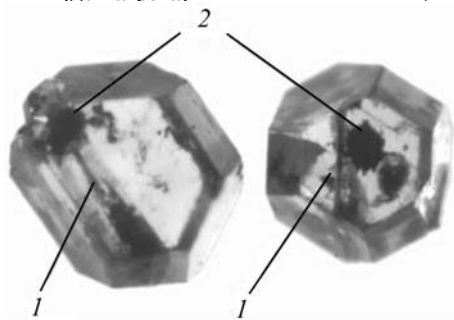


Рис. 2.10. Характерный вид трещин в синтетическом алмазе после нагрева при температуре 1180 °С в течение 20 мин в инертной среде:

1 — трещины; 2 — участки взаимодействия растворителя с алмазом

Следовательно, начальная температура появления трещин в кристаллах алмаза зависит от величины температурного коэффициента линейного расширения сплава-растворителя. Наиболее высоким термическим расширением обладает сплав-растворитель углерода, содержащий марганец. Начальная температура появления трещин зависит от объема включения и от характера и места его расположения.

При дальнейшем повышении температуры термообработки кристаллов происходит процесс их растворения жидкими включениями. Алмаз будет растворяться, а сплав насыщаться углеродом и выделять его в виде графита. Сам сплав будет выделяться из трещин в кристаллах алмаза в виде шариков.

Исследования явления смачивания и растекания жидких металлов и сплавов как прямое проявление химических межфазовых связей представляет собой значительный интерес при изучении термостойкости алмазов. Знание закономерностей смачивания на контакте твердое тело—жидкость—газ позволяет более полно объяснить механизм деградации синтетического алмаза при высоких температурах, так как последний содержит довольно большое количество механических включений металлов-растворителей.

Для изготовления инструментов на высокотемпературных металлических связках необходимо использовать порошки термостойкого алмаза, содержащие в себе минимальные количества металлических включений.

Разработана гамма марок алмазных шлифпорошков (АС2, АС4, АС6, АС15, АС20, АС32, АС50, АС65, АС80, АС100, АС125, АС160), микропорошков (АСМ и АСН) и субмикропорошков из синтетических алмазов с широким диапазоном физико-механических свойств (прочность и хрупкость, форма и удельная поверхность зерна, способность к самозатачиванию и др.).

## **2.2. КУБИЧЕСКИЙ НИТРИД БОРА**

Кубический нитрид бора (сBN) — сверхтвердый материал, не имеющий природного аналога [20]. Возможность его получения соответствует правилу образования двойных соединений с тетраэдрической координацией Х. Гримма и А. Зоммерфельда. Этому прави-

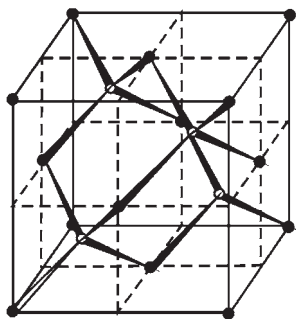


Рис. 2.11. Кубическая кристаллическая решетка сфалеритного нитрида бора

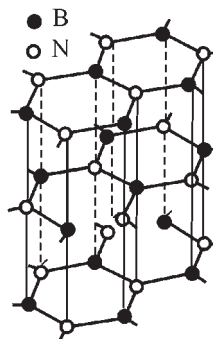


Рис. 2.12. Гексагональная кристаллическая решетка графитоподобного нитрида бора

лу удовлетворяют большинство бинарных соединений со структурой сфалерита и вюртцита.

Нитрид бора, из которого осуществляют синтез  $cBN$ , как и графит, кристаллизуется в гексагональную решетку. Кристаллические решетки кубического и гексагонального (графитоподобного) нитрида бора показаны на рис. 2.11 и 2.12.

Графитоподобный нитрид бора очень близок по своим свойствам к графиту, его еще иногда называют «белый графит». У этого нитрида бора нет свободных электронов, поэтому он в отличие от графита является отличным изолятором не только при комнатной температуре, но и при более высокой.

Свойства кубического нитрида бора (табл. 2.2) близки к свойствам алмаза, химический состав обуславливает его особенную ценность при обработке стали, где химическая активность алмаза может вызвать затруднения.

Фазовая диаграмма нитрида бора в зависимости от давления и температуры представлена на рис. 2.13. В зоне  $z$  графитоподобный нитрид бора стабилен, а нитрид бора с кристаллической структурой вюртцитного типа и цинковой обманки (кубической) метастабилен. В зоне  $сф$  нитрид бора кубический стабилен, а нитрид бора графитоподобный метастабилен.

Механизм образования кубического нитрида бора более сложен, чем механизм образования алмаза. Создатель  $cBN$  — Р. Вен-



## 2.2. Физико-механические свойства графитоподобного и кубического нитрида бора

Показатель	Нитрид бора (графитоподобный)	cBN
Кристаллическая структура	Гексагональная	Кубическая типа цинковой обманки
Постоянная решетка, нм	0,666	0,361
Минимальное расстояние между атомами в слое $d$ , нм	0,145	—
Минимальное расстояние между атомами $d_0$ , нм	—	0,156
Плотность (фактическая), г/см <sup>3</sup>	2,2...2,25	3,44...3,49
Теплостойкость, °С	—	1200
Температура плавления, °С	3000	—
Микротвердость, ГПа	—	80...90
Коэффициент уплотнения при переходе из гексагональной модификации в кубическую	1,53	—

торф, предложил следующую модель его образования. Металл (например, магний) реагирует с нитридом бора, вследствие чего образуется соединение типа MeBN, в расплаве которого растворяется нитрид бора. При соответствующих термодинамических условиях из расплава происходит кристаллизация кубического нитрида бора.

Существует еще целый ряд мнений о механизме образования cBN, однако экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что наиболее предпочтительна модель Р. Венторфа.

В зависимости от условий роста, состава и свойств среды кристаллизации выращенный cBN представляет собой агрегаты, друзы нарастания, перекристаллизации, сростки, двойники или моно-

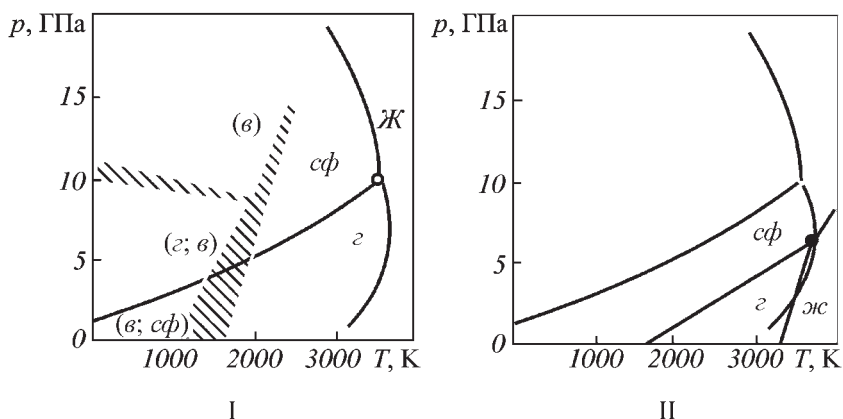
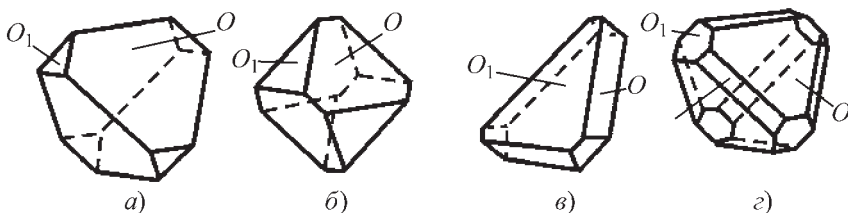


Рис. 2.13. Фазовая диаграмма BN:

I — по данным Ф.Р. Корригана и Ф.П. Банди; II — по данным В.Л. Соложенко;  
 $в$  — вюрцитный BN;  $z$  — графитоподобный BN;  $сф$  — сфалеритный (кубический) BN;  $жс$  — жидкость; в скобках — метастабильное состояние фазы

кристаллы различной степени кристаллического совершенства. Обычно рост кристаллов  $cBN$ , если не приняты специальные меры, вследствие значительных пересыщений на начальном этапе и высоких скоростей роста идет в стесненных условиях, чем и определяются особенности их морфологии.

Гониометрическими исследованиями установлено, что на кристаллах  $cBN$  наиболее часто встречаются грани тетраэдра  $\{111\}$ , причем основной кристаллографической формой является комбинация положительного  $\{111\}$  и отрицательного  $\{111\}$  тетраэдров. При этом габитус может быть различным (рис. 2.14), тетраэдрическим, псевдооктаэдрическим, псевдогексагональным (уплощенная форма комбинации тетраэдров). На кристаллах определены также грани таких простых форм, как тетрагон-тритетраэдр, куб, ромбододекаэдр, тригон-тритетраэдр, тетрагексаэдр, гексатетраэдр. Однако эти грани встречаются значительно реже, чем грани тетраэдра, носят подчиненный характер, и их появление связывается с изменением локального пересыщения возле растущего кристалла вследствие снижения давления и повышения температуры.



**Рис. 2.14. Полиэдрические формы роста монокристаллов сBN (тетраэдры  $O$  (111),  $O_1$  ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ), куб  $a$  (100):**

*a* — тетраэдрический габитус; *б* — октаэдрический габитус; *в* — уплощенная форма комбинации двух тетраэдров; *г* — комбинация трех простых кристаллографических форм

Огранка монокристаллов сBN чутко реагирует на изменения условий роста. Изменение ростовой системы ведет к существенному изменению морфологических особенностей кристаллов, что открывает перспективы для целевого получения кристаллов сBN с заданной огранкой. При обеспечении специальных условий роста возможен синтез кристаллов сBN с высоким пространственным фактором формы, для которых характерен тригон-тритетраэдрический габитус (рис. 2.15).

Во ВНИИАШ (Россия) разработана технология получения шлифпорошков сBN марок ЛО (обычной прочности) и ЛР (повышенной прочности) с общим названием «эльбор». В ИСМ НАН Украины созданы семь марок порошков под названием «кубонит», отличающихся по свойствам: КР — повышенной прочности; КОМ — обычный с металлическим покрытием; КРМ — повышенной прочности с неметаллическим покрытием; КОМА — обычной прочности с металлическим покрытием агрегированный; КМ — микропорошки. Усилиями двух организаций — ИСМ НАН Украины и ВНИИАШ — разработана еще одна марка порошка — ЛКВ (эльбор—кубонит высокопрочный). В ИСМ НАН Украины получены порошки кубического нитрида бора марки кибор (КТ), обладающие повышенной термостойкостью. Под термостойкостью подразумевают способность кристаллов сохранять значительную прочность после нагрева до 1700 К и последующего охлаждения.

Монокристаллы кибора имеют желтый цвет (эльбор и кубонит исключительно черного цвета) и характеризуются малым количест-

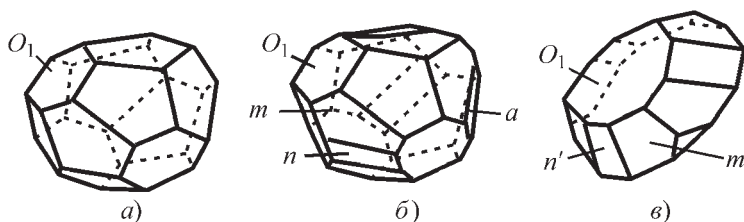


Рис. 2.15. Многогранные формы роста монокристаллов cBN:

$a$  — комбинация тетраэдра  $O_1$  ( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ) с тригон-тритетраэдром  $m$  (311), резе типа (511), (533);  $b$  — комбинация  $O_1$   $m$  с тетрагон-тритетраэдром  $n$  (2), резе типа (331) и кубом  $a$  (010);  $c$  — уплощенная форма с комбинацией  $O_1$ ,  $m$  и  $n'$  (2)

вом видимых включений ( $\times 25$ ). Содержание изометричных зерен в порошках КТ значительно выше, чем в порошках КР. В табл. 2.3 приведены значения разрушающей нагрузки для кубонита КТ различной зернистости, полученные после статистической обработки 54 зерен, в сравнении с нормами прочности для cBN марок КО и КР, ЛКВ, а также алмаза марки АС15. Прочность монокристаллов кибора КТ зернистостью 125/100...250/200 выше нормативной прочности алмаза марки АС15 на 12...20 % (кроме зернистости 100/80), кубонита КО — в 5 раз, КР — в 2,5 раза, ЛКВ — в 2,2 раза.

### 2.3. Показатель прочности при статическом сжатии порошков кубического нитрида бора

Зернистость порошка	Показатель прочности при статическом сжатии, Н, не менее, для марок				Алмаз марки АС15
	КО	КР	ЛКВ	КТ	
250/200	—	6,36	7,64	17,64	15,68
200/160	2,84	5,98	7,06	15,68	13,72
160/125	2,65	5,00	6,47	14,50	11,76
125/100	2,45	4,21	5,49	10,98	9,80
100/80	2,25	3,63	4,70	6,86	8,82

Абразивная способность кибора (по корунду) марки КТ на 35 % выше, чем сBN марок КР и ЛКВ.

Благодаря высоким термостойкости, прочности и абразивной способности кибора, инструмент на его основе обрабатывает закаленные стали с большей эффективностью, чем из сBN марок КР и ЛКВ.

Уникальные свойства плотных модификаций нитрида бора (высокая твердость, высокая химическая стойкость, термостойкость, ударная прочность) позволили создать на их основе целый ряд сверхтвердых поликристаллических материалов.

### **2.3. ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТВ**

Поликристаллические композиционные материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора характеризуются наличием жесткого каркаса из сросшихся зерен СТВ.

Спекание порошков алмаза и сBN, как правило, осуществляют в области их термодинамической стабильности алмаза и сBN согласно фазовым диаграммам, при давлении 5...9 ГПа и температурах 1500...2000 К.

Составляющие каркас зерна — это, в сущности, монокристаллы алмаза или сBN, обладающие рядом уникальных физико-механических и теплофизических свойств. Насколько эти свойства реализуются в поликристалле, зависит от степени их взаимосвязи. Управление процессом формирования структуры поликристалла открывает возможности создавать в зависимости от области применения материалы с требуемым сочетанием твердости, теплопроводности, прочности, электросопротивления.

При спекании порошков сверхтвердых материалов используют следующие способы управления структурой и свойствами поликристаллов:

- а) управление параметрами процесса спекания (давлением, температурой, продолжительностью);
- б) выбор размера частиц СТВ;
- в) состояние поверхности зерен СТВ (включая ее очистку);
- г) введение активирующих процесс спекания добавок;
- д) выбор схем снаряжения реакционного объема и исходных материалов;

е) проведение спекания порошков СТМ на твердосплавной подложке или в обойме.

Обычно спекание поликристаллических композиционных материалов осуществляют в присутствии активирующих процесс спекания добавок (кобальт или кремний для алмазных порошков, алюминий для порошков сBN).

При наличии жидкой фазы в соответствии с практикой спекания кривая уплотнения имеет четыре стадии — холодное уплотнение, жидкая фаза, растворение-осаждение, твердофазное спекание.

**Холодное уплотнение** заключается в уплотнении композита за счет сжатия шихты без температуры.

С увеличением давления идет уплотнение порошка за счет взаимного скольжения зерен. При дальнейшем увеличении давления начинается интенсивное дробление порошков. Однако следует отметить, что не все зерна подвергаются дроблению. Разрушаются в первую очередь более дефектные. Если после достижения рабочего давления не проводить нагрев шихты, медленно снять давление, то легко можно обнаружить, что частицы твердой фазы окружены очень мелкими частицами (пудрой) этой же фазы.

**Жидкая фаза.** При ее наличии обеспечивается перемещение твердых частиц относительно друг друга — происходит быстрое заполнение пор и капилляров веществом. При хорошем смачивании жидкостью твердых частиц между ними образуются искривленные поверхности жидкости — мениски, на которые действуют капиллярные силы, стремящиеся сблизить частицы — происходит усадка. Если на контактах частиц есть прослойка жидкости (при хорошем смачивании), то резко уменьшается трение и заклинивание между твердыми частицами. Подвижность частиц увеличивается — происходит их перегруппировка. Все эти процессы должны наблюдаться в первой стадии усадки поликристаллического материала.

**Растворение-осаждение** наблюдается в системах, в которых твердая фаза достаточно растворима в жидкой.

Механизм процесса обусловлен ростом зерен вследствие растворения мелких частиц в жидкости и последующего осаждения вещества на крупных частицах.

Усадка в этом случае обусловлена тем, что из-за наличия сжимающих усилий на контактных участках возрастает химический потенциал компонентов в твердой фазе, растворимость последних

на этих участках возрастает по сравнению с другими участками твердой фазы.

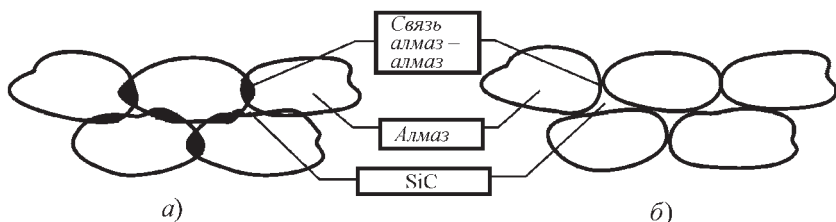
Вещество твердой фазы перемещается от контактных точек на свободную поверхность, расстояние между центрами частиц уменьшается — происходит усадка.

**Твердофазное спекание.** При осуществлении непосредственного контакта между твердыми частицами без прослойки жидкой фазы происходит срастание твердых частиц (рис. 2.16).

Твердые фазы в конечном этапе спекания имеют жесткий прочный каркас. Спекание поликристаллических композиционных материалов осуществляется в аппаратах высокого давления и температуры при  $p$ ,  $T$ -условиях более высоких, чем при синтезе кристаллов алмаза и cBN. Температура начала пластической деформации алмаза при  $p = 6$  ГПа составляет  $950$  °С, а для cBN при том же давлении —  $900$  °С.

Поликристаллические сверхтвердые материалы по своим физико-механическим свойствам могут быть близкими к монокристаллам, а по некоторым и превосходят их. Так, большинство алмазных поликристаллов (ПКА) обладает изотропией свойств, отличаются высокой износостойкостью и превосходят монокристаллы по трещиностойкости.

Классификация поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) основана на способе их получения и особенностях структуры (табл. 2.4).



**Рис. 2.16. Структура алмазного композиционного поликристаллического материала:**

*a* — интенсивное срастание: малое содержание SiC, низкая электропроводность, транскристаллический излом, высокая износостойкость; *б* — контролируемое срастание: малое содержание SiC, повышенная электропроводность, интеркристаллический излом, пониженная износостойкость

## 2.4. Классификация ПСТМ в зависимости от способа их получения

Группа	Способ получения	Пример
1	Переход графита в алмаз в присутствии растворителя Переход графитоподобного нитрида бора в кубический (сBN) в присутствии растворителя Переход вюртцитного нитрида бора в кубический	АСПК (ИФВД, Россия); АСБ (ИФВД, Россия) Композит 01 (НПО «Ильич», Россия); композит 02 (ИФТТИП, Беларусь) Композит 10 (ИПМ, Украина); WBN-T4, T5, T8 (Nippon Oi & Fats Co, Япония)
2	Спекание порошков алмаза без активирующих добавок	Megadiamond (Megadiamond Ind., США)
3	Спекание порошков алмаза с активирующими добавками	Sindax-3 (Element Six, ЮАР); АКТМ (ИСМ, Украина)
	Спекание порошков сBN с активирующими добавками	Amborite (Element Six, ЮАР); Киборит (ИСМ, Украина)
4	Спекание двухслойных пластин на твердосплавной подложке с алмазным рабочим слоем	Sindite (Element Six, ЮАР); Megarax (Megadiamond Ind., США); Comrax (General Electric, США); АТП (ИСМ, Украина)
	Спекание двухслойных пластин на твердосплавной подложке с рабочим слоем из сBN	BZN Comrax (General Electric, США); КТП (ИСМ, Украина); VN100 (Sumitomo Electric Ind., Япония); DBC50, DBC80, (Element Six, ЮАР); Q-bonite VX 230 (Tochiba Tungaloy, Япония); Q-bonite VX 241 (Toshiba Tungaloy, Япония)

В отличие от монокристаллов природного алмаза, которые при приложении нагрузки разрушаются в основном в направлении приложения силы по плоскостям спайности, образцы из ПКА разрушаются обычно на несколько частей путем образования радиальных трещин в направлении, перпендикулярном направлению действия силы.



Монокристаллы природного алмаза при достижении критических нагрузок разрушаются на мелкие фрагменты. ПСТМ на основе алмаза из-за своей поликристаллической структуры значительно лучше сопротивляются ударным нагрузкам, чем монокристаллы алмаза, и, несмотря на меньшую твердость по сравнению с природным алмазом, имеют более высокие значения пределов прочности на растяжение и на поперечный сдвиг. Ударная прочность поликристаллов алмаза зависит от размера алмазных зерен и с их увеличением снижается.

Преимущества инструментальных ПКА в сравнении с монокристаллическим алмазом связаны с произвольной ориентацией кристаллов в рабочем слое режущих пластин, что обеспечивает высокую однородность по твердости и стойкости к истиранию во всех направлениях.

Теплопроводность алмазоносного слоя ПКА с увеличением температуры возрастает до 500...700 Вт/(м·К). Так, в диапазоне температур 320...480 К теплопроводность материала Syndite 010 составляет 420...480 Вт/(м·К), а для Syndite марок 050, 075, 100 — 550...640 Вт/(м·К).

Поликристаллы алмаза отличаются от монокристаллов более высокой термостойкостью. Такие материалы, как Sindax-3, СВ, АКТМ, не теряют своих режущих и прочностных свойств при нагреве до 1473 К. Syndite также имеет высокую термическую стойкость. Это позволяет проводить пайку пластин путем кратковременного (индукционного или газопламенного) нагрева без защитной атмосферы. При этом в зависимости от времени выдержки максимально допустимая температура составляет 993 К (не более 1,5 мин), 973 К — не более 3,5 мин и 953 К — 6 мин. Ниже 923 К время пайки не ограничивается. Такие температуры и время пайки вызваны не графитизацией алмазоносного слоя, а различием в температурных коэффициентах линейного расширения алмазоносного слоя и твердосплавной подложки на основе карбида вольфрама.

Указанное различие коэффициентов при нагреве пластины до 1173 К в течение 10 мин приводит к образованию радиальных трещин в алмазоносном слое и его отделению от подложки в результате распространения трещин на границе раздела алмаз—твердый сплав.

Для существующих в данное время инструментальных ПСТМ на основе нитрида бора характерен достаточно широкий диапазон фи-

зико-механических свойств, связанный с технологией получения и формируемой при изготовлении структурой материала.

Выпускаемые заготовки ПСТМ, как алмазные, так и из кубического нитрида бора, имеют обычно форму диска толщиной до 8 мм и диаметром до 100 мм. Изготовление пластин большого диаметра (более 30 мм) позволяет повысить производительность процесса их спекания. Заготовки же необходимых форм и размеров получают путем механической обработки спеченных пластин. Такая технология производства заготовок позволяет расширить номенклатуру инструмента с высокими эксплуатационными свойствами.

Высокий уровень физико-механических свойств материала определяется высокодисперсной структурой зерен поликристалла, что непосредственно вытекает из экспериментально установленной зависимости Холла–Петча твердости и предела текучести от размера зерна:

$$H_V(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + k_y L^{-1/2},$$

где  $H_V$  — твердость;  $\sigma_T$  — предел текучести;  $H_0$  — твердость тела зерна;  $\sigma_0$  — внутреннее напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна;  $k_y$  — коэффициент пропорциональности;  $L$  — средний размер зерна.

Отсюда следует, что для получения качественного поликристаллического материала с плотной, однородной, мелкозернистой структурой перспективно использование алмазных порошков нанометрического диапазона. При соответствующих условиях в нанодисперсном поликристалле возможна реализация уникального комплекса механических свойств, например, сочетание очень высоких твердости и стойкости к растрескиванию.

При разработке технологий получения новых сверхтвердых материалов с использованием компонентов нанометрического диапазона важной проблемой является сохранение нанодисперсного состояния материала в процессе спекания. Кроме того, необходимо помнить о высокой структурной чувствительности механических свойств, что особенно остро проявляется при использовании наноматериалов. Особенности структуры таких материалов являются малая величина кристаллитов и, соответственно, большая объемная доля границ, приграничных областей и тройных стыков нанозерен; высокий уровень внутренних напряжений; наличие примесей и дру-

гих дефектов, присущих самим наноматериалам и привнесенным в процессе весьма сложной технологии их получения.

Наиболее эффективным подходом к улучшению физико-механических свойств поликристаллов алмаза на основе нанопорошков является поиск оптимального режима спекания шихты, содержащей активирующие добавки, выполняющие роль как растворителей углерода (Co, Ni, Fe, их сплавы и др.) так и ингибиторов роста зерен. При этом шихта должен пройти предварительный этап механической активации.

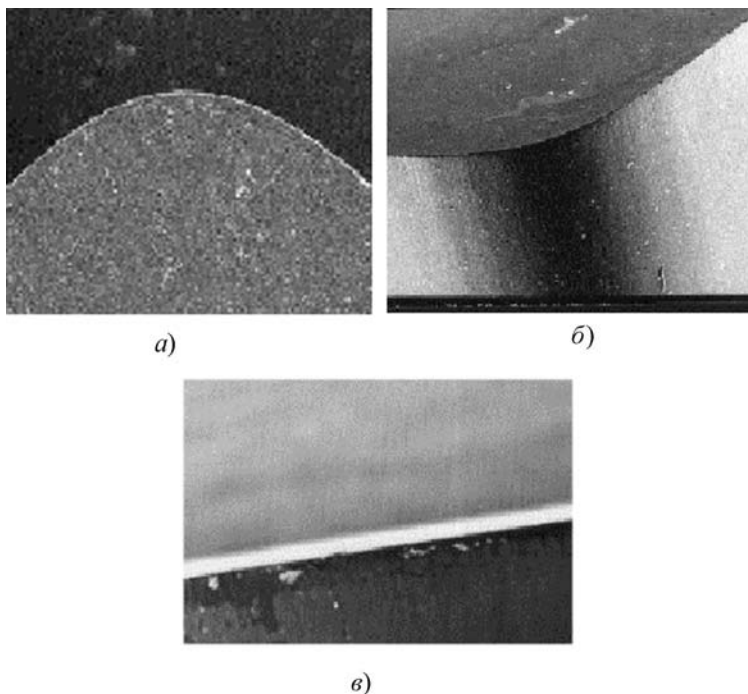
Использование указанных выше технологических приемов позволило повысить твердость алмазного нанокompозита, спеченного в условиях высоких давления и температуры, в 1,7 раза, а трещиностойкость почти в 2 раза.

На рис. 2.17 показана режущая вставка из алмазного наноструктурного композиционного материала.

Этот результат достигается, прежде всего, за счет однородности микроструктуры спеченного композита и подавления процесса формирования микротрещин благодаря введению активирующих добавок. Зеренная микроструктура образцов однородна по всему объему. Основной составляющей микроструктуры являются зерна размерами 70...100 нм.

Электронно-микроскопическими исследованиями особенностей структуры алмазных нанокompозитов установлено, что в условиях спекания нанодисперсного порошка алмаза происходят процессы структурных превращений как на границах, так и в объеме частиц. Поскольку между зернами имеются сплошные границы, то это является свидетельством того, что при спекании проходят процессы диффузионного массопереноса. Так как диффузионная подвижность алмазного углерода низка в исследованных термодинамических условиях спекания (8 ГПа, 2000 К), то можно предположить, что диффузионный массоперенос алмаза обусловлен главным образом присутствием жидкой фазы.

Требуемый профиль в плане резцовых вставок (угол в плане  $90^\circ$  и радиус при вершине 1 мм) и задние углы главной и вспомогательной задних поверхностей ( $5...10^\circ$ ) последующую доводку задних поверхностей обеспечивали шлифованием на универсально-заточном станке в несколько переходов чашечными алмазными кругами.



**Рис. 2.17. Режущая вставка из алмазного наноструктурного композиционного материала:**

*a* — профиль в плане; *б* — задняя поверхность вставки ( $\times 70$ ); *в* — режущая кромка инструмента ( $\times 70$ )

Режущие вставки из алмазного наноструктурного композиционного материала эффективны в инструментах при прецизионном точении алюминиевого сплава АМгб — применение такого инструмента позволяет стабильно получать шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,015...0,018 (табл. 2.5).

Инструмент из алмазных нанокомпозитов может успешно конкурировать с однокристалльным алмазным инструментом из природного алмаза. Нанокомпозиты могут применяться для изготовления режущего, деформирующего или мерительного инструмента многократного использования. Благодаря высоким значениям трещиностойкости композиты пригодны и для бурового инструмента, в том числе ударно-вращательного типа.

### 2.5. Шероховатость поверхности алюминиевого сплава АМг6\*

Обозначение инструмента	Параметр $Ra$ , мкм, при подаче резца, мм/мин					
	2,5±0,25		4,0±0,05		7,5±0,05	
	Диапазон	среднее*	Диапазон	среднее*	Диапазон	среднее*
68/3	0,029... 0,021	0,025	0,038... 0,036	0,037	0,041... 0,033	0,037
68/5	0,017	0,017	0,039... 0,036	0,037	0,039... 0,036	0,037
82	0,018... 0,015	0,017	0,025... 0,015	0,020	0,028... 0,025	0,027
70_к	0,032... 0,029	0,030	0,029... 0,028	0,028	0,027... 0,025	0,026

\* Обработка производилась на станке MO1045 производства ИСМ НАН Украины.

### 2.4. АЛМАЗНЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛУЧЕННЫЙ CVD-МЕТОДОМ

Наряду со способами получения алмаза в области его термодинамической стабильности разработаны технологии химического синтеза из разных углеродсодержащих веществ в неравновесных условиях (без определяющей роли высокого давления).

Газофазный метод химического эпитаксиального синтеза алмазных пленок (CVD-метод) основан на высокотемпературной высокоградиентной химической транспортной реакции с селективной кристаллизацией материала.

Принципиальное отличие химического синтеза из малых углеродсодержащих молекул от получения алмаза синтезом из графита при высоких давлениях состоит не в том, что первый способ может реализоваться без высоких давлений (и даже в вакууме), а второй — только при жестких  $p$ ,  $T$ -параметрах, а в различии их макрокинетических условий. Образование алмазных кристаллов по первому способу происходит только в неравновесных условиях в открытых каталитических системах, а по второму способу оно происходит в равновесных условиях, в закрытых системах.

Процесс химического газофазного осаждения включает химическую реакцию в газовой фазе, происходящую над поверхностью твердой подложки, в результате которой происходит осаждение конечного продукта реакции на поверхность подложки.

Все CVD-методы для создания алмазных пленок требуют способа активации углеродсодержащих молекул исходного продукта реакции. Известны способы активации горячей нитью, химическим пламенем, плазмой дугового разряда постоянного тока, плазменной струей, эжектируемой из дугового разряда, микроволновыми (СВЧ) разрядами, плазмой мощных непрерывных CO<sub>2</sub>-лазеров. Все эти методы различаются в деталях, но при этом они должны отвечать общим требованиям, например, рост алмазной пленки (а не осаждение других, не таких четко определенных форм углерода) обычно требует, чтобы подложка поддерживалась при температуре в диапазоне до 1000 °С, и что исходный газ должен быть разбавлен при избытке водорода.

Типичные условия роста алмазных пленок при давлениях ниже атмосферного:  $10^3 < p < 10^4$  Па; скорость роста без следов графита примерно 1 мкм/ч на подложках с температурой до 1000 °С; кристаллизационная газовая среда, нагретая до температуры 2500...3000 °С, как правило, состоит из водорода и малой примеси углеродсодержащих газов (метан, ацетилен), оставляющих углерод для «строительства» алмазной решетки.

Решающее значение в процессе плазмохимического осаждения алмазных пленок принадлежит атомам водорода, которые являются причиной реакций расщепления устойчивых молекул углеводорода в газовой фазе, в результате которых образуются высоко реактивные углеродсодержащие радикальные фракции. Кроме того, атомы водорода завершают «оборванные» связи углерода на растущей поверхности алмазной пленки и предотвращают их от образования поперечных связей, которые приводят к созданию графитоподобной поверхности. Следующий важный процесс, проходящий при CVD-синтезе, в котором участвуют атомы водорода, — это травление. Атомы водорода травят как алмаз, так и графит, но при типичных условиях роста пленок в плазмохимическом реакторе скорость роста алмазной пленки превышает скорость травления, в то время как для других форм углерода (графита, например) все происходит с точностью до наоборот. Это является основой для предпочтительного осаждения не графита, а алмаза.

В настоящее время доступны поликристаллические и монокристаллические пленки и пластины из CVD-алмаза диаметром более 100 мм и толщиной от единиц микрометров до 1...3 мм, получаемые с использованием CVD-процесса при температурах 700...1000 °С и рабочем давлении 30...100 Торр (4...14 кПа).

В отличие от алмазной керамики, получаемой путем спекания алмазного порошка, синтезированный из газовой фазы CVD-алмаз не содержит связующего. По своим характеристикам он ближе к монокристаллам алмаза. При высокой чистоте реакционных газов содержание азота (основная примесь в природных и синтетических кристаллах) в алмазе может быть доведено до 1 ppm.

Алмазный материал, изготовленный в результате CVD-процесса, характеризуется морфологией, чувствительной к точным условиям роста. Скорости роста для разных процессов осаждения значительно варьируются, обычно более высокие скорости роста сопровождаются потерей качества CVD-алмаза.

Единственным методом получения искусственных монокристаллических алмазных слоев с высоким качеством, повторяющимся от кристалла к кристаллу, является осаждение алмаза из газовой фазы в плазмохимических реакторах с активацией углеродсодержащего газа плазмой сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда.

На рис. 2.18 показана схема проведения процесса синтеза алмаза в рабочей камере СВЧ-плазменного реактора.

СВЧ излучение от магнетрона подается в камеру через коаксиальный волновод. В камере реализуется радиальная мода электромагнитного поля с максимумом интенсивности в центре, где размещается подложкодержатель, выполненный из молибдена, на который помещается, например, монокристалльная подложка.

Газовая смесь подается через верхнюю крышку камеры, типичный суммарный расход газа около 1 л/мин. Предусмотрена возможность подачи одновременно четырех различных газов: водорода, метана, кислорода, а также аргона или азота. Установка управляется компьютером, процесс роста может поддерживаться непрерывно в течение более 100 часов.

Реактор оснащен миниспектрометром, предназначенным для регистрации и анализа спектров оптической эмиссии СВЧ как в области видимого диапазона, так и областей ближайших инфракрас-

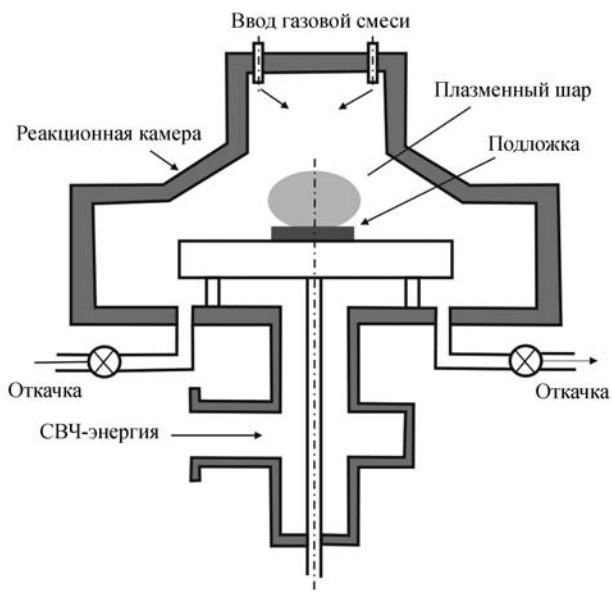


Рис. 2.18. Схема камеры с СВЧ-разрядом для осаждения алмазных пленок

ного и ультрафиолетового излучения. Необходимость такого анализа связана с тем, что это один из наиболее быстрых и относительно простых способов диагностики СВЧ-плазмы. Он позволяет выяснить какие именно активные частицы, ответственные за образование алмаза, присутствуют в плазме и, кроме того, проследить за эволюцией спектров при изменении состава рабочей газовой смеси, что является важным, например, при нахождении корреляций между наличием определенных радикалов и скоростью роста алмазной пленки.

Микроэлектронные изображения фрагментов ростовой поверхности CVD-алмаза выращенного с различными скоростями роста показаны на рис. 2.19.

На рис. 2.19, *а* отчетливо различима вершина четырехгранной пирамиды с имеющимися на ее гранях новообразованиями, с неупорядоченным фронтом роста кристаллитов с вершинами в виде квадратных и прямоугольных плоскостей (скорость роста 5 мкм/ч), на рис. 2.19, *б* показан фрагмент наиболее совершенной ростовой



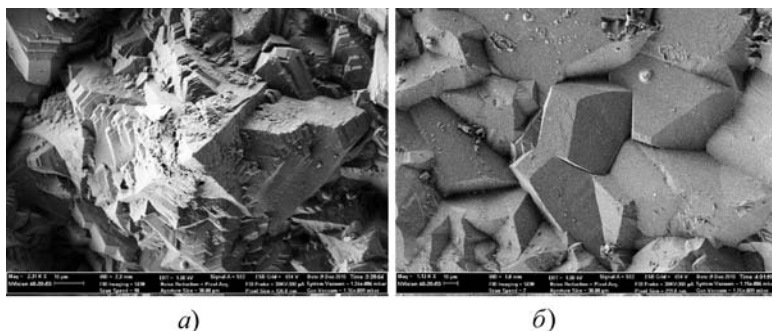


Рис. 2.19. Изображение фрагментов ростовой поверхности CVD-алмаза, выращенного с различной скоростью

поверхности CVD-алмаза с ограниченной формой кристаллитов, полученной со скоростью роста 1 мкм/ч.

В табл. 2.6 приведены основные физические свойства CVD-алмаза согласно данным фирмы Diamond Materials GmbH.

### 2.6. Физико-механические свойства CVD-алмазного материала

Свойство	Значение
Твердость по Кнупу, ГПа	До 110
Модуль Юнга, ГПа	900...1100
Коэффициент Пуассона	0,1
Прочность на сжатие, МПа	До 1200
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,515
Коэффициент термического расширения, К <sup>-1</sup>	1,0·10 <sup>-6</sup>
Теплопроводность при 20 °С, Вт(м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> )	> 1800

По данным фирмы Element Six, термостабильность CVD-алмаза составляет 870...920 К.

CVD-алмаз находит все большее применение как инструментальный материал и выпускается в виде двух разновидностей: тонкослойные (покрытия на режущих инструментах толщиной от нескольких до десятков микрометров) и толстослойные поликристаллы. Последние, как правило, располагаются на подложке из твердого сплава. Толщина слоя поликристаллического алмаза в двухслойном композите, в большинстве случаев, не превышает 0,5 мм.

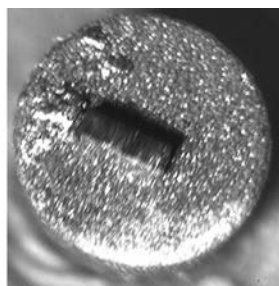
Тонкослойный CVD-алмазный материал имеет широкую область применения в режущих инструментах, что стало возможным благодаря его высокой гибкости при нанесении на подложку с практически любой геометрией (т.е. для изготовления фасонного инструмента).

Нанесение CVD-покрытий толщиной 15...25 мкм на инструменты для точения, сверления, фрезерования повышают их эффективность при обработке титана, алюминиевых сплавов, композитов.

Температура кратковременного нагрева при изготовлении и эксплуатации инструмента с CVD-алмазным материалом не должна превышать 870...920 К, что связано с его низким коэффициентом теплового расширения и анизотропией свойств.

## **2.5. ГИБРИДНЫЕ СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

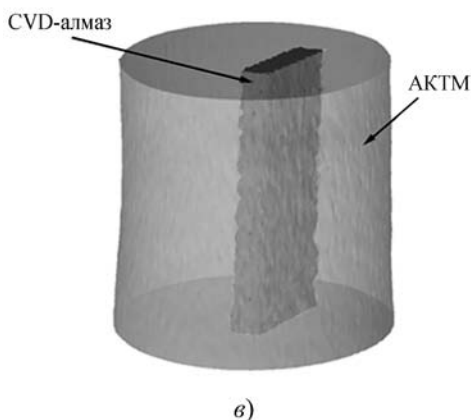
Разработан способ спекания поликристаллического композиционного материала, армированного CVD-алмазом, периметр которого частично или полностью в условиях высокого давления и температуры покрыт оболочкой из алмазного композиционного термостойкого материала (АКТМ), со связями типа алмаз—алмаз между зернами алмаза в композите и элементом армирования, и диспергированием в пространстве между ними активирующей добавки. Гибридный ультратвердый поликристаллический композит сочетает уникальные физико-механические и теплофизические свойства CVD-алмаза с высокими твердостью, прочностью и термостойкостью поликристаллической оболочки из композита на основе алмаза статического синтеза, что обеспечит эффективную работу инструмента в сложных условиях, в частности при бурении твердых пород, резке и шлифовке камня, бетона.



а)



б)



в)

**Рис. 2.20. Внешний вид образцов гибридного алмазного поликристаллического композита с армирующей вставкой CVD-алмаза:**

*а* — вид сверху; *б* — вид сбоку; *в* — трёхмерное изображение композита, полученное методом рентгеновской микротомографии

Внешний вид образцов гибридного алмазного поликристаллического композита (марка «Гибридайт») с армирующей вставкой из CVD-алмаза показан на рис. 2.20, *а*, *б*. Представление о внутреннем строении композита дает трёхмерная модель, построенная по результатам томографических исследований на микротомографе (рис. 2.20, *в*).

Зерна, составляющие каркас композита, — это, по сути, монокристаллы алмаза с высокими физико-механическими и теплофизическими свойствами. Насколько эти свойства реализуются в поликристалле, зависит от степени связи алмаз—алмаз. Основная роль в этом процессе принадлежит пластической деформации частиц материала, формирующего оболочку. В случае материалов с ковалентными свя-

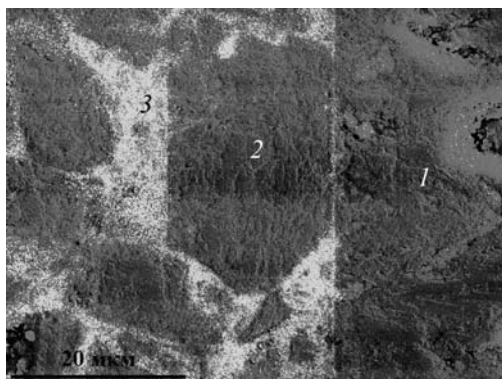
зьями (представителем которых является алмаз), для их эффективной консолидации путем пластической деформации необходимо наличие высоких давлений и температур, которые соответствуют термодинамической стабильности данных материалов.

При изготовлении гибридного алмазного поликристаллического композита следует учитывать следующий факт. Температура начала пластической деформации, в частности, для микропорошков алмаза составляет 1220 К при давления 6 ГПа. Расчетами показано, что при спекании давление в точках контакта алмазных зерен может достигать 130 ГПа. В то же время в порах между частицами алмаза давление при спекании значительно ниже, что является причиной образования в них графита или аморфного углерода. Для преодоления этого нежелательного эффекта необходимо использовать активирующие процесс спекания добавки.

Используемый при спекании гибридного алмазного поликристаллического композита в качестве активирующей добавки кремний, взаимодействуя с графитом или аморфным углеродом, в порах образует карбид кремния. Создание дополнительной связи алмаз — карбид ведет к росту общей прочности поликристаллической оболочки. Таким образом, образуется непрерывный жесткий каркас (рис. 2.21).

Формируемая в условиях термодинамической стабильности алмаза поликристаллическая оболочка и CVD-алмаз представляют собой единое целое. Поскольку по физическим свойствам составляющие материала близки, при изготовлении и эксплуатации инструмента влияние термонапряжений значительно слабее, чем при использовании традиционных материалов на основе CVD-алмаза, что повышает эффективность его использования благодаря большей прочности, термостабильности и износостойкости.

Морфология выращиваемого CVD-алмаза чувствительна к условиям роста (химический состав среды и подложки, способ и скорость осаждения на подложку и т.п.), и в зависимости от степени совершенства выращенный материал может быть как монокристаллическим CVD-алмазом с высокой степенью совершенства кристаллической структуры, так и поликристаллическим CVD-алмазом с высоким содержанием структурных дефектов, вызывающих в нем сильное оптическое поглощение (так называемый «черный алмаз» — black diamond), или с совершенной структурой



**Рис. 2.21. Изображение во вторичных электронах структуры гибридного алмазного поликристаллического композита:**

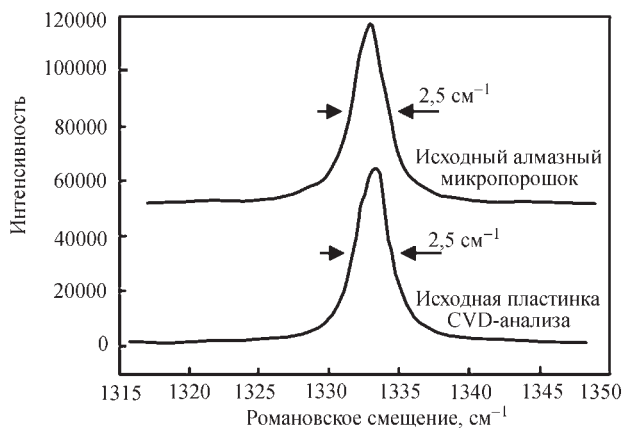
*1* — CVD-алмаз; *2* — алмазное зерно матрицы; *3* — мелкие зерна алмаза и карбида кремния

составляющих его кристаллитов (светлый CVD-алмаз), который применяется в оптике, устройствах для отвода тепла, и микроэлектронных устройствах.

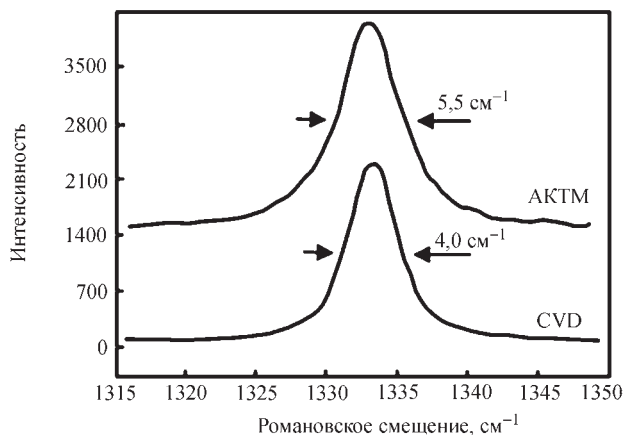
Исследования показали, что после спекания композита в оболочке из АКТМ ( $p = 8$  ГПа,  $T = 1570$  К) твердость по Виккерсу светлого поликристаллического CVD-алмаза достигает 142 ГПа при нагрузке на индентор 4,9 Н, в то время как твердость исходного CVD-алмаза (до спекания) — 77 ГПа, т.е. твердость CVD-алмаза в композите повышается в 1,8 раза.

Механизм повышения твердости поликристаллического CVD-алмаза (светлого), подвергнутого баротермической обработке в процессе получения гибридного поликристаллического композиционного материала, обеспечивается за счет пластической деформации алмазных зерен в процессе формирования жесткого каркаса вокруг CVD-алмаза, что приводит при таком высоком давлении к созданию в нем сложного структурно-напряженного состояния и проявляется в уширении линий КР как CVD-алмаза, так и алмазов в оболочке из АКТМ (рис. 2.22).

В результате баротермической обработки поликристаллического CVD-алмаза изменяется его субструктура от фактически бездефектных составляющих частиц до появления в них внутренних границ



а)



б)

Рис. 2.22. Спектры КР исходного алмазного микропорошка АСМ 40/28 и CVD-алмаза до (а) и после спекания (б) в гибридный поликристаллический композит

разориентации, групп дислокаций, пакетов дефектов упаковки и т.п. Степень совершенства кристаллической структуры CVD-алмаза оказывает влияние на формирование физико-механических свойств гибридного алмазного поликристаллического композита, что и под-

тверждает измерение твердости CVD-алмаз различного структурного совершенства, запеченного в поликристаллическую алмазную оболочку.

В CVD-поликристалле со столбчатой кристаллической структурой (табл. 2.7), в процессе его баротермической обработки при спекании гибридного алмазного поликристаллического композита формируется сложнапряженное состояние, упрочняющее CVD-алмаз и приводящее к существенному увеличению его твердости. В то же время, в случае мелкозернистого CVD-образца, содержащего неалмазную форму углерода, эффект повышения твердости в результате спекания при высоком давлении и температуре не наблюдается. Это объясняется тем, что исходная кристаллическая структура уже является напряженной и последующая баротермическая обработка не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства CVD-алмаза с мелкозернистой структурой.

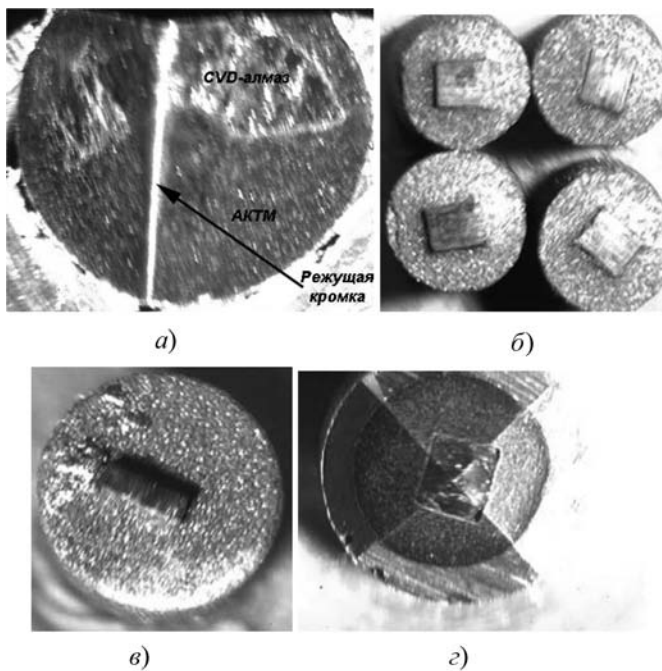
### 2.7. Твердость (HV) CVD-алмаза в зависимости от структуры и условий баротермической обработки

Структура CVD-алмаза	Твердость (HV), ГПа	Условия обработки	
		$p$ , ГПа	$T$ , К
Монокристалл	140...180	> 5	> 1800
Поликристалл со столбчатой кристаллической структурой**	130*	7,7	1600
Поликристалл со столбчатой кристаллической структурой**	85	Исходные	
Мелкозернистый поликристалл**	95*	7,7	1600
Мелкозернистый поликристалл**	92	Исходные	

\* CVD-алмаз в оболочке из поликристаллического алмаза (АКТМ).

\*\* Образец содержит неалмазный углерод.

На рис. 2.23 приведены образцы инструмента различного функционального назначения, оснащенного рабочими элементами из гибридного алмазного поликристаллического композита (гибридаита).



**Рис. 2.23. Оснащенные рабочим элементом из гибридаита:**  
*a* — резец; *б* — правящие карандаши; *в* — породоразрушающий элемент;  
*г* — наконечник индентора с пирамидой Виккерса



## Глава 3

### ПОРОШКИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА И КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Порошки СТМ состоят из кристаллов и поликристаллов алмаза и сBN размером не более 2500 мкм и разделяются на четыре основные группы. В свою очередь каждая группа подразделяется на несколько видов, отличающихся физико-механическими и физико-химическими характеристиками, зависящими от способов изготовления порошков (рис. 3.1).

В зависимости от назначения для каждого вида алмазно-абразивного инструмента необходимо выбирать порошки с определенными характеристиками.

Проблема получения порошков СТМ с заданными характеристиками решается по двум основным направлениям.

*Первое направление* состоит в разработке методов направленного синтеза. Однако как бы ни совершенствовались аппараты высокого давления и технология синтеза, невозможно получить в одном технологическом процессе все частицы СТМ одинакового размера и качества.

На рис. 3.2 представлены фрагменты продукта синтеза алмазов, полученного при гомогенном и послойном расположении металлорастворителя и графита в исходной шихте. Алмазные зерна, кристаллизовавшиеся в разных зонах реакционной ячейки, представляют собой набор частиц различного размера и формы. Значительное количество зерен ослаблены поверхностными дефектами в виде раковин и трещин, включениями металла.

Неоднородность продукта синтеза характеризуется гранулометрическим составом и разбросом показателя прочности (рис. 3.3, 3.4).

Показатель прочности  $P$  определяется по зависимости:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{j=1}^k P_j}{n - k},$$

где  $P_i$  — значение разрушающей нагрузки отдельного зерна, Н;  $P_j$  — значение разрушающей нагрузки, отдельного зерна, вдвое или бо-

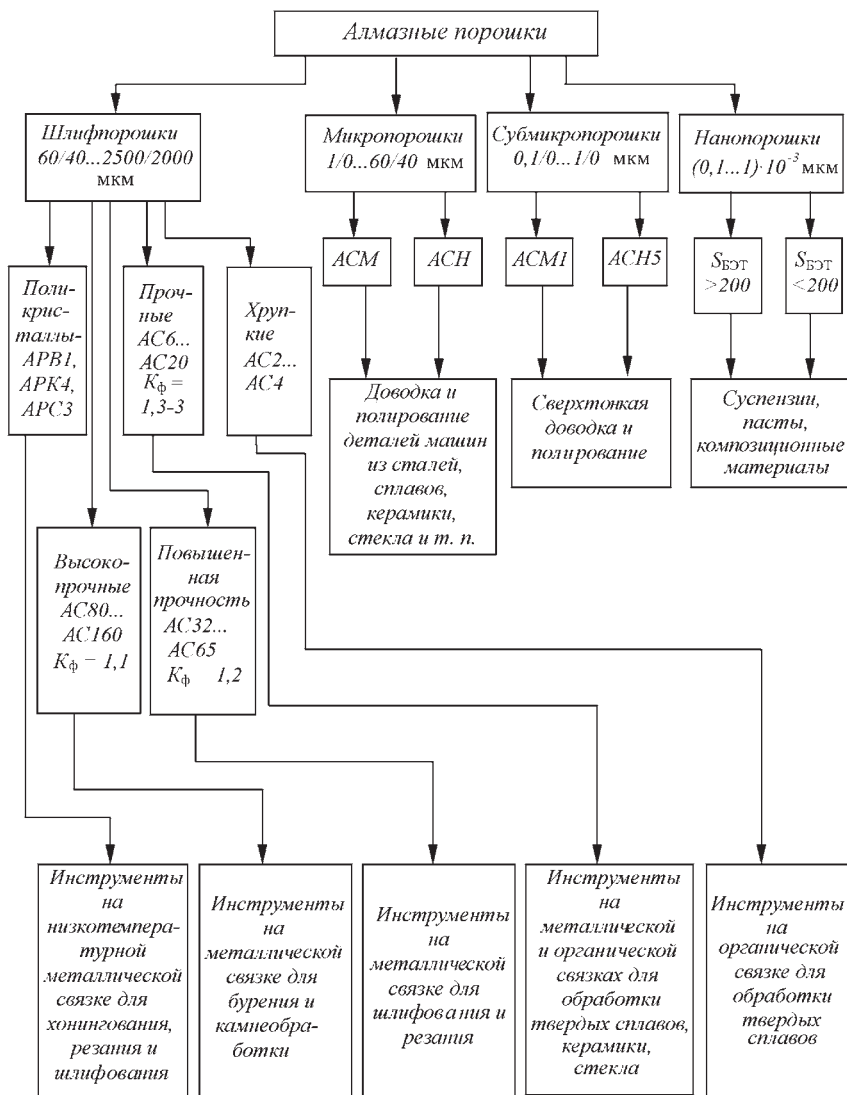


Рис. 3.1. Основные группы алмазных порошков и области их применения

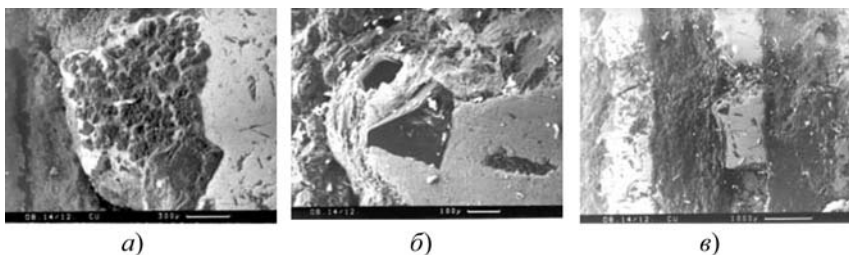


Рис. 3.2. Фрагменты продукта синтеза алмаза при гомогенном (а, б) и послойном (в) расположении металла и графита

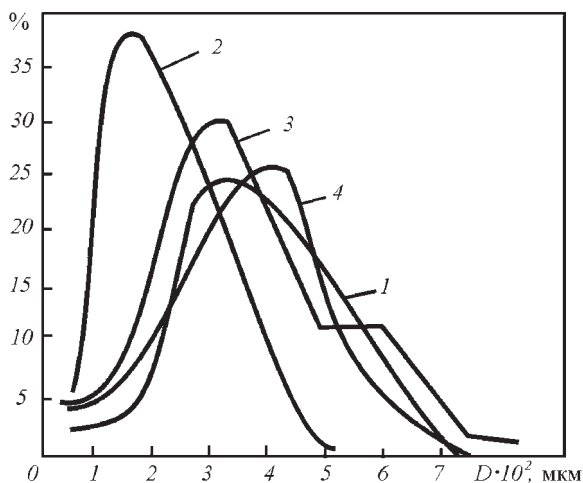
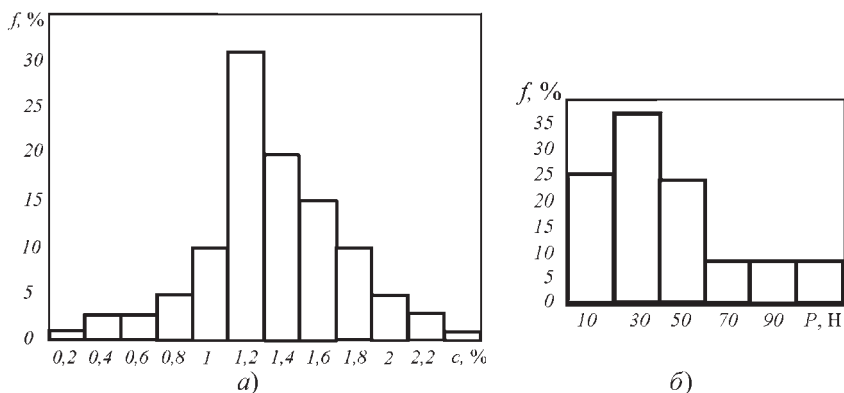


Рис. 3.3. Гранулометрический состав алмазного сырья, извлеченного из различных concentрически расположенных зон единичного образца продукта синтеза, полученного в АДВ объемом 20 см<sup>3</sup>

1–4 — отсчет зон от периферии к центру АДВ

лее превышающее  $P_{cp}$ , Н;  $P_{cp}$  — средний показатель прочности порошка по результатам последовательного разрушения 50 зерен, Н;  $n$  — число разрушенных зерен;  $k$  — число зерен, разрушенных при  $P_j \geq P_{cp}$ .

Вторым важным направлением в развитии технологии получения алмазных порошков является совершенствование операций извле-



**Рис. 3.4. Гистограмма распределения частиц алмаза AC15 в порошке в зависимости от массовой доли примесей (а) и показателя прочности (б):**

*f* — частота встречи алмазов с определенной соответственно массовой долей примесей и величиной показателя прочности, %

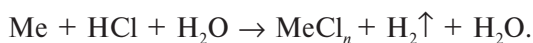
чения, классификации алмазных частиц по размерам и сортировки по форме и физико-химическим свойствам.

### 3.1. ИЗВЛЕЧЕНИЕ АЛМАЗА ИЗ ПРОДУКТОВ СИНТЕЗА

Процесс извлечения частиц алмаза включает в себя два основных этапа — растворение металлической составляющей и удаление неперекристаллизовавшегося графита.

Минеральные кислоты и их смеси не взаимодействуют с синтетическим алмазом или взаимодействуют с очень малой скоростью реакции, поэтому именно эти реагенты применяются в процессе извлечения продуктов синтеза. Расплавы щелочей разрушают кристаллы алмаза, поэтому в отечественной и в зарубежной практике для целей растворения металлов при их извлечении используют очень осторожно.

В общем случае процесс растворения выполняется по реакции:



Наиболее трудоемка в технологическом процессе химической очистки операция удаления остаточного графита его жидкофазным окислением смесью серной и хромовых кислот по реакции:



Расход химических реактивов для обработки продукта синтеза алмаза в значительной степени определяется массовой долей графита в обрабатываемом продукте. Поэтому важнейшей задачей обогащения является максимальное удаление графита из продукта синтеза перед химической обработкой.

Графит, алмаз и металл в продукте синтеза составляют сложное сросшее образование. Крупность фрагментов после операции дробления определяется вкрапленностью алмаза и составляет от 1 до 0,1 мм.

Для полного раскрытия сростков необходимо провести дробление продукта синтеза до 0,1 мм. Однако при таком дроблении будут разрушены крупные кристаллы, представляющие собой наибольшую ценность. Практика обогащения показала, что дробление до 2...4 мм оптимально обеспечивает сохранение крупных кристаллов. При этом массовая доля свободного графита в материале составляет 0,3...0,5 в зависимости от режима синтеза.

Для удаления свободного графита наиболее широко применяют гравитационные методы. Они основаны на использовании различия плотностей минералов (алмаза, графита) и разной скорости их падения в жидких или воздушной средах.

Из гравитационных методов наибольшее распространение получил метод разделения на сотрясательных концентрационных столах. Метод основан на разделении смеси зерен минералов по крупности и плотности в слое воды, текущей по наклонной вибрирующей плоскости. Под действием воды и импульсов от сотрясательного действия стола легкие и тяжелые частицы двигаются по различным траекториям. Недостатками работы столов являются высокая чувствительность к равномерности загрузки и большие потери мелких зерен алмаза (менее 0,1 мм).

Различные электрофизические, магнитные, поверхностные, термохимические свойства алмаза и графита делают возможным применение физических и физико-химических методов для удаления остатков графита из продукта синтеза. Развитие техноло-

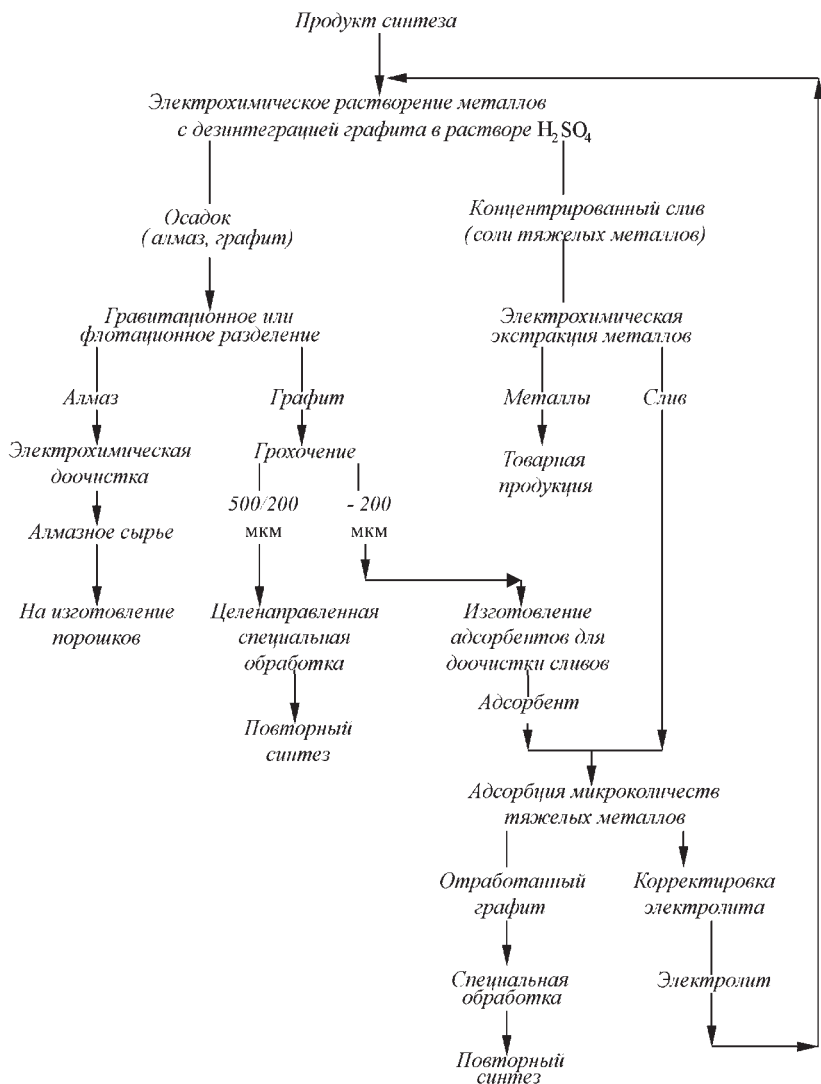


Рис. 3.5. Принципиальная схема ресурсосберегающей технологии комплексной переработки алмазосодержащего сырья

гий обогащения продукта синтеза алмаза методами магнитной и электрической сепарации, флотации, с дополнительным использованием ряда гравитационных и термохимических методов вместо химической обработки имеет большое значение для экономических и экологических характеристик технологии синтеза алмаза.

Выбор метода обогащения алмазного продукта диктуется в основном заданием конечных структурных особенностей, качественным и гранулометрическим составом продукта синтеза, зернистостью извлекаемых алмазных частиц. Накопленный опыт свидетельствует, что наибольший эффект дают комбинированные схемы обогащения.

Одним из перспективных направлений в технологии извлечения алмаза является применение электрохимических методов для растворения металла, дезинтеграции графита, для экстракции металлов из отработанных растворов.

На рис. 3.5 приведена принципиальная комплексная схема переработки продукта синтеза, позволяющая извлекать в виде товарной продукции не только алмаз, но и остатки металлов-растворителей и графита. Использование такой схемы обеспечивает получение высоких технико-экономических и экологических показателей процессов получения порошков алмаза.

### **3.2. ШЛИФПОРОШКИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА**

Алмазные зерна после извлечения их из продукта синтеза представляют собой отдельные кристаллы и их сростки, осколки кристаллов в виде угловатых, игольчатых и пластинчатых частиц, значительно количество друз и зерен, ослабленных дефектами, часто в виде больших трещин. Для изготовления однородных по составу алмазных порошков сырье дополнительно подвергается избирательному механическому, ультразвуковому или взрывному дроблению с последующей классификацией зерен по размерам.

При определении качества порошков синтетического алмаза используют размерные и геометрические характеристики зерен, показатели статистического распределения отдельных зернистостей в общей массе порошка. Эти параметры определяют абразивную эф-

фективность порошков, а следовательно, шероховатость и другие показатели качества поверхности, обработанной алмазными инструментами.

При дроблении и тонком измельчении разрушаются в первую очередь сростки и дефектные алмазные зерна, образуется значительное количество осколков с острыми гранями, порошок гомогенизируется по прочности зерен. Корректировка формы зерен осуществляется путем механической или химической овализации, т.е. искусственного затупления острых граней, дробления выступов, разрушения дефектных участков зерен.

Разделение зерен частиц СТМ по размерам зерен занимает важное место в технологии изготовления порошков. К числу основных, широко применяемых методов классификации порошков алмаза относятся вибрационно-ситовые, воздушно-ситовые, гидравлические с применением статической и центробежной седиментации.

Вибрационно-ситовая классификация применяется наиболее широко для разделения шлифпорошков. При этом размеры зернистостей соответствуют номерам сит, на которых они получены. В странах СНГ используются проволочные сита с модулем 1,26.

Шлифпорошки выпускают зернистостью от 2500/2000 до 50/40 мкм, их марки и характеристики представлены в табл. 3.1.

Принципиальная технологическая схема изготовления шлифпорошков приведена на рис. 3.6.

Основной характеристикой, разграничивающей марки шлифпорошков, является прочность их зерен при статическом сжатии [15].

Обозначение марок алмазных шлифпорошков состоит из буквенных и цифровых индексов. Буквами АС обозначают порошки из синтетического монокристаллического алмаза, АР — из синтетических алмазных поликристаллов. При этом к индексу АР добавляется буква, обозначающая тип исходного поликристаллического алмаза: В — баллас, К — карбонадо, С — спеки. К буквенным обозначениям добавляется цифровой индекс, выражающий для порошков АС среднее арифметическое значение показателей прочности на сжатие всех зернистостей данной марки в ньютонах, а в шлифпорошках АР — в сотых долях ньютона.

Шлифпорошки синтетического монокристаллического алмаза в странах СНГ выпускаются по 12 маркам прочности начиная с марки АС2 и кончая маркой АС160 (см. табл. 3.1).



### 3.1. Марки, зернистости, характеристики и рекомендуемые области применения алмазных синтетических шлифпорошков (ГОСТ 9206–80)

Марка алмазного порошка	Диапазон зернистостей	Зернистость	Характеристика	Рекомендуемая область применения
АС2	Широкий	63/40... 160/100	Из зерен синтетического алмаза повышенной хрупкости, представленных агрегатами с развитой поверхностью	Инструменты на органических связках, применяемые на чистовых и доводочных операциях при обработке твердого сплава
	Узкий	50/40... 160/125		
АС4	Широкий	63/40... 200/125	То же, представленных агрегатами и сrostками	
	Узкий	50/40... 200/160		
АС6	Широкий	63/40... 250/160	Из зерен синтетического алмаза, представленных отдельными кристаллами с развитой поверхностью, агрегатами и сrostками	
	Узкий	50/40... 250/200		
АС15, АС20	Широкий	63/40... 630/400	То же, представленных агрегатами, сrostками и удлинненными кристаллами, с коэффициентом формы зерен от 1,3 до 3,0	
	Узкий	50/40... 630/500		
АС32	Широкий	80/50... 630/400	То же, представленных кристаллами, сrostками и агрегатами, с коэффициентом формы зерен не более 1,2	
	Узкий	50/40... 630/500		

Продолжение табл. 3.1

Марка алмазного порошка	Диапазон зернистостей	Зернистость	Характеристика	Рекомендуемая область применения
АС50	Широкий	100/63... 630/400		лейкосапфира, ситалла, корунда; черного хонингования
	Узкий	50/40... 630/500		
АС65	Широкий	125/80... 630/400	Из зерен синтетического алмаза, представленных кристаллами, сростками и агрегатами, с коэффициентом формы зерен не более 1,2	Инструменты на металлических связках, применяемые при обработке природного камня, стройматериалов, горных пород средней твердости, керамики, стекла, бетона; в буровом инструменте, сверлах
	Узкий	63/50... 630/500		
АС80	Широкий	125/80... 630/400	То же, представленных кристаллами, сростками, с коэффициентом формы зерен не более 1,1	
	Узкий	100/80... 630/500		
АС100	Широкий	125/80... 630/400	То же, представленных кристаллами, сростками, с коэффициентом формы зерен не более 1,1	Инструменты на металлических связках, применяемые для резания, сверления природного камня, бетона, стекла, керамики, правки шлифовальных кругов, обработки огнеупоров; в буровом инструменте
	Узкий	100/80... 630/500		
АС125	Широкий	160/100... 630/400		
	Узкий	125/100... 630/500		
АС160	Широкий	160/100... 630/400		
	Узкий	125/100... 630/500		

Окончание табл. 3.1

Марка алмазного порошка	Диапазон зернистостей	Зернистость	Характеристика	Рекомендуемая область применения
АРВ1	Узкий	50/40... 2500/2000	Из зерен синтетического поликристаллического алмаза типа «баллас»	Изготовление инструментов на металлических связках, применяемых для черного хонингования чугунов, резания и шлифования стеклопластиков и других неметаллических материалов
АРК4	Узкий	50/40... 2500/2000	То же, типа «карбонато»	Изготовление инструментов на низкотемпературных металлических связках, применяемых при резании и обработке камня низкой и средней твердости, огнеупоров
АРС3	Узкий	50/40... 2500/2000	То же, типа «спеки»	Изготовление инструмента на металлических связках, применяемого для черного хонингования чугунов, обработки стройматериалов и правки абразивных кругов

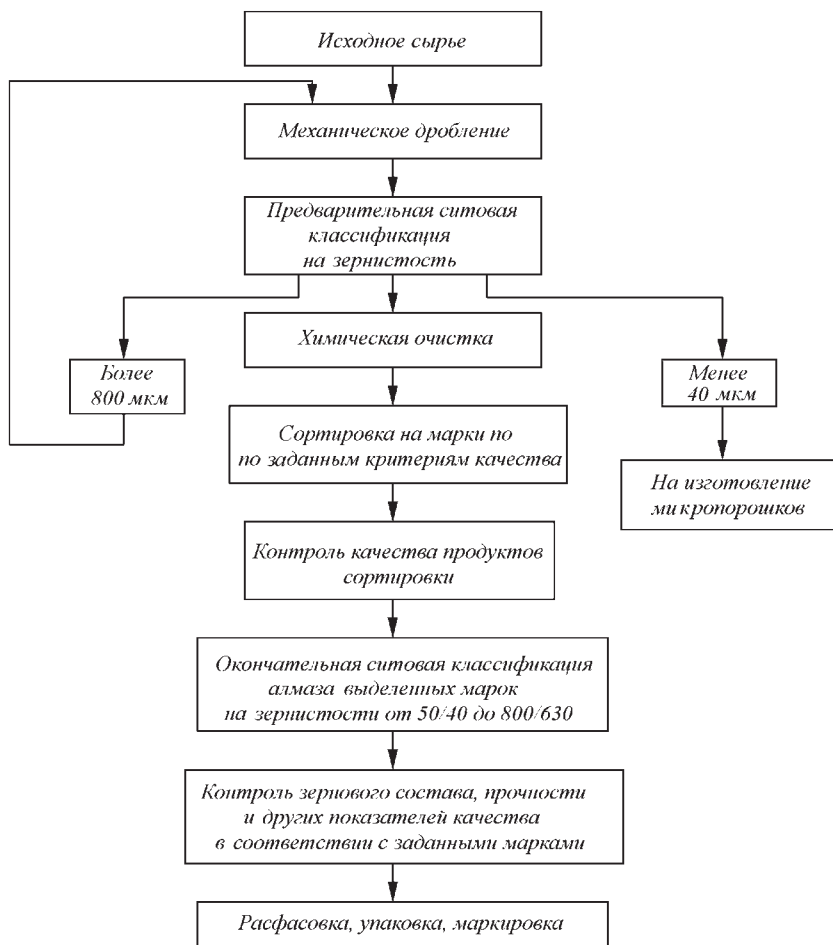


Рис. 3.6. Принципиальная технологическая схема изготовления алмазных шлифпорошков

Порошки марок АС2, АС4, АС6 получают без дополнительных сортировок.

Введение дополнительной операции — сортировки по форме на вибростоле — позволяет получать порошки, различающиеся по прочности в несколько раз. При этом зерна различной формы дви-

жуются по вибрирующей наклонной деке по разным траекториям в зависимости от коэффициента трения зерен по поверхности деки. В первую ячейку попадают наиболее округлые и, соответственно, прочные зерна, а в более отдаленные ячейки — зерна угловатой, плоской и игольчатой форм. С использованием этого метода сортировки получают порошки марок АС15 и выше.

Значительное влияние на повышение качества порошков оказывает применение для их сортировки методов магнитной, электрической и аэродинамической сепарации, флотации или их комбинаций.

Если порошок дополнительно рассортирован по какому-либо отличительному свойству, после цифрового индекса добавляется соответствующий индекс: Т — термочные (термостойкие); Н — немагнитные, неэлектропроводные; А — повышенной адсорбционной активности и др.

Например, АС125Т 400/315 — шлифпорошок синтетического алмаза марки 125, термостойкий, зернистостью 400/315 мкм.

Термостойкие алмазные шлифпорошки изготавливают из серийных порошков зернистостью 630/500...100/80 марок АС50...АС160 путем удаления из них методом магнитной сепарации алмазных зерен с высоким содержанием металлических включений. Термостойкость синтетического алмаза непосредственно зависит от содержания в них металлических включений и от состава сплава-растворителя, используемого при синтезе. Как правило, алмаз, синтезированный на никель-марганцевом сплаве, имеет более низкую термостойкость, чем алмаз, полученный на ферромагнитных сплавах. Содержание металлических примесей в порошках при сортировке контролируется величиной удельной магнитной восприимчивости  $\chi$ . Прочностные свойства готового порошка определяется коэффициентом термостойкости  $K_T$  по формуле

$$K_T = \frac{P_{\text{исх}}}{P_{\text{т.о}}}, \quad (3.1)$$

где  $P_{\text{исх}}$  — исходная разрушающая нагрузка при статическом сжатии, Н;  $P_{\text{т.о}}$  — разрушающая нагрузка при статическом сжатии после термообработки в среде аргона при 1000 °С, Н.

Коэффициент  $K_t$  изменяется в пределах от 1,1 до 3,7.

Применение порошков термостойкого алмаза в инструменте на металлической связке обеспечивает изменение прочностных свойств в указанных выше пределах в процессе изготовления инструмента и при его эксплуатации в высокотемпературных условиях.

Алмазные порошки с индексом «Н» изготавливают из серийных порошков зернистостью 500/400...50/40 марок АС6...АС65 путем дополнительной сортировки в электрических и магнитных полях с целью получения порошков с высоким удельным электросопротивлением  $\rho$ . Порошки контролируют по величине удельной магнитной восприимчивости ( $\chi \leq (6,6...3,4) \cdot 10^{-8}$ , м<sup>3</sup>/кг) и удельного электросопротивления ( $\rho \geq 10^8$  Ом·м для зернистостей 500/400...315/250 всех марок и  $\rho \geq 10^9$  Ом·м для зернистостей 250/200...50/40).

Применение специальных порошков с индексом «Н» для электрохимического производства инструмента исключает дендритообразование, обеспечивает повышение прочности закрепления алмаза в связке и улучшение эксплуатационных свойств инструмента.

Алмазные порошки с повышенной адсорбционной активностью с индексом «А» изготавливают из серийных алмазных порошков марок АС6...АС160 путем сортировки методами флотации или адгезионно-магнитной сепарации на основе различий в степени шероховатости их поверхности, оцениваемой коэффициентом поверхностной активности  $K_a \geq 0,3...0,5$ .

Алмазные порошки с повышенной поверхностной активностью применяются в инструменте на органических и металлических связках. Использование таких порошков обеспечивает повышение прочности удержания алмаза в связке, что позволяет уменьшить глубину зарастивания зерен, увеличить ресурс работы инструмента и снизить удельный расход алмаза.

Развитие технологии синтеза алмаза и одновременное совершенствование процессов сортировки создали возможность изготовления особо прочных алмазных порошков (которые не вошли в перечень марок стандарта ГОСТ 9206–80), таких как АС200...АС400. Разработанные технические условия распространяются на шлифпорошки из синтетического алмаза, показатели прочности при статическом сжатии которых приведены в табл. 3.2.

### 3.2. Показатели прочности при статическом сжатии шлифпорошков из синтетического алмаза

Зернистость	Показатель прочности при статическом сжатии, Н, не менее, для марок				
	АС200	АС250	АС300	АС350	АС400
800/630	525	656	820	1025	1280
630/500	450	560	700	880	1100
500/400	355	444	555	690	867
400/315	311	390	486	607	760
315/250	256	320	400	500	625
250/200	225	280	350	440	550
200/160	200	250	310	386	482
160/125	165	206	258	322	403
125/100	141	177	220	275	345

Данные порошки применяются:

- в алмазно-абразивном инструменте на металлических связках;
- в правящих инструментах;
- в инструментах для резания, сверления природного камня, керамики, бетона; буровых работ (шлифпорошки марок АС200... АС300);
- в инструментах для обработки природного камня, строительных материалов, горных пород повышенной твердости (шлифпорошки марок АС350, АС400).

Серийные алмазные порошки представляют собой совокупность зерен определенной зернистости, которые в значительной степени различаются по основным характеристикам качества. Как правило, порошок характеризуется показателем качества, представляющим собой величину, усредненную по всему объему порошка. В серийном порошке содержание основной фракции с характеристикой ка-

чества, соответствующей ее номинальному усредненному значению, обычно находится в пределах 20...40 %. Таким образом, в алмазном инструменте, в соответствии со средним значением характеристики качества, эффективно работает менее половины зерен.

Особое место среди алмазных шлифпорошков занимают элитные алмазные порошки [2].

Создана специальная технология изготовления элитных алмазных порошков из алмаза различного происхождения.

Разработка основана на комплексном использовании прогрессивных физических и физико-химических процессов обработки и разделения зерен алмаза. Она обеспечивает производство порошков с расширенным диапазоном марок: от АС15 до АС400 в интервале зернистостей 100/80...800/630, а также несерийных, отличающихся повышенной однородностью основных характеристик качества.

С учетом технологии изготовления алмазного инструмента и областей его применения представляют интерес следующие характеристики качества алмазных шлифпорошков для указанных диапазонов зернистостей и марок (табл. 3.3).

### 3.3. Основные характеристики элитных порошков

Диапазон зернистостей	Диапазон марок	Регулируемые характеристики качества	Однородность порошка по выбранной характеристике качества
125/100... 800/630	От АС200-Э до АС400-Э	Показатель прочности Магнитная восприимчивость	В 2–3 раза выше, чем в серийном порошке
125/100... 630/500	От АС50-Э до АС160-Э	Шероховатость поверхности Удельное электро-сопротивление	

В качестве критерия однородности порошка по выбранной характеристике качества принята массовая доля в порошке фракции, соответствующей номинальной характеристике порошка.



Так как процессы разделения зерен алмаза в выбранных силовых полях происходят в условиях массопереноса и подчиняются вероятностным закономерностям, повышение однородности порошка происходит пропорционально увеличению количества дополнительных перечисток и может достигать 90...95 %.

Алмазный инструмент на основе элитных порошков с повышенной однородностью качества работает более эффективно, удельный расход алмаза снижается, так как подавляющее количество алмазных зерен работает с одинаковой эффективностью. Элитные алмазные порошки нашли эффективное применение в камнеобрабатывающем, буровом и правящем инструментах, в фасонных роликах, на операциях прецизионной правки и шлифования.

В странах СНГ наименование марок алмазных порошков идентично, тогда как в странах дальнего зарубежья используется своя маркировка.

В наших стандартах зернистость соответствует ситовому размеру зерен в мкм, а в зарубежных — указывается в меш. Соответствующие размерные данные приведены в табл. 3.4.

#### 3.4. Обозначение размеров зёрен алмазных шлифпорошков по стандартам СНГ и по стандарту ISO 565

Стандарты СНГ		Стандарт ISO 565	
Зернистость	Размер зерен, мкм	Зернистость	Размер зерен, мкм
630/500	630/500	30/35	600/500
500/400	500/400	35/40	500/425
400/315	400/315	40/45	425/355
315/250	315/250	50/60	300/250
250/200	250/200	60/70	250/212
200/160	200/160	70/80	212/180
160/125	160/125	100/120	150/125
125/100	125/100	120/140	125/106
100/80	100/80	140/170	100/80
80/63	80/63	200/230	75/63
63/50	63/50	270/325	63/53
50/40	50/40	325/400	45/38

### 3.3. МИКРО- И СУБМИКРОПОРОШКИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Микро- и субмикророшки получают из фракций зернистостью не более 60 мкм, выделенной из исходного алмазного сырья и образовавшейся в результате изготовления шлифпорошков.

По ГОСТ 9206–80 алмазный микропорошок — это порошок, в котором размеры зерен основной фракции от 1 до 60 мкм, а алмазный субмикророшок — от 0,1 до 1 мкм.

Для разделения (рис. 3.7) микропорошков с размером частиц более 40 мкм и для отделения фракции менее 40 мкм применяют классификатор, в котором используется эффект псевдооживления. Процесс воздушно-ситовой классификации состоит в следующем. В сито, закрытое герметизирующей крышкой, помещается классифицируемый порошок. Ситовое полотно продувается воздушной струей, исходящей из перемещающегося под ситом сопла. Воздушный поток взмучивает находящийся на сите порошок и, отражаясь от крышки, уходит в подситовое пространство, унося с собой зерна мелкой фракции.

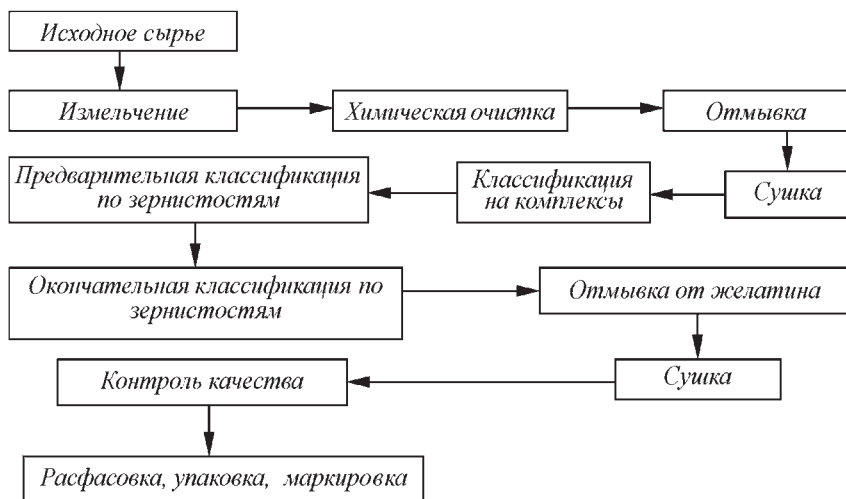


Рис. 3.7. Принципиальная технологическая схема изготовления алмазных микропорошков

Гидравлическая седиментация в гравитационном или центробежном полях признана основным методом классификации частиц менее 40 мкм. Для осуществления этого процесса созданы специальные классификационные стаканчиковые центрифуги с различной скоростью вращения (ЦК-3, ЦК-4, ЦК-5). Для расчета времени осаждения микропорошков  $\tau$  используется экспериментальная формула:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\frac{\gamma_{0,87}}{\gamma_n \sqrt{\psi}}}, \quad (3.2)$$

где  $\tau_0$  — время свободного падения частиц данной крупности по формуле Сведберга, с;  $\psi$  — объемная доля твердой фазы в суспензии, доли единицы;  $\gamma$ ,  $\gamma_n$  — плотность и насыпная плотность порошка соответственно.

Отличительным признаком микропорошков, отражающим их качество, является абразивная способность, характеризуемая отношением массы материала, сошлифованного с обрабатываемого образца, к массе израсходованного при этом алмазного порошка при строго установленном режиме испытания.

Основную долю объема выпуска микропорошков составляют микропорошки нормальной абразивной способности, которые обозначаются индексом АСМ (алмазный синтетический микропорошок), и порошки повышенной абразивной способности — индексом АСН. Микропорошки марок АСМ и АСН выпускаются зернистостью от 1/0 до 60/40 мкм (табл. 3.5).

Для обозначения субмикропорошков к буквенным индексам добавляется цифра 5 или 1, обозначающая содержание в порошке зерен крупной фракции (соответственно не более 5 или 1 %). Субмикропорошки выпускают шести зернистостей (см. табл. 3.5).

Для получения микро- и субмикропорошков специального назначения применяют различные методы модифицирования их поверхности. В этом случае к основным индексам добавляют новые: О — овализованные, Д — диамагнитные, Ф100 — гидрофобизированные, Ф700 — гидрофилизированные и др. (табл. 3.6).

Например, особенностью овализованных микропорошков (АСМ-О) является повышенная изометричность зерен и улуч-

### 3.5. Марки, зернистости и рекомендуемые области применения алмазных синтетических микро- и субмикророшкови по ГОСТ 9206–80

Марка порошка	Зернистость		Область применения	
	Широкий диапазон	Узкий диапазон	АСМ	АСН
<i>Микророшки</i>				
АСМ, АСН	60/28	60/40	Доводка и полирование деталей из закаленных сталей, сплавов, керамики, полупроводниковых и др. материалов	Доводка и полирование твердых и сверхтвердых труднообрабатываемых материалов, корунда, алмазов, драгоценных камней
	40/20	40/28		
	28/14	28/20		
	20/10	20/14		
	14/7	14/10		
	10/5	10/7		
	7/3	7/5		
	5/2	5/3		
	3/1	3/2		
	3/0	2/1		
	2/0	1/0		
<i>Субмикророшки</i>				
АСМ5		1/0,5 0,7/0,3 0,5/0,1	Сверхтонкая доводка и полирование поверхностей изделий при обработке полупроводниковых материалов и прецизионных деталей из других труднообрабатываемых материалов	
АСМ1		0,5/0 0,3/0 0,1/0		

шенный зерновой состав. За счет этого их абразивная способность на 20...30 % выше, чем у порошков АСН.

Диаманитные порошки (АСМ-Д) характеризуются пониженным содержанием металлических включений и в связи с этим обладают более низкими значениями удельной магнитной восприимчивости и электропроводности. Используются для изготов-

3.6. Различные типы алмазных микропорошков специального назначения

Марка	Наименование порошков	Диапазон зернистостей	Основные характеристики					Область применения
			$\alpha$ , %	$\chi$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , Ом·м	$\Delta C_S$ , мДж/моль·м <sup>2</sup>	$K_{\Phi}$	
АСМ серия Ф-100	Гидрофобизированные	40/28...2/1	0,5	$0,3 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{11}$	-30	1,4...1,3	Шлифование оптических деталей. Пасты на основе неполярных растворителей. Поликристаллы с повышенной теплопроводностью
АСМ серия Ф-700	Гидрофобизированные	40/28...2/1	0,1...0,2	$0,3 \cdot 10^{-8}$	$10^{11}$	-65	1,4...1,3	Пасты для получения толстых пленок для микроэлектроники. Коррозионно- и эрозивно-стойкие поликристаллы и композиты
АСМ серия ЭТ	Со специальными электротехническими характеристиками	14/10...1/0	0,5	—	$10^4 \dots 10^{13}$	—	—	Пасты, толстые пленки, поликристаллы и композиты, используемые в микроэлектронике
АСМ серия Д	Диамагнитные	60/40...1/0	< 1,0	$-0,05 \cdot 10^{-8}$	—	—	1,25	Инструменты на гальванической связке, поликристаллы

Примечание.  $\alpha$  — массовая доля растворимых примесей, %;  $\chi$  — удельная магнитная восприимчивость, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho$  — сопротивление, Ом·м;  $\Delta C_S$  — свободная энергия насыщения водой, мДж/моль·м<sup>2</sup>;  $K_{\Phi}$  — коэффициент формы.

ления инструмента на гальванической связке. Порошки серии Ф100 и Ф700 характеризуются различной степенью гидрофильности. Более гидрофильные (Ф700) используют для изготовления суспензий и паст на водорастворимой основе, а менее гидрофильные (серия Ф100) — для паст и суспензий на основе аполярных жидкостей.

### 3.4. НАНОПОРОШКИ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗВ

Промышленности зачастую требуются мелкозерновые, прочные, износостойкие материалы, резко отличающиеся характеристиками от крупнозернового материала. Такими характеристиками обладают ультрадисперсные (нанометричные) материалы.

Алмаз с размером зерна 1...10 нм (ультрадисперсный — УДА) синтезируется путем детонации заряда взрывчатого вещества в специальных камерах в среде с отрицательным кислородным балансом [18].

Ультрадисперсный алмаз детонационного синтеза, сохраняя структурные характеристики, а также физико-химические свойства алмаза статического синтеза, существенно отличаются от него поверхностными свойствами. Эти отличия обусловлены значительным количеством нескомпенсированных связей, вследствие чего УДА обладает сильными адсорбционными свойствами. Именно эта качественная характеристика нового вида алмазного порошка заслуживает наиболее пристального внимания. Известно, что добавки УДА в различные материалы способствуют формированию мелкозернистых структур с принципиально новыми свойствами.

Перспективно применение порошков ультрадисперсного алмаза и изделий на их основе в качестве добавок в электрохимические и химические покрытия; в присадки к техническим маслам; в полимерные керамические и резинотехнические материалы, клеи; изготовления поликристаллов и различных мелкокристаллических композитов; фильтров и мембран, суспензий и паст для тонкой шлифовки и доводки; алмазные адсорбенты.

В табл. 3.7 приведены характеристики четырех марок алмазных нанопорошков и указаны рекомендуемые области применения.

3.7. Марки, основные характеристики и области применения нанопорошков синтетического алмаза  
(ТУ У 26.8–05417377–177:2007)

Марка нанопорошка	Массовая доля, %					Удельная магнитная восприимчивость, $\chi$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{см}^3$	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$ , не менее	Удельная магнитная восприимчивость, $\chi$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	Назначение (область применения)
	Алмаз	Несгоревший остаток	Растворенные примеси	Влага	pH					
АСУД 50	50	1,8	0,8	3,0	3,5...6,0	—	200...300	2,7	—	Композиты, покрытия, наполнители, полировальные пасты
АСУД 75	75	1,	0,5	2,0	3,5...6,0	—	200...300	3,0	—	Композиты, покрытия, наполнители, полировальные пасты
АСУД 95	95	1,8	0,8	3,0	3,5...6,0	—	120...250	3,3	$20,0 \cdot 10^{-8}$	Поликристаллы, композиты, суспензии, пасты
АСУД 99	99	0,5	0,3	1,0	3,5...6,0	—	140...300	3,4	$1,0 \cdot 10^{-8}$	Термостойкие поликристаллы, материалы для микроэлектроники, биомедицины

### 3.5. ПОРОШКИ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Кубический нитрид бора (сBN) является более термостойким материалом, чем алмаз, и, как правило, применяется там, где не может использоваться алмаз, т.е. при больших нагрузках и высокой температуре.

Например, для круглого и плоского шлифования, доводочных и полировальных операций при изготовлении прецизионных инструментов и деталей из стали, цветных металлов и их сплавов.

Продукт синтеза кубонита представляет собой спек из сBN, металла и неперекристаллизовавшегося hBN. Процесс извлечения состоит из двух этапов: растворения металлической составляющей разбавленными минеральными кислотами и удаления остаточного hBN.

Удаление остаточного hBN осуществляется, как правило, сплавлением гидроксидами щелочных металлов или их смесями:



Возможно также растворение остаточного hBN в концентрированной серной кислоте с добавлением сульфата калия при кипячении в течение 5...6 ч:



Для удаления остаточного hBN используют также флотационные методы в сочетании с избирательным механическим или ультразвуковым дроблением. Флотационный процесс основан на различии поверхностных свойств кубической и гексагональной модификаций нитрида бора. Возможно для разделения смесей крупностью более 100 мкм использование и гравитационных методов обогащения.

Извлеченные зерна сBN, как и зерна алмаза, подвергают затем дроблению и последующей классификации по размерам. Классификация по форме проводится по желанию заказчика при изготовлении специальных марок порошков.

Основной характеристикой, разграничивающей марки шлифпорошков сBN, как и алмаза, является прочность зерен при статическом сжатии.



Шлифпорошки кубонита с размерами зерен от 40 до 250 мкм производят трех марок: обычной (КО), повышенной (КР) и высокой (КВ) прочности (табл. 3.8).

### 3.8. Показатель прочности шлифпорошков кубонита различных марок

Зернистость	Показатель прочности при статическом сжатии, Н, не менее, для марок		
	КО	КР	КВ
250/200	—	—	10,5
200/160	3,0	6,2	8,7
160/125	2,8	5,2	7,3
125/100	2,6	4,4	6,2
100/80	2,3	3,8	5,3
80/63	2,0	3,3	4,6
63/50	2,0	2,9	4,1
50/40	2,0	2,6	3,6

Основной характеристикой микропорошков из кубонита (КМ) является абразивная способность. Диапазон зернистостей такой же, как и микропорошков алмаза, т.е. от 1/0 до 60/40.

### 3.6. КОМПЬЮТЕРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВ СТМ

Порошки СТМ наряду с физическими, механическими и химическими свойствами обладают еще и специфическими для изделий эксплуатационными или потребительскими характеристиками — размер зерен, прочность статическая и динамическая, удельная по-

верхность, насыпная плотность, текучесть, зерновой состав порошка и др. Значения характеристик зависят от конкретной реализации порошка как изделия (например, от технологических параметров и режимов работы оборудования, используемого для его изготовления) и используются как признаки качества алмазных порошков, а их значения — критериями его интерпретации и оценивания. Значения некоторых наиболее важных характеристик приняты как нормы стандартов на порошки СТМ.

### 3.6.1. Адекватность значений характеристик порошков СТМ и методы количественной ее оценки

*Системно-критериальный метод определения однородности значений характеристик порошков СТМ.* Оценка однородности порошков производится не по одному какому-то статистическому параметру, а по большому их количеству. Вводится обобщенный показатель однородности порошка в целом по принятой базовой совокупности его характеристик.

Система показателей однородности принимается трехуровневая. Показатели первого уровня базируются на статистических параметрах ряда распределения значений анализируемой характеристики  $x$ , а именно: среднем арифметическом значении ( $x_c$ ); среднеквадратическом отклонении ( $x_s$ ); квадратическом коэффициенте вариации ( $V_\sigma$ ); коэффициенте асимметрии ( $k_a$ ); моде ( $M_o$ ) и ее частотной характеристике ( $f_m$ ); вариационном размахе ( $R$ ); коэффициенте осцилляции ( $V_R = R/x_c$ ) и среднем гармоническом ( $x_{cr}$ ). Значение первичных показателей определяются по зависимостям:

$$u_1^{(x)} = \frac{1}{1+|k_a|}; \quad u_2^{(x)} = \frac{x_s + M_o}{x_c + M_o + |x_c - M_o|}; \quad u_3^{(x)} = f_m; \quad (3.3)$$

$$u_4^{(x)} = \frac{1}{1+V_\sigma}; \quad u_5^{(x)} = \frac{1}{1+V_R}; \quad u_6^{(x)} = \frac{x_{cr}}{x_r}.$$

Здесь верхний индекс « $x$ » указывает на характеристику порошка, по которой проводится анализ однородности, а запись  $|\dots|$  означает, что выражение, заключенное в прямые черточки, следует брать по абсолютной величине. При выборе вида показателей (3.3) и границ ин-

тервалов изменения их значений исходили из следующих соображений. Если порошок состоит из идентичных по форме, размерам, прочности и другим характеристикам частиц, то результаты повторных метрологических операций, связанных с определением значений его характеристик, в пределах ошибки измерений, также будут одинаковыми. Для такого однородного порошка  $x_c = M_o = x_{cr}$ ,  $V_o = k_a = V_R$  показатель равен 1. В случае абсолютно неоднородного порошка — 0.

Показатели второго уровня — частные ( $U_q^{(x)}$ ) — вычисляются исходя из первичных показателей, путем нахождения среднего гармонического:

$$U_q^{(x)} = \frac{6}{\sum_{i=1}^6 \frac{1}{u_i^{(x)}}}. \quad (3.4)$$

На третьем уровне, на основании значений частных показателей, определяется обобщенный показатель

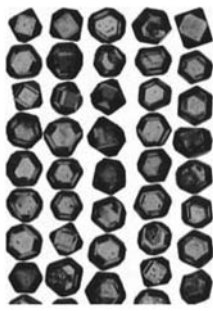

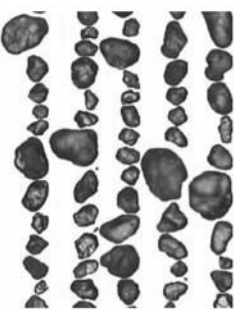
$$U_o = \frac{N_q}{\sum_{k=1}^{N_q} \frac{1}{U_k^{(x)}}}, \quad (3.5)$$

где  $N_q$  — количество базовых характеристик.

В табл. 3.9 приведены результаты применения разработанного системно-критериального метода к некоторым абразивным порошкам. В качестве характеристик, описывающих величину зерен ( $F_{max}$ ,  $F_{min}$ ,  $d_c$ ,  $d_o$ ), их форму ( $C_r$ ,  $F_c$ ) и топографию поверхности ( $P_{уд}$ ,  $Rg$ ) рассмотрены: площадь проекции зерна ( $A$ ,  $\text{мкм}^2$ ), периметры истинного (фактического,  $p_r$ ,  $\text{мкм}$ ) и выпуклого ( $p_{conv}$ ,  $\text{мкм}$ ) его контуров, максимальный ( $F_{max}$ ,  $\text{мкм}$ ) и минимальный ( $F_{min}$ ,  $\text{мкм}$ ) диаметры *Feret*, средний ( $d_m$ ,  $\text{мкм}$ ) и эквивалентный ( $d_o$ ,  $\text{мкм}$ ) диаметры зерна, форм-фактор фактического изображения проекции зерна ( $C_r$ ), эллиптичность (симметричность,  $E$ ), *Feret*-удлинение ( $F_{el}$ ), шероховатость ( $Rg$ ) зерен, удельный периметр проекции зерен  $P_{уд} = p_r / A$ .

Приведенные выше оценки касаются лишь однородности порошков, но не их качества. Качество является относительным понятием, связанным с областью применения порошка. Так, порошок с высоким показателем однородности в одних случаях может квалифицироваться как порошок высокого качества, в других — наоборот.

### 3.9. Средние значения (средн.) основных морфометрических характеристик абразивных порошков, показатели их адекватности по однородности (одн.) и стабильности (стаб.)

Характеристики	Алмаз АС200 400/315			Электрокорунд (250/200)			Речной песок		
	средн.	одн.	стаб.	средн.	одн.	стаб.	средн.	одн.	стаб.
$F_{\max}$ , МКМ	491,6	0,825	0,695	302,8	0,560	0,239	293,0	0,451	0,125
$F_{\min}$ , МКМ	423,2	0,872	0,693	198,6	0,587	0,249	215,4	0,442	0,122
$C_r$	1,20	0,839	0,679	1,50	0,578	0,486	1,32	0,656	0,366
$E$	1,07	0,888	0,763	1,54	0,393	0,368	1,37	0,412	0,205
$F_{el}$	1,16	0,821	0,692	1,55	0,451	0,436	1,39	0,491	0,293
$R_g$	1,058	0,865	0,877	1,082	0,688	0,810	1,065	0,792	0,821
$d_m$ , МКМ	457,4	0,920	0,730	250,7	0,609	0,248	254,2	0,438	0,125
$d_3$ , МКМ	449,7	0,920	0,727	225,9	0,629	0,269	241,3	0,442	0,121
$A$ , МКМ <sup>2</sup>	15 9475	0,718	0,510	42217	0,479	0,084	54556	0,244	0,012
$p_r$ , МКМ	1545	0,855	0,716	870,6	0,596	0,234	863,9	0,433	0,125
$p_{conv}$ , МКМ	1461	0,924	0,743	802,2	0,604	0,248	810,6	0,445	0,125
$P_{уд}$ , М <sup>-1</sup>	0,010	0,818	0,625	0,025	0,388	0,075	0,030	0,323	0,046
$F_{уд}$ , М <sup>2</sup> /КГ	8,92	—	—	29,60	—	—	29,56	—	—
Фотографии зерен									

**Системно-критериальный метод определения стабильности значений характеристик порошков СТМ.** Наряду с однородностью в качестве дополнительной характеристики используется индекс стабильности. Необходимость этого параметра появляется, например, при сравнительном исследовании порошков с близкими характеристиками.

Индекс стабильности рассчитывается по формуле

$$i_{st} = \frac{x_{cr} \cdot x_c}{(x_c + s)(x_c + R)}, \quad (3.6)$$

где  $x_{cr}$  — среднегармоническое;  $x_c$  — среднеарифметическое;  $s$  — среднеквадратическое отклонение;  $R$  — вариационный размах значений характеристики.

Индекс стабильности превосходит однородность по таким критериям как информативность, запас рабочего ресурса, степень чувствительности к изменению качества порошка (см. табл. 3.9).

### 3.6.2. Экстраполяционно-аффинная 3D-модель зерна порошков СТМ, ее инженерия и приложения

Экстраполяционно-аффинная 3D-модель зерна представляет собой пространственное эллипсидоподобное тело  $T$  (рис. 3.8, *a*), образованное однопараметрическим отображением контура проекции

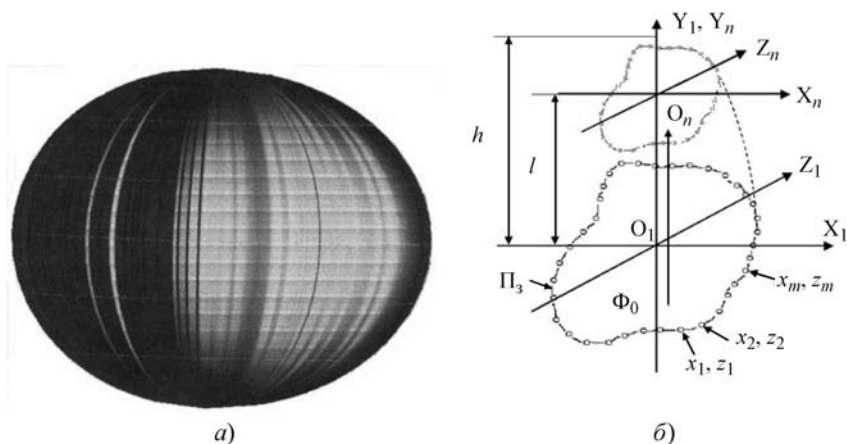


Рис. 3.8. 3D-модель зерна (*a*) и однопараметрические отображения его контура (*б*)

зерна (Пз, рис. 3.8, б). Как инструмент инженерии модели зерна используется математический аппарат отображения аффинного пространства с гомотетией и параллельным переносом в качестве отображающих операторов. Прообразом отображения выступает контур проекции. Вычисление объема и площади поверхности зерна проводится с использованием имеющейся информации по размерным характеристикам, площади и периметру проекции зерна.

**Дискретно-геометрический метод определения внешней удельной поверхности.** Расчетная формула для определения показателя внешней удельной поверхности порошка СТМ с использованием экстраполяционно-аффинной 3D-модели зерна имеет вид

$$F_n = \sum_{n=1}^N \frac{S_n}{\rho V_n}, \quad (3.7)$$

где  $\rho$  — удельный вес материала порошка;  $N$  — количество зерен в пробе;  $S_n$  и  $V_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ) — площадь поверхности и объем отдельного зерна соответственно.

В табл. 3.10 представлены в результаты расчетного определения внешней удельной поверхности шлифпорошков СА дискретно-геометрическим методом, а также с использованием других известных 3D-моделей зерна.

**3.10. Экспериментальные (Э) и расчетные значения внешней удельной поверхности (м<sup>2</sup>/кг) шлифпорошков СА некоторых марок и зернистостей при различных 3D-моделях зерна**

Шлифпорошок	Э	Расчетные значения для моделей*							
		I	δ	II	δ	III	δ	IV	δ
АС4 160/125	37	37,79	2,14	52,17	41,00	8,93	75,86	8,93	8,93
АС6 63/50	78	78,81	1,04	115,68	48,31	21,02	73,05	21,02	21,02
АС6 200/160	34	34,45	1,32	54,56	60,47	9,22	72,88	9,22	9,22
АС15 100/80	50	49,15	1,70	72,73	45,46	14,06	28,12	14,06	14,06
АС20 160/125	27	27,41	1,52	40,25	49,07	8,91	67,00	8,91	8,91
АС32 125/100	31	32,22	3,93	54,29	75,13	11,67	62,35	11,67	11,67
АС50 100/80	41	40,91	0,23	60,36	47,22	12,82	68,76	12,82	12,82

Примечание: I — экстраполяционно-аффинная модель; II — трехосный эллипсоид; III — сфера; IV — куб; δ — относительная погрешность расчетного определения, %.

Дискретно-геометрический метод, основанный на экстраполяционно-аффинной 3D-модели зерна, дает наиболее точные расчетные значения его внешней удельной поверхности по сравнению с другими известными моделями. Приведенные в табл. 3.10 данные иллюстрируют влияние количества унаследованных фактических характеристик зерна на адекватность его 3D-модели.

Аналогичный подход позволяет эффективно определить число зерен в одном карате порошков алмаза (табл. 3.11).

### 3.11. Экспериментальные (Э) и расчетные данные по числу ( $n$ , шт.) зерен в одном карате шлифпорошков

Шлифпорошок	$N$	Э	3D-модель зерна			
			Экстраполяционно-аффинная		Трехосный эллипсоид	
			$n$	$\delta$	$n$	$\delta$
АС300 425/355 (40/45)*	232	1395	1366,2	2,60	1320	5,37
АС32-Н 425/355 (40/45)	212	1794	1781,3	0,72	1656,9	7,64
АС32 500/425 (35/40)	278	998	990,16	0,8	906,38	9,18
АС200 600/500 (30/35)	111	568	566,25	0,35	526,32	7,34
АС200 600/500 (30/35)	157	485	496,84	2,44	464,49	4,23
АС200 710/600 (25/30)	92	325	320,99	1,23	305,82	5,90
АС200 800/710 (20/25)	97	234	231,5	1,07	224,1	4,27

\* В скобках указана зернистость в меш;  $\delta$  — относительная погрешность расчетного определения, %;  $N$  — число зерен в пробе.

Учет фактической формы зерна обуславливает точность оценки на основе экстраполяционно-аффинной модели.

### 3.6.3. Компьютерно-аналитическое определение количества и среднего значения угла заострения режущих кромок зерен, ситовой зернистости и показателей ситового зернового состава порошков СТМ

*Определение количества и среднего значения угла заострения режущих кромок зерен порошков СТМ.* Количество режущих кромок находится из решения уравнения

$$C_r - \frac{nRg^2 \operatorname{tg}(\pi/n)}{\pi[Rg - \operatorname{tg}(\pi/n)\sqrt{Rg^2 - 1}]} = 0, \quad (3.8)$$

где  $C_r$  и  $Rg$  — соответственно форм-фактор и шероховатость зерен абразивного порошка.

Среднее значение угла заострения вычисляется по зависимости

$$\Phi = \frac{\pi(n-2)}{2n} - \arccos\left(\frac{1}{Rg}\right). \quad (3.9)$$

*Определение ситовой зернистости и показателей зернового состава алмазных шлифпорошков методами математического и геометрического моделирования.* Ситовой рассев — наиболее известный способ разделения дисперсных материалов на размерные классы по величине зерен. Применительно к порошкам СТМ он наряду с этим используется и как метод установления ситовой зернистости и показателей ситового зернового состава (по относительной массе выделенных фракций) порошка после разделения его тем или иным способом. Как метод определения ситовой зернистости и показателей ситового зернового состава такой рассев, именуемый контрольным, имеет существенный недостаток — необходимость применения дорогостоящих высокоточных и быстро изнашиваемых сит.

Альтернативным методом является определение ситовой зернистости и показателей зернового состава алмазных шлифпорошков с использованием математического и геометрического моделирования (рис. 3.9). Исходными данными служат длина и ширина проекции зерен, а также их высота.



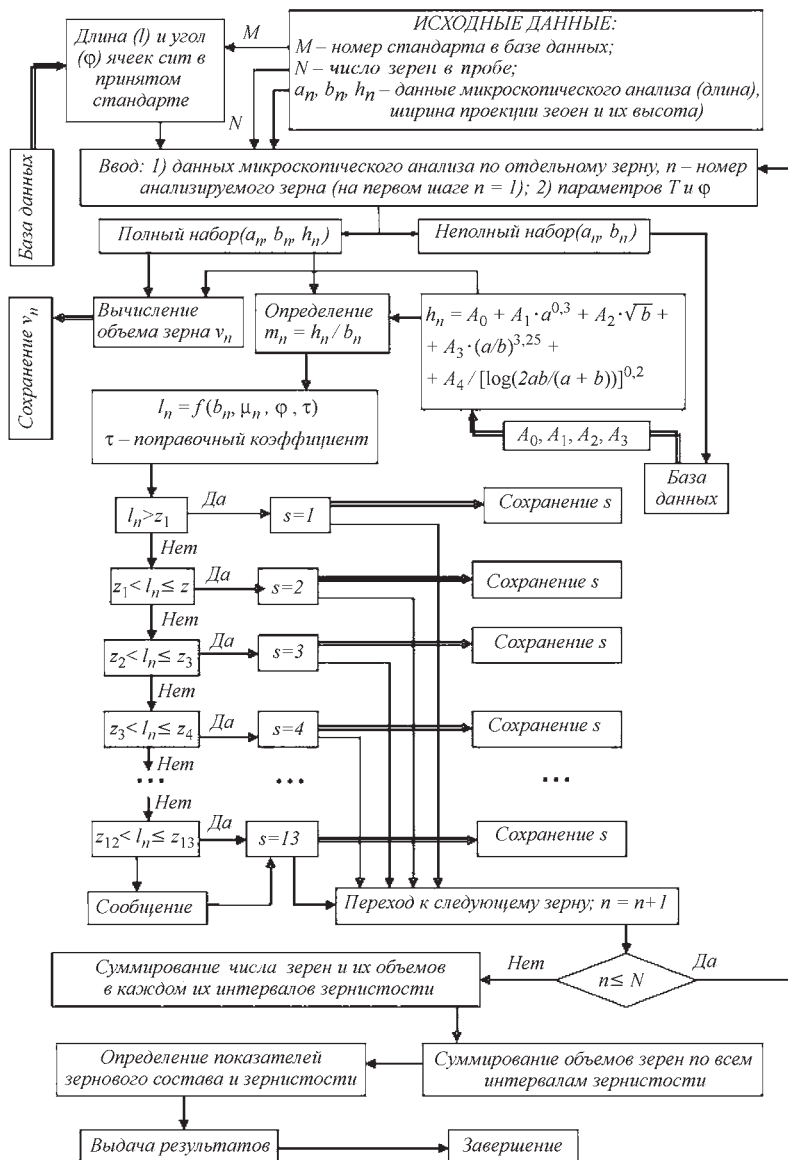


Рис. 3.9. Схема алгоритма определения показателей ситового зернового состава и зернистости порошков СТМ-методом математического моделирования

## Глава 4

### МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТМ

#### 4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ

В зависимости от технологии изготовления алмазного инструмента и условий его эксплуатации устанавливают основные и специальные характеристики качества алмазного порошка.

Основными характеристиками алмазных порошков марок согласно ГОСТ 9206–80 «Порошки алмазные» являются:

- зернистость;
- зерновой состав;
- показатель прочности при статическом сжатии;
- динамическая прочность;
- коэффициент формы зерен;
- массовая доля примесей и влаги;
- абразивная способность порошков.

К специальным характеристикам порошков алмаза относятся:

- коэффициент однородности по прочности;
- удельное электрическое сопротивление;
- удельная магнитная восприимчивость;
- дефектность (шероховатость) поверхности;
- термостойкость.

Рассмотрим подробно перечисленные выше характеристики.

##### 4.1.1. Основные характеристики

*Зернистость* алмазного порошка определяется и характеризуется размером зерен основной фракции и обозначается дробью, числитель которой соответствует размеру ячеек верхнего сита, а знаменатель — размеру ячеек нижнего сита, на которых остаются зерна рассеиваемой фракции, образуя массу порошка определенной зернистости, напри-

мер, 400/315. Цифры соответствуют размерам ячеек сит в мкм. В табл. 4.1 приведено количество зерен в одном карате алмазного порошка в зависимости от зернистости (по данным В.Н. Бакуля).

#### 4.1. Количество зерен в 1 карате алмазного порошка в зависимости от зернистости

Зернистость порошков синтетического алмаза	Количество зерен в 1 карате	Зернистость порошков синтетического алмаза	Количество зерен в 1 карате
500/400	$8,3 \cdot 10^2$	40/28	$8,03 \cdot 10^6$
400/315	$1,6 \cdot 10^3$	28/20	$25,3 \cdot 10^6$
315/250	$3,2 \cdot 10^3$	20/14	$70,9 \cdot 10^6$
250/200	$6,37 \cdot 10^3$	14/10	$202 \cdot 10^6$
200/160	$12,8 \cdot 10^3$	10/7	$568 \cdot 10^6$
160/125	$25,5 \cdot 10^3$	7/5	$1,66 \cdot 10^9$
125/100	$50,2 \cdot 10^3$	5/3	$5,43 \cdot 10^9$
100/80	$100 \cdot 10^3$	3/2	$16,8 \cdot 10^9$
80/63	$203 \cdot 10^3$	2/1	$63,6 \cdot 10^9$
63/50	$401 \cdot 10^3$	1/0	$153 \cdot 10^9$
50/40	$796 \cdot 10^3$		

Алмазные порошки стандартных зернистостей получают из алмазного сырья ситовой классификацией на наборе сит, размеры ячеек которых выбраны из ряда предпочтительных чисел, представляющего собой геометрическую прогрессию с определенным модулем. В странах СНГ применяют набор сит с модулем  $\sqrt[10]{10} = 1,26$ , размеры ячеек и зернистость алмазного порошка оценивают в микрометрах.

В США и Западной Европе применяют набор сит с обозначением размера ячеек в мешах (величина меш — это число отверстий на один линейный дюйм сетки). При этом изменение размеров ячеек в ситах соответствует шкале  $\sqrt{2} = 1,41$  в интервале от 2,362 мм (8 меш)

до 0,104 мм (150 меш), а затем с модулем  $\sqrt[4]{2} = 1,189$  от 0,104 мм (150 меш) до 0,038 мм (400 меш).

Соотношение зернистости шлифпорошков по различным стандартам приведено в табл. 4.2.

#### 4.2. Зернистость шлифпорошков СТМ по различным стандартам

Стандарт FEPA		Стандарт ISO, мкм	Стандарт США, mesh	ГОСТ 9206–80, мкм
Алмаз	cBN			
D1181	–	1180/1000	16/18	1250/1000
D1101	–	1000/850	18/20	1000/800
D 851	–	850/710	20/25	800/630
D 711	–	710/600	25/30	
D 601	–	600/500	30/35	630/500
D 501	–	500/425	35/40	500/400
D 426	–	425/355	40/45	400/315
D 356	–	355/300	45/50	315/250
D 301	B 301	300/250	50/60	
D 251	B 251	250/212	60/70	250/200
D 213	B 213	212/180	70/80	200/160
D 181	B 181	180/150	80/100	
D 151	B 151	150/125	100/120	160/125
D 126	B 126	125/106	120/140	125/100
D 107	B 107	106/30	140/170	100/80
D 91	B 91	90/75	170/200	
D 76	B 76	75/63	200/230	80/63
D 64	B 64	63/53	230/270	63/50
D 54	B 54	53/45	270/325	50/40
D 46	B 46	45/38	325/400	

**Зерновой состав шлифпорошка.** Однородность алмазного шлифпорошка по зернистости характеризуется зерновым составом порошка с нормированным по ГОСТ 9206–80 содержанием в порошке основной фракции.

Зерновой состав шлифпорошка определяют путем отсева контрольной пробы массой 10 г анализируемого порошка на наборе контрольных сит в течение 10 мин. Затем взвешивают порошки, оставшиеся на каждом сите, и рассчитывают массовую долю в процентах в порошке каждой фракции по формуле

$$O_{\phi} = \frac{m_{\phi}}{m} 100 \%, \quad (4.1)$$

где  $O_{\phi}$  — массовая доля основной фракции, %;  $m_{\phi}$  — масса порошка основной фракции, г;  $m$  — масса порошка всех фракций контрольной пробы, г.

**Определение зернистости микропорошков и субмикропорошков.** Их зернистость определяется размером зерен основной фракции. Для определения зернового состава используются прямые и косвенные методы измерений.

Прямые методы реализованы на базе оптических микроскопов с увеличением 120...1800 с окулярной сеткой либо электронных микроскопов с увеличением 10000 с ценой деления не более 0,1 мкм. В ГОСТ 9206–80 предусмотрены микроскопы типа БИОЛАМ, Р15, МБР, электронный микроскоп ЭМ-14, а также другие микроскопы, не уступающие по характеристикам вышеперечисленным.

Размер зерен алмазных микропорошков определяют полусуммой длины и ширины прямоугольника, условно описанного вокруг проекции зерна на плоскость при наблюдении в микроскоп таким образом, чтобы большая сторона прямоугольника соответствовала наибольшей длине проекции зерна. Определение зернистости и зернового состава алмазных микропорошков проводят микроскопом, используя окулярную сетку, путем визуального или компьютеризированного подсчета количества зерен крупной ( $K_{\phi}$ ), основной ( $O_{\phi}$ ) и мелкой ( $M_{\phi}$ ) фракций. Возможно определение статистического распределения размеров зерен.

В зависимости от зернистости порошка увеличение микроскопа подбирают таким образом, чтобы цена деления окулярной сетки составляла для зернистостей:

40/28 — 60/40	1,50...14,0 мкм;
20/14 — 28/20	1,50...6,50 мкм;
7,5 — 14/10	1,50...4,50 мкм;
1,0 — 5/3	0,35...1,50 мкм.

Долю каждой фракции в процентах вычисляют по формулам

$$K_{\phi} = \frac{q_k}{Q} 100 \% ; \quad O_{\phi} = \frac{q_o}{Q} 100 \% ; \quad M_{\phi} = \frac{q_m}{Q} 100 \% , \quad (4.2)$$

где  $q_k$ ,  $q_o$ ,  $q_m$  — количество измеренных зерен соответствующей фракции;  $Q$  — общее количество измеренных зерен.

Для субмикropорошков определение зернистости и зернового состава проводится на электронном микроскопе при увеличении не менее 10 000.

Косвенные методы измерений основаны на использовании различных физических явлений, таких как дифракция оптического излучения (лазерные дифрактометры), изменение электростатического поля (электростатическое измерение размеров зерен) и др. Наибольшее распространение получили лазерные дифракционные гранулометры. В частности, для компьютерного анализа распределения частиц по размеру микронных и субмикронных порошков алмаза и кубического нитрида бора применяют установку ЛМС-30 фирмы «Сейшин» (Япония). Применение установки позволяет на основе анализа дифракции и рассеяния луча лазера выполнять измерения частиц размером от 0,1 до 1000 мкм, обработка результатов осуществляется с помощью компьютера. Результаты измерений с одновременным анализом статистического распределения распечатываются в виде таблиц и гистограммы распределения порошка по размерам. Используются также лазерные гранулометры Horiba LA910 (Япония), Malvern (США), которые имеют близкие параметры по разрешающей способности (0,001 мкм) и пределам измерения (0,1–1000 мкм), а также Glanulometr 715 фирмы Silak (Франция), пределы измерения которого от 1 до 192 мкм.

В странах СНГ применяется прибор прямого измерения «Видеотест» (Санкт-Петербург), использующий метод компьютерного считывания оптической информации.

**Статическая прочность кристаллов алмаза при сжатии.** Малые размеры кристаллов алмаза, их высокая твердость и хрупкость не

позволяют изготавливать образцы требуемой формы для испытаний на прочность. Поэтому по технологии производства алмазных шлифпорошков испытывают на сжатие определенное количество отдельных зерен алмазов произвольной формы и получают средне-статистическое значение их прочности.

Сущность метода заключается в измерении нагрузки, разрушающей алмазные зерна между двумя параллельными пластинами при плавном увеличении усилия сжатия. Нагрузку, разрушающую зерна алмаза, измеряют в ньютонах (Н) и определяют на специальных приборах типа ДА-2, ДА-2М, ПА-6М, ПА-5, ДДА-33.

Для низкопрочных порошков марок АС2–АС20 испытанию подвергают 50 зерен, для более прочных порошков АС32–АС400 испытанию подвергают дважды по 50 зерен. Средний показатель прочности порошка по результатам последовательного разрушения 50 зерен  $P_{\text{cp}}$ , Н, рассчитывают по формуле

$$P_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (4.3)$$

где  $P_i$  — значение разрушающей нагрузки отдельного зерна, Н;  $n$  — число разрушенных зерен, шт.

**Динамическая прочность кристаллов алмаза.** Показатель динамической прочности характеризует способность алмазного порошка противостоять ударным, динамическим нагрузкам, которым в основном подвергаются алмазы при работе алмазным инструментом. Этот технологический показатель применяется преимущественно для характеристики качества шлифпорошков марок АС50 и выше зернистостей 200/160 и выше.

Динамическую прочность можно определять различными методами, но наибольшее распространение получил метод испытаний порошков алмаза при вибрационной нагрузке на приборах типа Freitester фирмы Diamond Grit Tester, США). Пробу порошка массой 2 карата помещают в узкий стальной цилиндр со свободно перемещающимся внутри стальным шариком. Цилиндр помещают на вал электромотора в специальную установку. При вращении вала обеспечивается возвратно-поступательное перемещение шарика в капсуле вдоль ее оси. Установка фиксирует по числу оборотов количество циклов нагружения пробы шариком. При испытаниях

зерна дробятся. После определенного числа циклов пробу выгружают, рассеивают на ситах и определяют процентное содержание зерен на ряде контрольных сит.

В результате испытаний определяется число ударов шарика по зернам, необходимых для разрушения 50 % зерен пробы порошка. Проводится, как правило, не менее двух испытаний. Зафиксированное число циклов характеризует динамическую прочность порошка (индекс по Фрайтестеру  $F_i$ ). Результаты корреляционного сопоставления показателей  $F_i$  и прочности на раздавливание зерен некоторых марок отечественных синтетических алмазов приведены в табл. 4.3 и на рис. 4.1.

**4.3. Диапазон изменения показателя прочности  $F_i$  порошков различных марок, установленного на приборе Freitester**

Марка алмаза	Показатель $F_i$	Зернистость порошка		
		400/315	315/250	250/200
AC50	$F_{i \min}$	22	35	45
	$F_{i \max}$	65	77	81
	$F_{i \text{ ср}}$	35	47	54
AC65	$F_{i \min}$	26	45	59
	$F_{i \max}$	48	76	97
	$F_{i \text{ ср}}$	39	58	73
AC80	$F_{i \min}$	31	44	63
	$F_{i \max}$	70	88	104
	$F_{i \text{ ср}}$	50	64	81

В некоторых случаях динамическую прочность порошка после одноразового ударного нагружения в приборе Freitester в течение постоянно заданного времени оценивают показателем, равным процентному содержанию зерен, сохранивших первоначальный размер.



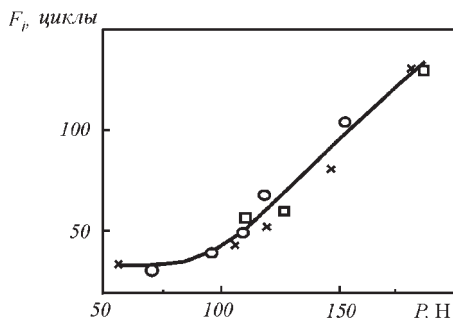


Рис. 4.1. Зависимость между показателем прочности  $F_i$ , полученным на приборах Freitester и ДА-2М, и нагрузкой  $P$ , разрушающей зерна шлифпорошка алмаза зернистостью 315/250:

○ — AC50; × — AC65; □ — AC80

**Определение примеси и влаги в алмазных шлиф-, микро- и субмикроро порошках.** Определение массовой доли растворимых примесей в навеске алмазного шлифпорошка производится путем его обработки концентрированной хлорной кислотой или «царской водкой» для удаления примесей металлов. Две навески контролируемого порошка массой  $m_1$  (по 5 г) кипятят в 57 %-ном растворе хлорной кислоты. Затем навески промывают водой, сушат и взвешивают для определения остаточной массы.

Массовую долю растворимых примесей  $\alpha$  в процентах вычисляют по формуле:

$$\alpha = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100 \%, \quad (4.4)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — соответственно масса порошка до и после испытания, г.

За результат определения массовой доли растворимых примесей в алмазных шлифпорошках принимают среднее арифметическое значение двух определений.

В алмазных микропорошках примеси определяют путем сжигания навески массой 0,2 г в муфельной печи при температуре 900 °С в течение 6 ч, а точнее, до установления постоянной массы. Алмазы при этом выгорают, а несгораемые примеси остаются.

Массовую долю этих примесей  $E$  в процентах вычисляют по формуле:

$$E = \frac{m_2 - m}{m_1 - m} 100 \%, \quad (4.5)$$

где  $m$  — масса тигля, г;  $m_1$  — масса тигля с навеской порошка, г;  $m_2$  — масса тигля с несгораемым остатком, г.

Результатом вычисления массовой доли несгораемых примесей в алмазных микропорошках является среднее арифметическое значение двух определений.

Массовую долю примесей в алмазных субмикропорошках определяют из сравнения спектров проб алмазных субмикропорошков и эталонов, выполняемого при помощи фотоэлектрической системы МФС-8.

Испытания заключаются в сравнении проб алмазных порошков (или порошков кубического нитрида бора) и заранее приготовленных на основе графита ОС4 эталонов с известным содержанием примесей. Полихроматором выделяют аналитические спектральные линии определяемых элементов. Затем происходит регистрация и автоматическая обработка сигналов, пропорциональных интенсивности этих линий, с помощью фотоэлектрических приемников излучения. В связи с различной структурой алмазных порошков или сBN и образцов с известным содержанием примесей, аналитические линии одного и того же элемента в их спектрах при одинаковом количестве имеют различную интенсивность. Для уменьшения влияния структурного различия проб и образцов с известным содержанием примесей их разбавляют графитовым порошком в соотношении 1:5.

Массовую долю каждого из определяемых элементов находят по градуировочному графику зависимости логарифма величины сигнала МФС-8, пропорционального интенсивности аналитической линии в спектрах испытуемых образцов с неизвестным содержанием примесей, от логарифма массовой доли элемента в соответствующем эталоне с известным содержанием примесей.

Массовую долю влаги в алмазных порошках определяют по разности масс навески порошка до и после его сушки. Навески шлиф- и микропорошка (массой по 5 г) или субмикропорошка (массой по 1 г) помещают в предварительно высушенные и взвешенные стаканчики с притертыми крышками, определяют массы стаканчиков с навеской порошка, высушивают их при температуре 100...110 °С в течение 1,5...2,0 ч до постоянной массы, охлаждают и снова определяют их массу.

Массовую долю влаги  $X$  в процентах определяют по формуле:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} 100 \%, \quad (4.6)$$

где  $m_1$  — масса стаканчика с порошком до нагревания, г;  $m_2$  — масса стаканчика с порошком после охлаждения, г;  $m$  — масса стаканчика.

Результатом определения массовой доли влаги в алмазных порошках является среднее арифметическое значение двух определений.

Для таких точных измерений массы навесок применяют аналитические весы (механические или электронные). Их характеристики приведены в табл. 4.4.

#### 4.4. Аналитические весы, применяемые для работы с алмазными порошками

Марка весов	Страна-изготовитель	Пределы измерений, г	Цена деления, мг
<i>Механические</i>			
ВЛА-220-М	Россия	0...200	0,1
АДВ-200-М			
ВЛР-200			
ОМД-1000		0...1	0,01
WP-11	Польша	0...10	0,1
<i>Электронные</i>			
«Меттлер» PC180	Германия	0...200	0,001
LAVAL LAB HF300	Канада	0...310	1,0
HM202		0...42	0,01

**Определение абразивной способности алмазных микропорошков и паст из субмикропорошков.** Абразивную способность алмазных микропорошков оценивают по отношению массы сошлифованного с корундового образца материала к массе израсходованного при этом микропорошка при заданном режиме испытания.

Для проведения испытаний применяют настольную установку УАС-2М, у которой по планшайбе карусельного типа, вращающейся со скоростью  $100 \text{ мин}^{-1}$ , перемещается блок с образцами из

корунда. Навеску алмазного микропорошка помещают на середину планшайбы, с помощью индустриального масла на планшайбе создается равномерный слой суспензии из микропорошков, осуществляющей абразивное воздействие на движущиеся корундовые образцы. Абразивную способность  $A$  в процентах алмазных микропорошков вычисляют по формуле:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m} 100 \%, \quad (4.7)$$

где  $m_1$  — масса блока с корундовыми образцами до испытания, г;  $m_2$  — масса блока с корундовыми образцами после испытания, г;  $m$  — масса навески контролируемого образца, г.

Абразивная способность паст из субмикропорошков определяется по скорости съема материала образцов из монокристаллического кремния при обработке пастами из алмазных субмикропорошков. Испытания выполняют на шлифовальном станке настольного типа. При помощи специальной головки и приспособлений закрепляют образцы кремния и полируют их по торцам. Скорость съема материала кремния  $V$  в микрометрах в минуту определяют по формуле:

$$V = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{tn}, \quad (4.8)$$

где  $H_1, H_2, \dots, H_n$  — высота слоя материала, снятого с каждого образца, мкм;  $t$  — время полирования, мин;  $n$  — количество образцов, шт.

**Определение коэффициента формы зерен.** Прочностные характеристики алмазного порошка связаны с содержанием в нем кристаллов различных кристаллографических форм. Однако методика определения содержания в порошке кристаллов разных форм субъективна и весьма трудоемка, поэтому применяется более простая и объективная методика определения изометричности зерен, которая оценивается коэффициентом формы зерен порошка. Форма зерен влияет на эксплуатационные свойства инструмента. Прочность зерен возрастает по мере увеличения коэффициента изометричности или по мере уменьшения коэффициента формы. Коэффициент формы алмазного зерна  $K_{ф.з}$  рассчитывают как отношение длины проекции зерна  $l$  к ширине проекции  $b$ .

Среднее арифметическое значение коэффициента формы не менее 50 зерен, полученных измерением их проекций на экране часового проектора определяется по формуле

$$K_{\text{ф.з}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n b_i}, \quad (4.9)$$

где  $l_i$  — длина проекции  $i$ -го зерна, мкм;  $b_i$  — ширина проекции  $i$ -го зерна, мкм;  $n$  — число измеренных зерен, шт.

### 4.1.2. Специальные характеристики

**Однородность шлифпорошков по прочности.** Реальный шлифпорошок состоит из зерен, по показателю прочности относящихся к различным маркам. Очевидно, его ценность возрастает по мере увеличения доли в нем зерен с прочностью, соответствующей номинальной нагрузке для данной марки алмаза. В шлифпорошке серийного производства содержание зерен с номинальной нагрузкой на зерно находится в пределах от 15 до 35 %.

Поэтому в качестве меры однородности порошка применяется коэффициент однородности порошка по прочности в процентах, определяемый по формуле

$$K_{\text{одн.пр}} = \beta_n + \beta_{n+1} + \beta_{n-1}, \quad (4.10)$$

где  $\beta_n$  — зерно номинальной марки;  $\beta_{n+1}$  и  $\beta_{n-1}$  — зерна двух смежных марок.

Коэффициент однородности порошка по прочности определяется следующим образом. Проводят испытания порошка определенной зернистости на прочность и получают протокол испытаний 50 или 100 зерен. Анализируя результаты, все значения прочности отдельных зерен распределяют по интервалам прочности, характеризующим прочность марки согласно ГОСТ 9206–80 и рассчитывают содержание в порошке зерен, относящихся к различным маркам  $\beta_r$ . Содержание зерен номинальной марки определяет технологическую характеристику однородности порошка по прочности  $K_{\text{одн.пр}}$ .

**Определение коэффициента термостойкости.** Алмазный инструмент на металлической связке изготавливается с использованием

порошков термостойкого алмаза, прочность которых в результате воздействия высоких температур, вызванных трением или разрушением обрабатываемого материала в контактной зоне, снижается незначительно. Алмаз, полученный с помощью различных режимов синтеза и выделенный отличающимися методами сортировки, по-разному сохраняет прочность после нагрева.

Поэтому для оценки характеристики термостойкости алмазного порошка применяется коэффициент термостойкости, который представляет собой отношение показателя прочности (статической или динамической) алмаза (см. формулу (4.3)) после термической обработки  $P_T$  к прочности этого же алмаза в исходном состоянии  $P_{и}$ :

$$K_{тс} = \frac{P_T}{P_{и}}. \quad (4.11)$$

Следовательно, коэффициент термостойкости количественно свидетельствует о доле сохранившейся прочности алмазов после термообработки и колеблется в пределах  $0 < K_{тс} < 1$ .

Сущность метода определения коэффициента термостойкости заключается в следующем. Пробу порошка алмаза подвергают термической обработке при температуре 1000 °С в течение 20 мин в нейтральной среде аргона. Затем определяют прочность порошков нетермообработанных  $P_{и}$  и после термообработки  $P_T$  и рассчитывают коэффициент термостойкости. В зависимости от коэффициента термостойкости алмазные шлифпорошки независимо от условий синтеза и применяемого сплава-растворителя относятся к соответствующей категории термостойкости (табл. 4.5).

#### 4.5. Соотношение коэффициентов и категории термостойкости

Категория термостойкости	Коэффициент термостойкости $K_{тс}$
ВТ (высокая)	1...0,8
СТ (средняя)	0,8...0,5
НТ (низкая)	0,5...0,3

**Определение удельного электрического сопротивления.** Алмазные порошки, используемые для инструмента, изготавливаемого элек-

трохимическим методом, должны удовлетворять требованиям по специальной технологической характеристике — удельному электросопротивлению, чтобы избежать образования дендритов при гальваническом наращивании зерен алмаза, нанесенных на рабочую поверхность инструментов.

Метод определения удельного электрического сопротивления  $\rho$  алмазного порошка основан на установлении зависимости между удельным электрическим сопротивлением навески порошка и экспериментально измеряемой величиной его электрического сопротивления  $R$  и определяется по формуле:

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad (4.12)$$

где  $R$  — электрическое сопротивление навески порошка, Ом;  $S$  — площадь пуансона, м<sup>2</sup>;  $l$  — высота слоя порошка, м.

Удельное электросопротивление навески (обычно 0,4 г) измеряют на установке, состоящей из гидравлического пресса (усилием до  $5 \cdot 10^4$  Н) с цилиндрической пресс-формой и тераомметра с пределами измерения  $10^2 \dots 10^{11}$  Ом.

**Определение удельной магнитной восприимчивости.** Эта характеристика является физической величиной, характеризующей способность вещества изменять свой магнитный момент под действием магнитного поля. В то же время в производстве синтетических алмазных порошков она выступает в качестве технологической характеристики алмазного порошка, свидетельствует об уровне внутрикристаллических включений в алмазе и их влиянии на термостойкость алмазов. Указанная характеристика может служить для экспресс-контроля металлических примесей в алмазах.

Удельную магнитную восприимчивость алмазов  $\chi$ , м<sup>3</sup>/кг, определяют по методу Фарадея, используя навеску 0,1...1,0 г. Навеска размещается в магнитном поле напряженностью  $H_m = 320$  кА/м, и характеристику рассчитывают по экспериментальной формуле:

$$\chi = \frac{F}{\mu_a m H_m dH_m/dz}, \quad (4.13)$$

где  $F$  — сила магнитного притяжения порошков алмаза, Н;  $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;  $\mu_a = \mu_0 \mu$ , где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  — магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu$  — магнитная проницаемость;

$m$  — масса измеряемой навески порошка, кг;  $H_m dH_m / dz$  — характеристика магнитного поля,  $A^2/m^3$ .

Электронное строение алмаза обеспечивает ему устойчивый диамагнетизм с величиной удельной магнитной восприимчивости  $0,62 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ . Все разнообразие магнитных свойств алмазных порошков связано с объемными дефектами структуры и присутствием включений сплава-растворителя (97...99 % всех компонентов включений). Это является основой магнитного неразрушающего метода определения количества включений в алмазах по измеряемой удельной магнитной восприимчивости. Вначале строится корреляционная зависимость между содержанием включений  $\beta_{\text{вк}}$  и удельной магнитной восприимчивостью  $\chi$ . Содержание включений определяют спектральным или нейтронно-активационным методом.

В общем виде зависимость имеет вид

$$\beta_{\text{вк}} = a + b\chi + c\chi^2, \quad (4.14)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — эмпирические коэффициенты.

**Определение коэффициента поверхностной активности.** Способ высокоселективной сортировки высокопрочных порошков алмаза по прочности основан на различиях в степени дефектности поверхности отдельных кристаллов. В связи с этим возникла актуальная необходимость оценивать дефектность поверхности зерен алмаза высокочувствительным надежным экспресс-методом.

Выявление и количественное измерение дефектности поверхности высокопрочных алмазных порошков с гладкой поверхностью путем определения величины удельной поверхности, измеряемой известными методами Дерягина и БЭТ, трудоемко и требует больших навесок алмаза.

На основе использования адсорбционных или адгезионных сил, действующих на поверхностях алмаза, предложен метод оценки поверхностей по массе закрепившихся на их дефектных участках тонкодисперсных ферромагнитных частиц [2].

Технологической характеристикой служит коэффициент поверхностной активности  $K_a$ , который равен отношению массы закрепившихся магнитных частиц  $m_{\text{ф}}$  к массе навески зерен алмаза  $m_a$ . Для повышения точности измерения  $K_a$  применяют магнитный метод, основанный на измерении удельных магнитных восприимчивостей исходного порошка алмаза  $\chi_{\text{и}}$  (до нанесения



магнитных частиц), порошка алмаза с нанесенными магнитными частицами  $\chi_n$  и ферромагнитного порошка  $\chi_\phi$ .

Коэффициент поверхностной активности  $K_a$  в процентах рассчитывают по формуле:

$$K_a = \frac{m_\phi}{m_a} 100\% = \frac{\chi_n - \chi_n}{\chi_\phi - \chi_n} 100\%. \quad (4.15)$$

Последовательность операций при определении коэффициента поверхностной активности  $K_a$  следующая. Для контролируемого алмазного порошка измеряют удельную магнитную восприимчивость  $\chi_n$ , затем на специальной установке наносят ферромагнитные частицы на поверхности алмазов и вновь измеряют удельную магнитную восприимчивость  $\chi_n$ . Кроме того, измеряют магнитную восприимчивость ферромагнитного порошка  $\chi_\phi$ . Используют обычно навеску порошка массой 0,1...1,0 г.

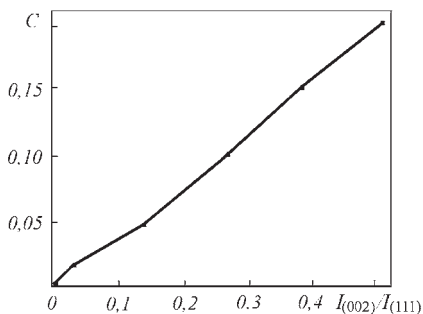
После всех измерений по вышеприведенной формуле определяют коэффициент поверхностной активности  $K_a$ .

## 4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК cBN-ПОРОШКОВ

Все технические характеристики порошков cBN (зернистость и зерновой состав, статическая прочность, массовая доля примесей и влаги, абразивная способность порошков) определяются теми же методами, что и алмазных порошков. Исключение составляет метод определения массовой доли гексагонального нитрида бора (hBN) в порошках, так как cBN-порошки не сгорают. Массовую долю hBN определяют рентгеновским методом или методом ИК-спектроскопии.

Рентгенографическое определение массовой доли hBN основано на зависимости интенсивности линий данного компонента от его доли в cBN. Определение массовой доли hBN сводится к определению отношения интегральной интенсивности ( $I_{002}$ ) линии (002) гексагонального нитрида бора к интегральной интенсивности ( $I_{111}$ ) линии (111) кубического нитрида бора — ( $I_{002}/I_{111}$ ) и нахождению соответствующего значения  $C$  (массовой доли hBN) на графике зависимости  $C = f(I_{002}/I_{111})$  (рис. 4.2).

Рис. 4.2. Зависимость массовой доли hBN от соотношения  $I_{002}/I_{111}$



На дифрактограммах, полученных на рентгеновских дифрактометрах типа ДРОН, путем планиметрирования определяют величины  $I_{002}$  и  $I_{111}$  в  $1 \text{ мм}^2$ . По измеренным значениям вычисляют  $I_{002}/I_{111}$  и, пользуясь графиком, определяют величины  $C$  для двух навесок. Результатом измерения является среднее арифметическое значение  $C_{\text{cp}} = (C_1 + C_2)/2$  двух параллельных определений  $C_1$  и  $C_2$ . Погрешность  $\Delta C$  рассчитывают по формуле:

$$\Delta C = \frac{\Delta C_1 + \Delta C_2}{2}, \quad (4.16)$$

где  $\Delta C_1 = C_1 - C_{\text{cp}}$  и  $\Delta C_2 = C_2 - C_{\text{cp}}$  — абсолютная погрешность каждого измерения.

Определение массовой доли hBN методом ИК-спектроскопии основано на различии колебательных спектров решеточного поглощения кубического и гексагонального нитрида бора в области волновых чисел  $\nu = 700 \dots 1700 \text{ см}^{-1}$ . Спектральные положения максимумов характеристических полос нитрида бора различных фаз по частоте существенно отличаются. На колебательных ИК-спектрах полоса решеточного резонанса сBN ( $1125 \text{ см}^{-1}$ ) расположена между полосами поглощения hBN ( $820$  и  $1380 \text{ см}^{-1}$ ). Высокие значения коэффициентов поглощения и слабое перекрытие полос hBN с полосой сBN позволяют использовать широко известную стандартную спектроскопическую методику КВг-таблеток для анализа сBN порошков на содержание в них примеси hBN. Исследуемые пробы порошков растираются в твердосплавной ступке и смешиваются при этом с оптически прозрачной солью КВг. Полученная смесь прессуется в вакуумной пресс-форме. Если навеска контролируемого материала

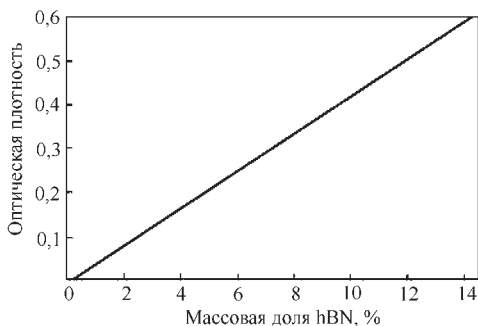


Рис. 4.3. Градуировочный график зависимости интенсивности максимума полосы поглощения при  $1380\text{ см}^{-1}$  от массовой доли гексагональной модификации нитрида бора в исследуемом порошке сBN

подобрана правильно и получена оптически прозрачная таблетка, в которой равномерно распределены частицы порошка, то полосы поглощения BN отчетливо проявляются на фоне пропускания KBr. Для более точного определения массовой доли hBN в сBN порошках целесообразно использовать в качестве аналитической полосы более интенсивную полосу поглощения hBN при  $\nu = 1380\text{ см}^{-1}$ . Массовую долю определяют по значению измеренной интенсивности этой полосы используя градуировочный график (рис. 4.3), который строится в соответствии с основным законом светопоглощения Бугера—Ламберта—Бера по результатам спектроскопических измерений эталонных образцов известного фазового состава.

Для построения представленного градуировочного графика использовали навески 0,5 мг эталонных смесей в 300 мг бромистого калия, соответственно аналогичной величины должна быть и навеска исследуемого порошка сBN.

### 4.3. КОРПУСА И ДЕРЖАВКИ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СТМ

К материалам, предназначенным для изготовления инструмента на основе СТМ, относятся не только монокристаллы и композиты из СТМ, но и стали для корпусов шлифовальных кругов, бурового инструмента и других державок, алюминий и его сплавы, различные пластики. Выбор марок алюминия и его сплавов, сталей и неметаллических материалов для изготовления корпусов и державок регламентируется исключительно ГОСТ и ТУ на инструменты. Для корпусов кругов могут быть применены алюминии-

вые сплавы марок АК6, Д16 по ГОСТ 4784–97 или марок АК7, АК5М2 по ГОСТ 1583–93. Стальные корпуса кругов изготавливают из сталей марки Ст3 по ГОСТ 380–2005 или сталей 20, 25, 30 по ГОСТ 1050–88. Алюминиевые сплавы и стали для изготовления корпусов шлифовальных кругов используют в состоянии поставки, входной контроль этих материалов на предприятиях, изготавливающих инструмент, как правило, не проводится. При необходимости химический состав алюминиевого сплава определяется по ГОСТ 12697.1–77 методами фотоколориметрии (фотометрии), полярографии и др. Для определения марки стали применяют оптический или флуоресцентный спектральные анализы.

Отрезные алмазные сегментные круги для резки горных пород в процессе эксплуатации испытывают большие динамические нагрузки. Поэтому для их корпусов используют высокопрочные стали марок 9ХФ, 9ХФМ или 7ХН2МФ. В ряде случаев допускается изготовление корпусов из стали 65Г по ГОСТ 1050–88. В процессе изготовления кругов контролируется твердость заготовок корпусов, которая должна находиться в интервале от 37 до 46 HRC, причем разность максимальной и минимальной величин показателя твердости в различных точках плоскости одного и того же корпуса не должна превышать 4 единиц. Для этих испытаний используется твердомер Роквелла и индентор с алмазным конусом.

Другие виды испытаний (определение предела текучести и предела прочности при растяжении, определение ударной вязкости на маятниковом копре) выполняются заводом-изготовителем материала и указываются в сертификате на продукцию. Определение этих характеристик на предприятиях, изготавливающих инструмент, при входном контроле нормативными документами не предусмотрено. Это же относится и к стали 20, предназначенной для изготовления корпусов коронок для геологического бурения, и к сталям 35ХГСА и 12ХНЗА, из которых изготавливают корпуса долот.

#### **4.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ (ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ) ИСПЫТАНИЯ СТМ**

Испытания монокристаллов, порошков и композитов СТМ с целью определения их физико-механических, технологических или эксплуатационных характеристик проводят в рамках научных

и прикладных исследований или для контроля качества материалов в условиях производства.

В первом случае области использования не регламентируются. Испытатель относительно свободен в выборе образцов, методов испытаний и средств измерений, руководствуясь, с одной стороны, метрологическими принципами, с другой — собственным опытом, инженерной интуицией. Здесь цель испытаний — установление новых свойств материалов и разработка самих методов испытаний.

Во втором случае, когда речь идет о контроле качества материала как изделия или продукта, поступающего в производственное либо потребительское обращение, имеют дело с регламентируемой областью испытаний образца. В этом случае процедура испытаний, включающая в себя выбор образца, метода испытаний и средства измерения, однозначно регламентируется соответствующими нормативными документами.

Регламентируемые области испытаний СТМ включают в себя три вида испытаний: прямо-сдаточные, периодические и сертификационные испытания. Общим для всех трех видов испытаний является то, что они имеют своей целью установление соответствия продукции требованиям того или иного нормативного документа.

#### **4.4.1. Прямо-сдаточные испытания**

Испытания СТМ проводят в рамках производства как необходимый этап контроля соответствия показателей качества продукции требованиям нормативной документации.

Прямо-сдаточные испытания шлифпорошков, микропорошков и поликристаллов синтетических алмазов проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 9206—80, кубического нитрида бора — в соответствии с требованиями технических условий производителя.

Основные особенности приемочного контроля:

- испытания тесно связаны с производственным циклом;
- проверке подлежат, как правило, образцы-свидетели от каждой партии СТМ;
- несоответствие продукции более чем по одному показателю не допускается, т.е. партия бракуется. В случае несоответствия по

одному показателю повторяют испытания на удвоенном количестве проб и при неудовлетворительном результате партия бракуется;

— результаты приемо-сдаточных испытаний оформляют протоколами, которые хранят в отделе (группе) технического контроля предприятия.

Требования к образцам и перечень проверяемых показателей определяются соответствующими нормативными документами. Так, для алмазных порошков максимальная величина партии, предъявляемой к приемке, составляет обычно не более 150 000 карат (шлифпорошки) и 50 000 карат (микророшки).

Контролю и испытаниям подлежат такие показатели, как зернистость, зерновой состав, статическая и динамическая прочность, массовые доли примесей и влаги, абразивная способность микророшков, ресурс буровой коронки (для поликристаллов АРСЗ), скорость съема материала (для субмикророшков).

Для порошков cBN при приемо-сдаточных испытаниях контролируются зернистость, зерновой состав, показатель прочности при статическом сжатии, абразивная способность микророшков, массовые доли примесей гексагонального нитрида бора, металлов и влаги.

Процедуры отбора проб для приемо-сдаточных испытаний детально описаны в нормативных документах ГОСТ 9206–80.

Как правило, испытывают пробы каждой зернистости, каждой партии. Масса пробы должна быть для шлифпорошка не менее 20 г, для микророшка — 10 г, для субмикророшка — 8 г. Одна половина пробы используется для контроля, другая опечатывается во флаконе и хранится 12 месяцев.

Методы контроля показателей при приемо-сдаточных испытаниях описаны в приложениях к нормативным документам и должны неукоснительно выполняться.

#### 4.4.2. Периодические испытания

Этот вид испытаний не включен в производственный цикл и проводится у потребителя или в аттестованной (аккредитованной) лаборатории (в область аккредитации которой входят периодические испытания). Периодичность устанавливается соответствующим нормативным документом. Для алмазных порошков эти

испытания проводят не реже одного раза в год на соответствие марке, показателю динамической прочности и коэффициенту формы зерен.

Для алмазных паст периодические испытания проводят не реже одного раза в 6 месяцев, для порошков сBN — один раз в год выборочно для двух зернистостей шлифпорошков и микропорошков по показателям массовых долей примесей гексагонального нитрида бора и металлов в кубическом нитриде бора.

Результаты периодических испытаний во всех случаях оформляют протоколами, хранящимися в отделе технического контроля и в лаборатории, которая проводила испытания.

#### **4.4.3. Сертификационные испытания**

Особенностью этого вида испытаний является то, что они должны проводиться так называемой третьей стороной, т.е. стороной, не зависимой от производителя, поставщика и потребителя продукции.

Целью этих испытаний является контроль соответствия показателей продукции, декларируемых заявителем (производитель, поставщик либо потребитель), требованиям нормативного документа. Сертификационные испытания на соответствие техническому заданию, чертежу, стандарту предприятия-потребителя не проводятся.

Процедура подтверждения соответствия характеристики изделия третьей стороной называется сертификацией. Эта процедура осуществляется органом по сертификации на основании протоколов сертификационных испытаний, которые были проведены в аккредитованной испытательной лаборатории.

Результаты сертификационных испытаний оформляют протоколами, копии которых вместе с образцами, отобранными в соответствии с установленной процедурой, хранят в испытательной лаборатории. Протоколы также передают в орган по сертификации, который выдает заявителю сертификат соответствия на изделия данной партии либо выпускаемые серийно.

Таким образом, сертификационные испытания подтверждают соответствие продукции требованиям нормативных документов, удостоверяемое сертификатом соответствия.

Как правило, нормативные документы на продукцию содержат указание о своей пригодности для целей сертификации. ГОСТ 9206–80 имеет такое указание в первом разделе «Область применения».

С внедрением на предприятии систем оценки качества по стандартам ИСО серии 9000 объемы сертификационных испытаний снижаются. Преобладают приемо-сдаточные испытания, т.е. система внутреннего контроля за стабильностью производства, регламентируемая стандартами ИСО. Основное значение приобретет так называемое декларирование производителя о качестве выпускаемой им продукции.



## Глава 5

### ВИДЫ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СТМ

#### 5.1. ИНСТРУМЕНТЫ С РАБОЧЕЙ ЧАСТЮ ИЗ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛА СТМ

Рабочую часть резцов, выглаживателей, стеклорезов, наконечников изготавливают из заостренного монокристалла или поликристалла СТМ (рис. 5.1, 5.2). Рабочий элемент из СТМ может закрепляться в инструменте, как пайкой, так и механическим зажимом.

*Алмазные сверло, зенкер, развертка* — осевые инструменты, режущие части которых изготовлены из алмазного кристалла.

*Алмазная пластина* — инструмент в виде пластины из монокристалла или поликристалла алмаза с определенной ориентацией по вектору наибольшей твердости, который определяется кристаллографически.

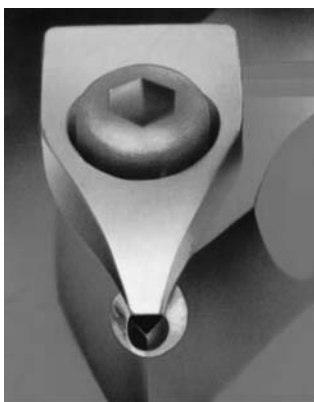


Рис. 5.1. Резец, оснащенный монокристаллом СТМ

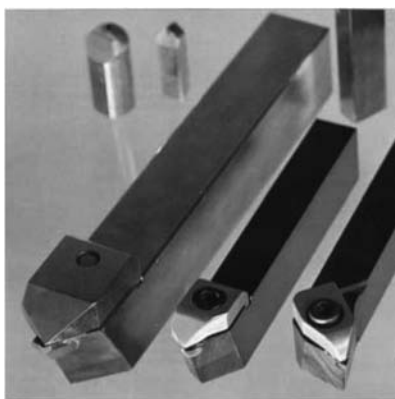


Рис. 5.2. Резцы, оснащенные вставками из поликристаллических СТМ

**Алмаз в оправе** — инструмент в виде стержня, на торце которого закреплен монокристалл алмаза с определенной кристаллографической ориентацией по отношению к оси инструмента.

**Наконечник** — инструмент, рабочей частью которого является монокристалл или поликристалл алмаза в виде цилиндра, пирамиды или конуса.

**Волока** (рис. 5.3) — инструмент, рабочей частью которого является внутренняя поверхность канала определенной формы в монокристалле или поликристалле СТМ.

**Алмазная игла** — инструмент в виде стержня, на котором закреплен тонко заостренный монокристалл алмаза определенной формы.

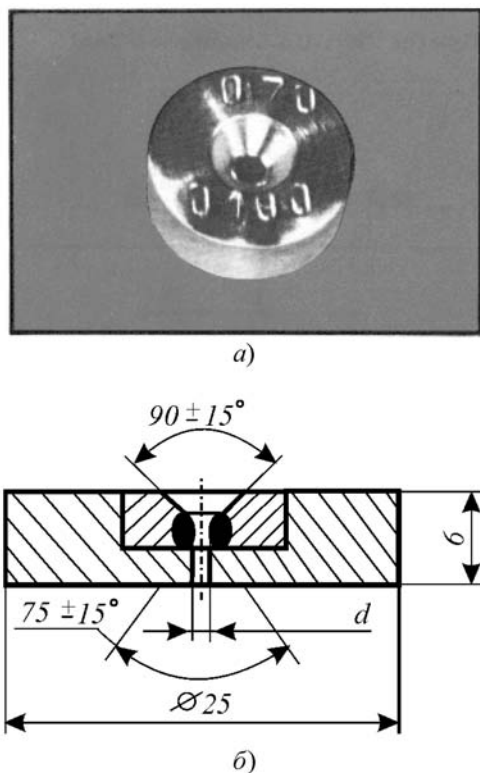


Рис. 5.3. Общий вид (а) и схема (б) волокна из ПСТМ

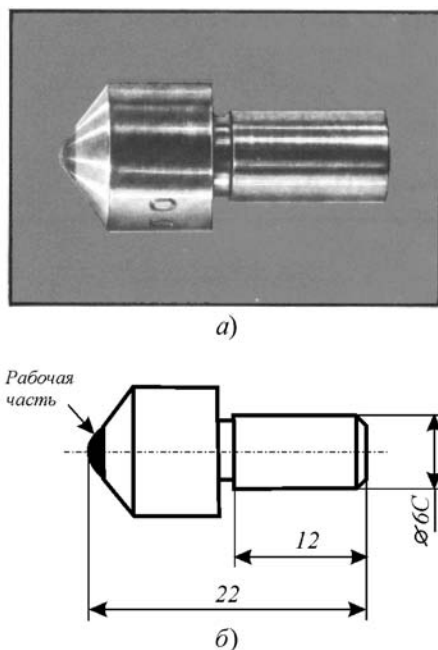


Рис. 5.4. Общий вид (а) и схема (б) алмазного выглаживателя

**Алмазный стеклорез** — инструмент, представляющий собой резец с линейной режущей острой алмазной кромкой определенной формы для резки стекла.

**Алмазный компенсатор** — инструмент, рабочей частью которого является монокристалл или поликристалл алмаза, имеющий плоскую рабочую поверхность, предназначенный для компенсации частичного неравномерного износа шлифовальных кругов из абразивов, корунда, карбокорунда и др.

**Выглаживатель** (рис. 5.4) — инструмент, рабочей частью которого является монокристалл или поликристалл СТМ сферической, цилиндрической или близкой к ним формы, закрепленный в державке и предназначенный для сглаживания неровностей поверхности изделий и поверхностной упрочняющей обработки.

**Сменная многогранная неперетачиваемая пластина** — рабочий элемент лезвийного инструмента, форма и размеры которого соответствуют стандарту ISO 1832–2004.

## 5.2. ИНСТРУМЕНТЫ С РАБОЧЕЙ ЧАСТЬЮ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОШКИ СТМ

У таких инструментов рабочая часть состоит из композита на основе порошков СТМ с использованием различных связок — металлических, керамических, органических и др. (рис. 5.5). Основные виды абразивных инструментов из СТМ: шлифовальные круги, отрезные круги со сплошной кромкой, сегментные отрезные круги, барабаны, сверла, надфили, правящие инструменты в виде роликов, карандашей, гребенок, пластин и др.

**Шлифовальный круг** — абразивный инструмент в виде тела вращения (рис. 5.6).

**Алмазный отрезной круг** — инструмент с алмазоносным слоем в виде кольца, предназначенный для резки материалов.

**Алмазный отрезной круг с наружной режущей кромкой** — инструмент с алмазоносным слоем, расположенным на наружной кольцевой поверхности корпуса.



Рис. 5.5. Абразивные инструменты из СТМ



Рис. 5.6. Шлифовальные круги из СТМ формы 11V9 на органической связке

*Алмазный отрезной круг с внутренней режущей кромкой* — инструмент с алмазонасным слоем, расположенным на внутренней кольцевой поверхности отверстия в корпусе.

*Алмазный сегментный круг* (рис. 5.7) — инструмент с наружным алмазонасным слоем на корпусе, рабочая часть которого включает в себя ряд алмазных сегментов.

*Алмазная полосовая пила* — инструмент в виде узкой металлической полосы, на одной из кромок которой закреплен ряд алмазных прямоугольных сегментов.

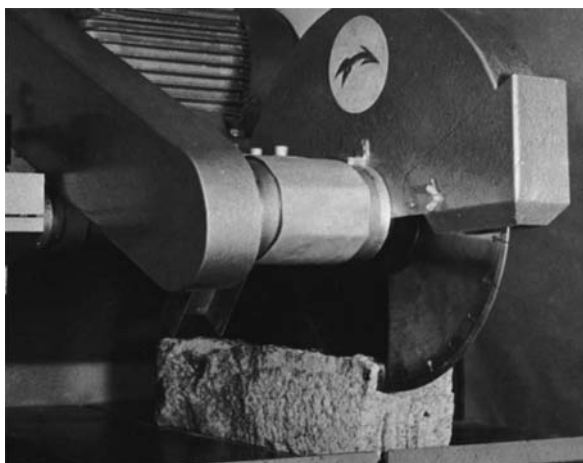


Рис. 5.7. Алмазный сегментный круг в работе



Рис. 5.8. Алмазные надфили и головки

**Алмазная головка** (рис. 5.8) — инструмент, включающий в себя корпус с установочным хвостовиком.

**Алмазный сегмент** — брусок (часть кольца) из алмазонасного композита.

**Алмазная гильза** — инструмент в виде полого цилиндра, на внутреннюю поверхность которого нанесен алмазонасный слой; предназначен для обработки поршневых колец по наружной поверхности.

**Алмазный барабан** — инструмент, состоящий из цилиндрического корпуса, на наружную поверхность которого нанесен алмазонасный слой.

**Алмазное сверло** — инструмент в виде цилиндрического стержня для сверления отверстий в стекле, керамике, стройматериалах. Применяют цельные сверла и трубчатые алмазные коронки.

**Бесконечная пила** — инструмент в виде гибкой металлической ленты с замкнутым контуром, рабочая часть которого оснащена алмазными режущими элементами.

**Канатная пила** — инструмент в виде стального каната с закрепленными на нем алмазными цилиндрическими элементами.

**Алмазный брусок** — инструмент, форма которого образована комбинацией плоских или фасонных поверхностей с прямолинейными образующими, имеющий алмазонаносный слой на одной или нескольких поверхностях.

**Алмазный хонинговальный брусок** — инструмент в виде прямоугольного бруска, применяемый для хонингования, ручной обработки и притирки отверстий в изделиях. Изготавливаются хонинговальные бруски на различных связках в виде блок-брусков, разделяющихся на отдельные элементы при оснащении головок; суперфинишных брусков; ручных брусков и надфилей.

**Алмазный блок-брусок** — инструмент, включающий в себя совокупность алмазных брусков, конструктивно объединенных между собой.

**Притир** — инструмент, форма и размеры рабочей части которого совпадают с заданными формой и размерами обрабатываемой поверхности.

**Зубчатый хон** — инструмент, имеющий форму зубчатого колеса.

**Алмазная проволока** — абразивный инструмент в виде проволоки, на поверхность которой нанесен алмазонаносный слой.

**Шлифовальная шкурка** — инструмент, состоящий из матерчатой или бумажной подложки с нанесенным рабочим слоем из порошков СТМ.

**Шлифовальная лента** — инструмент в виде шлифовальной шкурки прямоугольной формы с нанесенным рабочим слоем из порошков СТМ.

**Бесконечная шлифовальная лента** — инструмент в виде замкнутого контура шлифовальной ленты.

**Алмазный эластичный инструмент** — инструмент, рабочая часть которого под действием нагрузки принимает форму обрабатываемой поверхности, а после снятия нагрузки возвращается в первоначальное состояние.

**Алмазный надфиль** — инструмент в виде металлического стержня, на рабочей поверхности которого закреплен алмазонаносный слой (см. рис. 5.8).

**Алмазный расширитель** — инструмент в виде металлического корпусного стержня, рабочая поверхность которого состоит из сплошного или прерывистого алмазонаносного слоя.

**Алмазный правящий инструмент** — инструмент фасонной или цилиндрической формы, применяемый для правки шлифовальных кругов из обычных абразивов (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Алмазные правящие ролики

**Ролик** (см. рис. 5.9) — правящий инструмент, рабочая часть которого имеет форму тела вращения.

**Карандаш** — правящий инструмент в виде стержня, на торце которого закреплен алмазный элемент.

**Гребенка** — правящий инструмент с режущей частью прямоугольной формы, на которой расположены один или несколько монокристаллов или поликристаллов алмаза.

**Алмазосодержащий прокат** — инструмент в виде прямоугольных пластин, из которых вырезают необходимые рабочие элементы — ленты и кольца для шлифовальных кругов, используемых для заточки мелкогабаритного твердосплавного инструмента, для резки заготовок из твердых сплавов и неметаллических материалов. Из проката изготавливают сферические грибы и чашки для снятия фасок на полупроводниковых элементах радиоэлектроники, а также цилиндрические притиры для доводки отверстий в деталях топливной аппаратуры и другие инструменты.

### 5.3. АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ С АГРЕГАТАМИ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТМ

Данные абразивные инструменты характеризуются наличием рабочего слоя, включающего агрегаты зерен алмаза или зерен дроб-





а)

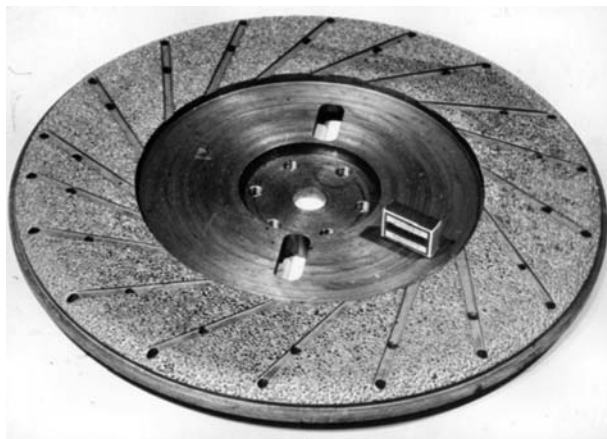


б)

Рис. 5.10. Однослойные абразивные инструменты форм:

а — 1А1; б — 6А2; в — 12А2-SS

ленных ПСТМ на основе сVN зернистостью 1250/1000, закрепленных при помощи адгезионно-активной металлической связки.



в)

**Рис. 5.10. Окончание**

Такие инструменты являются гибридными, представляющими собой комбинацию «круг—фреза», так как они сочетают функции абразивно-лезвийного инструмента и предназначены для высокопродуктивной обработки деталей из чугуна и цветных металлов. Инструменты обеспечивают обработку как торцом, так и периферией рабочего слоя (рис. 5.10).

## Глава 6

### ЛЕЗВИЙНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СТМ

#### 6.1. ВИДЫ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ СТМ

В соответствии с принятыми представлениями под лезвийным инструментом понимается режущий инструмент с заданным числом лезвий установленной формы. Виды лезвийных инструментов по ГОСТ 25751–83 представлены в табл. 6.1.

##### 6.1. Виды лезвийных инструментов

Термин	Определение
Резец	Однолезвийный инструмент для обработки с поступательным или вращательным главным движением резания и возможностью движения подачи в любом направлении
Фреза	Лезвийный инструмент для обработки с вращательным главным движением резания без возможности изменения радиуса траектории этого движения и хотя бы с одним движением подачи, направление которого не совпадает с осью вращения
Осевой режущий инструмент	Лезвийный инструмент для обработки с вращательным главным движением резания и движением подачи вдоль оси главного движения резания
Сверло	Осевой режущий инструмент для образования отверстий в сплошном материале и (или) увеличения диаметра имеющегося отверстия
Зенкер	Осевой режущий инструмент для повышения точности формы отверстия и увеличения его диаметра
Развертка	Осевой режущий инструмент для повышения точности формы и размеров отверстия и снижения шероховатости поверхности

Окончание табл. 6.1

Термин	Определение
Зенковка	Осевой многолезвийный режущий инструмент для обработки конического входного участка отверстия
Цековка	Осевой многолезвийный режущий инструмент для обработки цилиндрического и (или) торцевого участка отверстия заготовки
Метчик	Осевой многолезвийный режущий инструмент для образования и обработки внутренней резьбы
Плашка	Осевой многолезвийный режущий инструмент для образования и обработки наружной резьбы
Протяжка	Многолезвийный режущий инструмент с рядом последовательно выступающих одно над другим лезвий в направлении, перпендикулярном к направлению скорости главного движения, предназначенный для обработки при поступательном или вращательном главном движении резания и отсутствии движения подачи

Работоспособность и надежность режущих инструментов зависят от стабильности и физико-механических свойств материалов режущих пластин — монокристаллов СТМ и поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ), конструктивных форм режущей части, способа ее крепления в корпусе инструмента. Используются резцы из монокристаллов алмаза, поликристаллов из алмазных порошков и cBN, спеченных при высоких давлениях, из вольфрамсодержащих твердых сплавов с покрытием в виде тонких алмазных или алмазоподобных пленок. Конструкция инструмента в каждом конкретном случае определяется требованиями, предъявляемыми к его эксплуатации.

### 6.1.1. Крепление режущих элементов в корпусе инструмента

Опыт эксплуатации позволяет сформулировать следующие требования к методу закрепления элементов из СТМ в державке инструмента. Он должен обеспечивать прочность, жесткость и надежность закрепления, возможность быстрой сборки, разборки,

взаимозаменяемости инструмента, минимальный нагрев поликристалла при изготовлении режущего элемента, простоту эксплуатации инструмента.

Лезвийные инструменты из СТМ делятся по типу закрепления режущего элемента на две основные группы — сборные (с механическим креплением непосредственно в державке инструмента, а также с механическим или неразъемным креплением в режущей вставке, закрепляемой в державке инструмента) и цельные (с неразъемным креплением режущих элементов из СТМ непосредственно в державке инструмента).

Инструменты с механическим креплением пластин и сменных вставок из ПСТМ и режущих элементов из монокристаллов алмаза имеют ряд преимуществ по сравнению с инструментами второй группы. К ним относятся: возможность быстрой смены изношенной режущей кромки, многократное использование корпуса инструмента, повышенная надежность крепления режущих элементов инструмента. К инструментам из СТМ второй группы предъявляются менее жесткие требования к изготовлению посадочных мест под заготовки поликристаллов. С помощью такого закрепления можно получить инструмент, габаритные размеры которого меньше по сравнению с размерами инструментов первой группы.

Выбор типа закрепления поликристалла в корпусе инструмента проводится с учетом конкретных условий его эксплуатации.

При изготовлении инструментов применяются механические, высоко- и низкотемпературные методы крепления режущих элементов из СТМ (рис. 6.1) [12].

К механическим методам относятся: крепление пластин непосредственно в державке, зачеканка поликристаллов в державке, запрессовка в отверстие державки или в порошковую композицию. Два последних метода не получили достаточно широкого распространения вследствие трудностей, возникающих при переточке режущих элементов.

Из высокотемпературных методов крепления режущих элементов из СТМ широкое распространение получил метод порошковой металлургии, который используется для закрепления поликристаллов во вставках, в свою очередь механически закрепляемых в корпусах резцов, фрез и других инструментов.



Рис. 6.1. Методы крепления режущих элементов из СТМ

Метод заключается в том, что элементы из СТМ прессуют в брикеты вместе с порошками металлов, после чего прессованная заготовка подвергается термообработке с заполнением пористой основы расплавленным металлом. Из полученного прочного материала производят переходные вставки к режущему инструменту. Применяют также методы заливки режущих элементов из СТМ жидким металлом в закрытом пазу инструмента, а также методы объемно-пластического деформирования.

В связи с высокой химической инертностью алмаза, для его соединения с металлами используют специальные адгезионно-активные припои. В их состав входят металлы с высоким сродством к углероду (Cr, Ti, Nb, Zr, Ta, Mo, W), образующие с ним термодинамически прочные соединения. Обычно этими металлами легируют (до 5...10 %) менее тугоплавкие и более пластичные сплавы на основе Cu, Ag, Zn, бронзы. Малых добавок адгезионно-активных металлов к таким расплавам достаточно для увеличения степени смачивания алмаза.

Применение адгезионно-активных припоев и способов адгезионно-активной пайки позволяет получить прочность на разрыв паяного контакта алмаз—металл до 350 ГПа.

Припои, применяемые для пайки СТМ, условно делят на две группы [19]. К первой группе относятся припои, в состав которых входят компоненты, химически не взаимодействующие с СТМ и не образующие адгезионных связей с поверхностями алмаза и cBN (сплавы на основе меди, алюминия, цинка и др.). В этом случае для реализации адгезионного взаимодействия используют металлическое напыление, тонкая пленка которого способствует образованию прочного соединения с припоем. Ко второй группе относят припои, обладающие химическим сродством к углероду и cBN и образующие с ними прочные адгезионные связи. Наиболее часто используют Ti, Cr, Zr. Пайка адгезионно-активными припоями проводится в вакууме  $(1...5)10^{-3}$  Па.

К числу адгезионно-активных припоев относится припой на основе эвтектического сплава Cu—Ag с добавкой Ti. Экспериментально установлено, что предел прочности на сдвиг для паяных соединений кубический (сфалеритный) нитрид бора cBN—металл и вюртцитный нитрид бора wBN—металл достигает величин соответственно 152...194 МПа и 153...177 МПа (при 1123 К).

Пайка неметаллизированных ПСТМ серебряным (ПСр 40, ПСр 45) или бессеребряным припоем с температурой плавления 600...700 °С проводится в вакуумных печах или на установках ТВЧ. Для обеспечения стабильности свойств и прочности спая необходимо строгое соблюдение температурных режимов пайки и охлаждения. Недостаток таких инструментов состоит в том, что невозможно осуществить переточку инструмента без нагрева для извлечения поликристалла из державки, а при этом высока вероятность возникновения трещин при повторной зачеканке или вторичном нагреве элементов из ПСТМ во время его пайки в державку после переточки.

Пайку в открытый паз державки проводят после металлизации поликристаллов. Это повышает прочность крепления, сокращает трудоемкость изготовления и извлечения элемента из ПСТМ при переточке инструмента. Различают следующие способы металлизации поликристаллов: вакуумный (нанесение металлических покрытий из газовой фазы), химический (из газовой фазы при совместном нагреве ПСТМ и металла), электрохимический (осаждение ионов из раствора соли осаждаемого металла с добавкой различных компонентов), из жидкой фазы (смачивание поликристаллов сплавами с адгезионно-активными компонентами путем адсорбции на контактной поверхности промежуточного слоя металла), из растворов и расплавов солей (в основном комбинированными стеклянно-металлическими покрытиями), вжиганием (прямым нанесением металлических порошков), распылением при нагреве (испарение металлов с помощью электронно-лучевого нагрева).

К преимуществам пайки относятся простота конструкции инструмента и возможность получения резцов малых размеров, к недостаткам — нагрев поликристаллов до высокой температуры и возникновение в них при охлаждении внутренних термических остаточных напряжений, снижающих стойкость инструмента.

Недостаточно высокая теплостойкость ПСТМ, особенно из алмазных порошков, определяет необходимость создания методов закрепления поликристаллов, при которых температура на границе поликристалл–державка не превышает 750 °С.

Таким требованиям отвечают способы закрепления элементов из СТМ в державке приклеиванием термостойкими клеями повышенной прочности или припеканием под некоторым давлением с



использованием самотвердеющих композиций на основе низкоплавких металлов.

Для склеивания ПСТМ и державки применяют высокотемпературные клеи теплостойкостью до 1000...1200 °С на основе кремнийорганических соединений. Для инструмента, предназначенного для работы на чистовых и получистовых режимах, используют специализированные клеи ТКМ-75 и ТКС.

Клеевые соединения удовлетворительно работают на сжатие и растяжение (предел прочности при растяжении клеевых соединений составляет 15...30 МПа). Однако они имеют низкую прочность при неравномерном отрыве.

Универсальная технология изготовления инструмента из поликристаллов на основе алмаза и кубического нитрида бора отсутствует, поэтому ее выбор должен проводиться в зависимости от конструкции и условий работы инструмента.

### 6.1.2. Режущие пластины и вставки из СТМ

Основным направлением совершенствования конструкций лезвийного инструмента из ПСТМ является использование неперетачиваемых пластин.

Заготовки пластин из ПСТМ выпускают в двух исполнениях: цельные (без подложки) и двухслойные (с подложкой, как правило, твердосплавной). Из них производят круглые и многогранные режущие пластины. Если конструкция инструмента с механическим креплением пластин технически неосуществима, то применяют паяный инструмент из ПСТМ, оснащенный сменными вставками, или цельный. Наличие подложки позволяет повысить прочность режущих элементов, уменьшить толщину слоя ПСТМ, осуществлять пайку пластины непосредственно к корпусу режущего инструмента.

На рис. 6.2 показана система условных обозначений режущих пластин из ПСТМ, разработанная на основе стандарта ISO 1832–2004.

При обозначении режущей пластины из ПСТМ указывают форму, задний угол, класс точности пластины, тип пластины, длину режущей кромки  $L$ , толщину пластины  $S$  и радиус  $R$  при вершине пластины, а также исполнение пластины и марку ПСТМ. Различают четыре исполнения режущих пластин: цельные ( $M$ ),

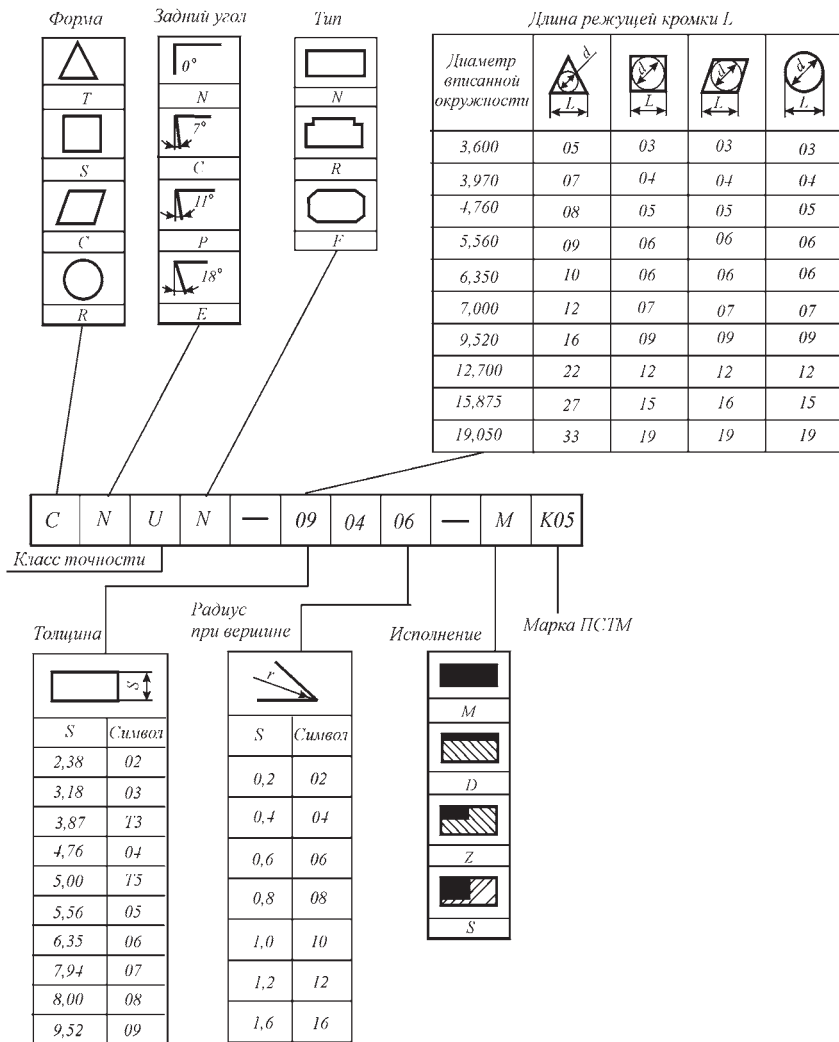


Рис. 6.2. Система условных обозначений пластин из СТМ

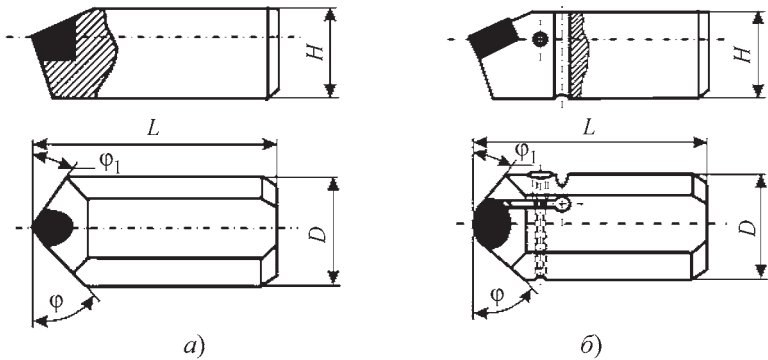
двухслойные (D), составные с монокристаллическим (Z) и двухслойным (S) поликристаллами.

Пример условного обозначения цельной пластины из композита 05 (K05) ромбической формы, без заднего угла, нормальной точности,

без стружколомающих канавок, с длиной режущей кромки 9 мм, толщиной 4,76 мм и радиусом при вершине 0,6 мм: CNUN 090406-МК05.

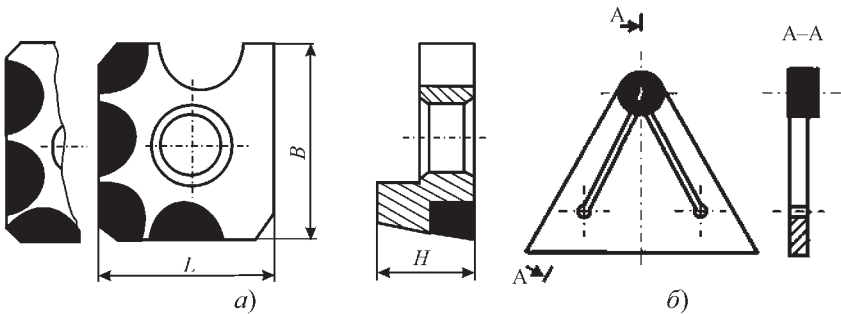
Сменные вставки, оснащенные режущими элементами из СТМ, предназначены для закрепления в корпусах сборного лезвийного инструмента, борштангах. Некоторые конструкции вставок показаны на рис. 6.3.

Цилиндрические вставки предназначены для проходных, специальных, фасочных, резьбовых резцов и торцовых фрез. Прямоуголь-



**Рис. 6.3. Цилиндрические сменные вставки, оснащенные СТМ:**

*a* — паяная; *б* — с механическим креплением режущего элемента;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  — углы в плане, главный и вспомогательный соответственно



**Рис. 6.4. Ножи, оснащенные СТМ:**

*a* — паяные многокристалльные; *б* — с механическим креплением режущего элемента

ные вставки выпускаются для крепления в борштангах и оправках для станков. Изготавливаются также проходные вставки с резбвым отверстием, плоские вставки с отверстием, вставки-ножи, вставки-резцы к комбинированному расточному инструменту, работающему в условиях гибкого автоматизированного производства.

К особой группе сменных вставок, оснащенных ПСТМ, относятся ножи (рис. 6.4). Различают ножи для оснащения концевых фрез и проходных резцов, комбинированных инструментов типа «сверло—сверло», «сверло—зенкер» и др.

### 6.1.3. Резцы с режущими элементами из СТМ

Наиболее распространенным видом режущего инструмента, оснащенного СТМ, являются резцы. Они используются для наружного точения, растачивания и различных специальных операций (прорезание канавок, резбонарезание и т. п.). На рис. 6.5 показана схема условных обозначений токарных резцов, разработанная на основе стандарта ISO 5608.

При обозначении резцов для наружного точения, оснащенных ПСТМ, указывают: способ крепления режущего элемента, форму пластин, главный угол в плане, задний угол, тип резца, высоту и ширину державки, общую длину резца и длину режущей кромки.

Различают следующие способы крепления режущих элементов из ПСТМ: крепление пластин прихватом сверху (способ *C*), крепление режущих элементов через центральное отверстие (способ *P*), через отверстие и прихватом (способ *M*), центральным винтом (способ *S*), крепление режущих элементов без отверстия по боковым поверхностям (способ *D*), крепление режущих элементов неразъемными методами (способ *B*).

Условное обозначение резца для точения CSBNR 2525-M10 расшифровывается следующим образом: способ крепления — прихватом сверху; форма пластины — квадратная; главный угол в плане — 75°; пластина без заднего угла; тип резца — правый проходной; сечение державки — 25×25 мм; длина резца — 150 мм; длина режущей кромки — 10 мм.

Для расточных резцов порядок условных обозначении несколько изменяется: тип державки, диаметр державки, длина резца, спо-

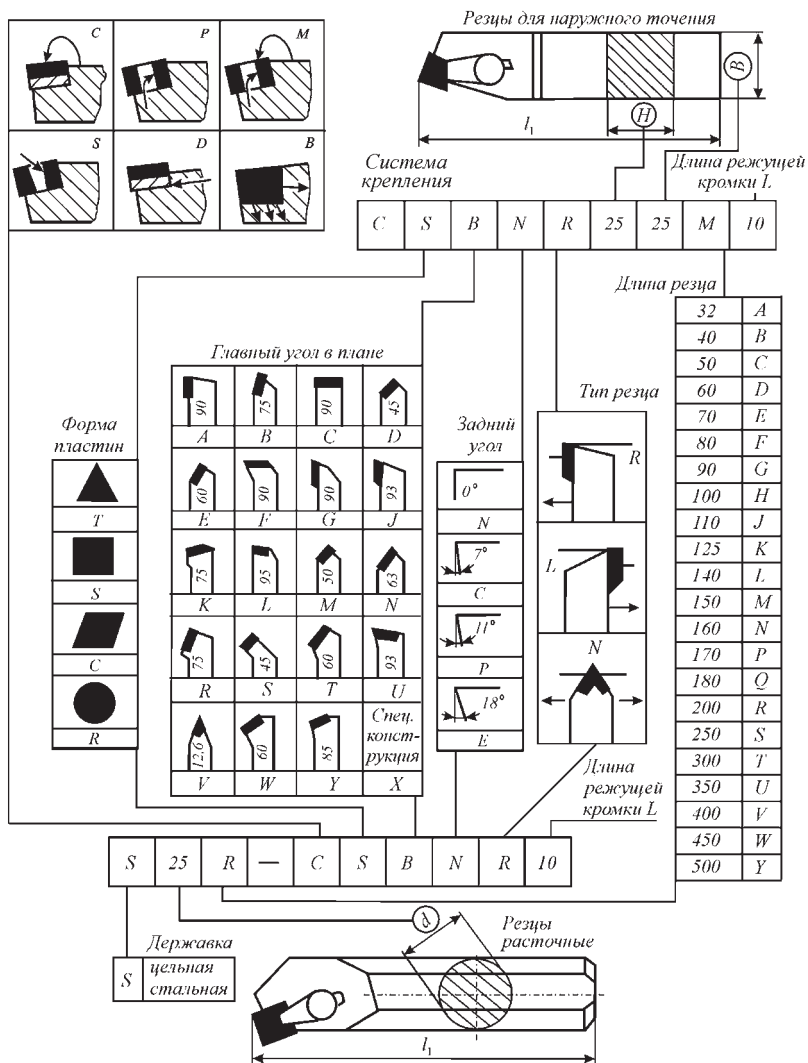


Рис. 6.5. Система условных обозначений резцов из СТМ

соб крепленая режущего элемента, форма пластин, главный угол в плане, задний угол режущего элемента, тип реза, длина режущей кромки.

Условное обозначение резца S25R — CSBNR10 читается так: тип державки — цельная стальная; диаметр державки — 25 мм; длина резца — 200 мм; способ крепления — прихватом сверху; форма пластины — квадратная; главный угол в плане —  $75^\circ$ ; пластина без заднего угла; тип резца — правый проходной; длина режущей кромки — 10 мм.

Выпускают цельные резцы, резцы с механическим креплением сменных вставок и режущих пластин из ПСТМ. По числу поликристаллов, образующих режущую кромку, резцы делят на однокристалльные и многокристалльные.

Напайные резцы из ПСТМ (рис. 6.6) можно разделить на группы по следующим признакам:

- по типу державки — прямые и отогнутые, прямоугольного и круглого сечения;
- по назначению — проходные, проходные упорные, подрезные, расточные, галтельные, канавочные, для резки и скрайбирования.

Серийно выпускаются резцы из ПСТМ для резки пластин из полупроводниковых материалов, ситалла и стекла, резцов для скрайбирования этих материалов.

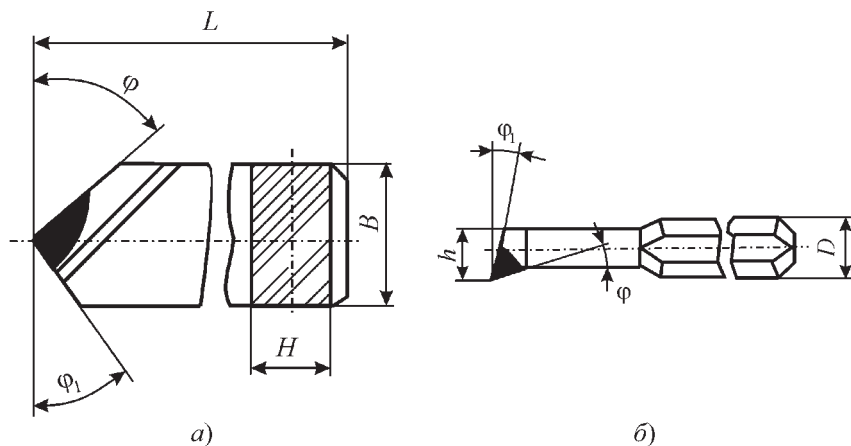


Рис. 6.6. Прямой (а) и расточной (б) напайные резцы, оснащенные режущими элементами из СТМ:

$\varphi$  и  $\varphi_1$  — углы в плане, главный и вспомогательный соответственно

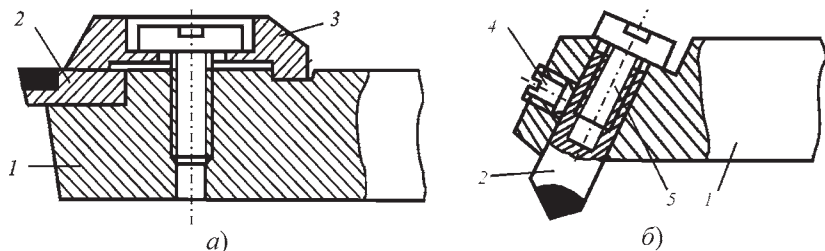


Рис. 6.7. Резцы с механическим креплением вставок из СТМ прихватом сверху (а) и по боковой поверхности (б)

Резцы с механическим креплением сменных вставок из ПСТМ (рис. 6.7) делятся на резцы с креплением вставок прихватом сверху (способ *C*) и по боковой поверхности (способ *D*). Сменная вставка из ПСТМ 2 устанавливается в державке 1 и крепится прихватом 3 или при помощи винта 4. Прихват 3 контактирует непосредственно с державкой или через промежуточную опору. Установка вылета вставки может осуществляться регулировочным винтом 5. Сменные вставки 2 могут крепиться также при помощи цангового зажима, закрепляемого в корпусе резца.

К этой же группе инструментов с режущими элементами из ПСТМ относятся резцы системы Cut-Grip, разработанной израильской фирмой ISCAR. Режущий элемент припаян к вставке из твердого сплава (рис. 6.8) [31], которая жестко базируется и крепит-

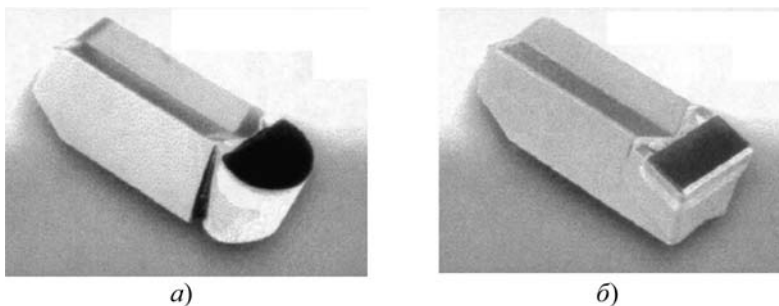


Рис. 6.8. Паяные вставки из ПСТМ с круглым (а) и прямоугольным режущими элементами (б) для резцов системы Cut-Grip

ся в державке инструмента за счет призматических канавок на верхней и нижней поверхностях.

Основным принципом работы такого инструмента является деформация рабочей части инструмента, которая приводит к появлению фронтального зазора под углом  $\varphi_1$  между режущей пластиной и заготовкой. Один и тот же инструмент позволяет обрабатывать на деталях восемь различных поверхностей. Кроме того, такой инструмент, благодаря тому, что режущий элемент открыт практически на  $120^\circ$ , успешно используется при обработке сложных фасонных поверхностей (рис. 6.9).

Резцы с механическим креплением пластин из ПСТМ (рис. 6.10) достаточно широко представлены в номенклатуре инструментальной промышленности. Наиболее распространенными являются резцы с креплением пластин прихватом сверху. Резец имеет державку 1, режущую пластину 2, прихват 3, винт 4 и пружину 5.

Ряд конструкций различаются схемой закрепления и базирования пластины: клиновой прихват, упругий прихват с боковыми пазами для установки пластин, Г-образный прихват с цилиндрической направляющей частью и установкой пластины в полузакрытый паз державки, цилиндрический прихват с упругим винтом и установкой пластины в полузакрытый паз, прихват с рифлениями для крепления конических режущих элементов из СТМ в открытый паз, прихват-планка с опорой в открытый паз и установкой пластины на сферическую опору, непосредственно в державку.

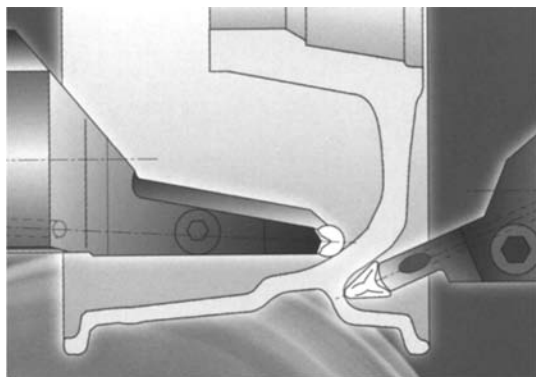


Рис. 6.9. Пример обработки фасонной поверхности резцами системы Cut-Grip



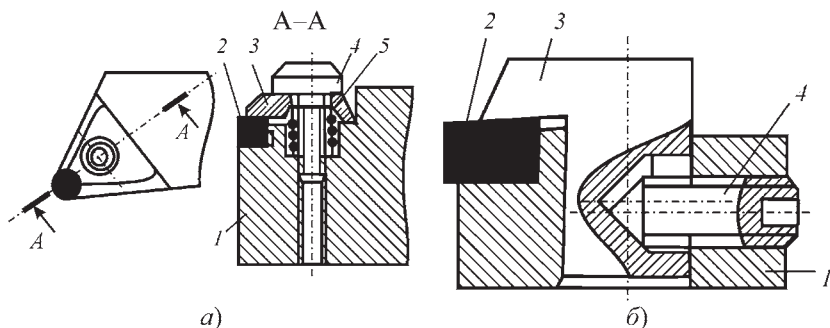


Рис. 6.10. Резцы с механическим креплением пластин из СТМ прихватом сверху (а) и винтом сбоку (б)

Способу *D* соответствует схема резца с креплением за боковые поверхности пластины (рис. 6.11). На державке *1* крепится нож с упругими закрепляющими элементами *2*, в паз которого устанавливается режущая пластина *3*. Зажим ножа в державке обеспечивает и закрепление режущей пластины.

Имеются также конструкции резцов с механическим креплением пластин при помощи косой тяги (способ *P*) через отверстие в подложке двухслойных пластин из ПСТМ и центрального винта через отверстие в режущем элементе, оснащённом ПСТМ (способ *S*).

На рис. 6.12 показаны многокристальные резцы из ПСТМ. Многокристальные резцы состоят из корпуса *1*, режущих элементов *2*, крепежных винтов или прихвата *3*. Выпускаются токарные, проходные резцы с механическим креплением круглых пластин из ПСТМ для обработки прокатных валков с глубиной резания 6...8 мм.

В отдельных случаях, когда требуется усиленное закрепление режущей пластины в связи со значительными глубинами резания и подачами, используют несколько прихватов. В качестве примера можно привести обработку деталей из высоколегированного чугуна Nichard (55...65 HRC) резцом, оснащённым пластиной Amborite Jumbo (диаметром 40 мм), когда обработка производится с глубиной резания 7 мм и подачей 1 мм/об. В этом случае для обеспечения надёжности закрепления пластина зажимается двумя прихватами.

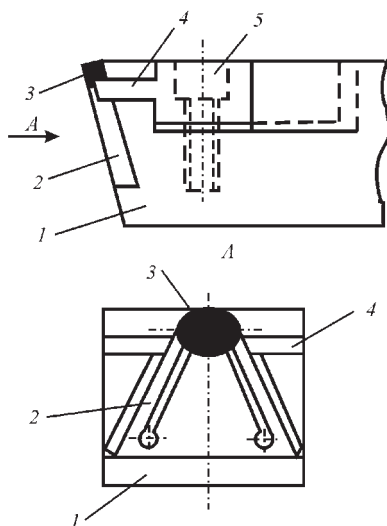
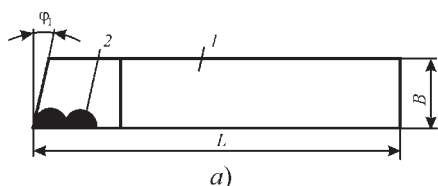
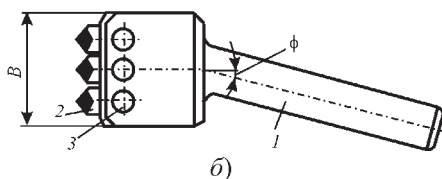


Рис. 6.11. Резец с упругим зажимающим элементом:

1 — державка; 2 — нож с упругими закрепляющими элементами; 3 — режущая пластина; 4 — прихват; 5 — винт



а)



б)

Рис. 6.12. Многокристалльные резцы с режущими элементами из СТМ:

а — напайной; б — с механическим креплением;  $\phi_1$  — вспомогательный угол в плане;  $\phi$  — угол наклона державки резца относительно его головки

### 6.1.4. Фрезы с режущими элементами из СТМ

Фрезы, оснащенные СТМ, являются вторым по применяемости типом инструмента после резцов с поликристаллическими режущими элементами. Различают торцовые (наиболее распространенный вид), концевые, дисковые и червячные фрезы с режущей частью из СТМ.

Торцовые фрезы выпускают с механическим креплением вставок, круглых и многогранных режущих пластин; «прямые» и «обратные»; насадные и хвостовые; однозубые и многозубые; однорядные, ступенчатые и многорядные; фрезы для обработки открытых, полузакрытых и закрытых поверхностей.

Наиболее распространены в настоящее время торцовые сборные регулируемые фрезы (рис. 6.13) с пластинами из ПСТМ или со вставками, оснащенными СТМ. Фреза состоит из корпуса 1 и режу-

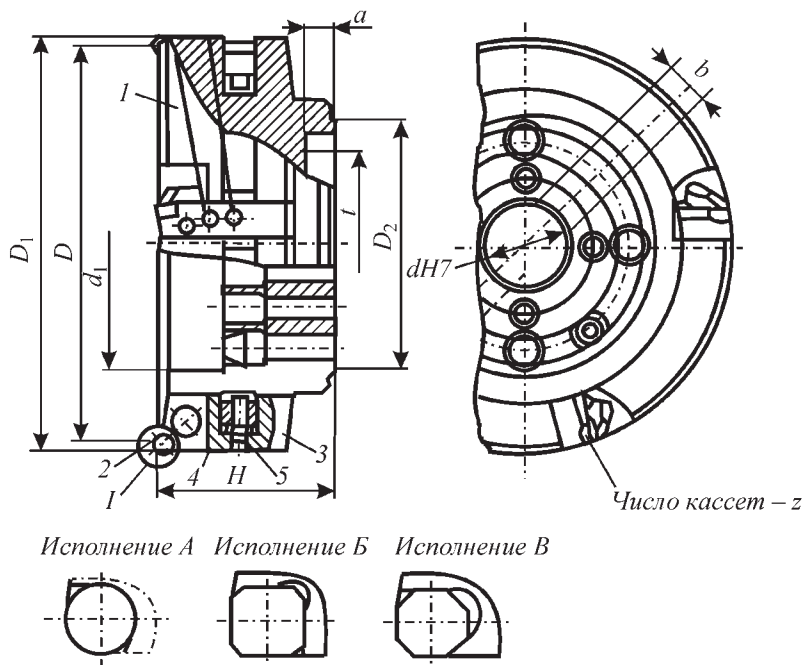


Рис. 6.13. Торцовая фреза с механическим креплением режущих пластин

ших пластин или вставок 2, механически закрепленных в кассетах 3. Последние, в свою очередь, состоят из корпуса 4 и крепежного механизма 5. Кассеты крепят в корпусе фрезы с возможностью радиальной и торцевой настройки. Применяются фрезы данной конструкции с диаметром 100...250 мм. Они оснащаются круглыми или квадратными режущими элементами.

Выпускают регулируемые торцовые насадные (однорядные и ступенчатые) фрезы диаметром 100...800 мм и нерегулируемые ступенчатые фрезы диаметром 100...400 мм с механическим креплением режущих элементов из СТМ.

Крепление в фрезах режущих элементов из ПСТМ-вставок и пластин имеет особенности. Режущий элемент крепится в корпусе фрезы тангенциально или радиально расположенным винтом. Крепление режущих вставок в однозубых фрезах-летучках может осуществляться двумя винтами сверху. Крепление вставки клином при

вращении винта обеспечивает достаточно высокую надежность закрепления и регулировку их положения.

В некоторых конструкциях крепление вставки в корпусе осуществляется тангенциальным винтом, а регулирование вылета вставки — вторым винтом. Во фрезах других конструкций на корпус устанавливается кольцо с пластиной, осуществляющей закрепление вставки. Торцовое биение регулируется винтом через штифт, а радиальное — вращением эксцентрика.

Режущие вставки из ПСТМ в червячных фрезах можно крепить обратным и прямым клином, поворотным штифтом или гибкой стенкой.

Режущие пластины в основном крепятся в корпусах фрез при помощи кассет, устанавливаемых в корпусе фрезы на штифте и закрепленных винтами и клин-прихватами. Прижим пластин к кассете осуществляется прихватом. Известен способ крепления, при котором пластина располагается в призматических пазах, выполненных и на корпусе фрезы, и в кассете. В нерегулируемых ступенчатых фрезах с пластинами из композита используется способ закрепления пластин цилиндрическим клином-прихватом, затягиваемым гайкой или цилиндрическим винтом со скосом, предохраняемым от проворота штифтом. Режущая пластина при этом устанавливается на опорную.

Отдельная группа фрез, оснащенных ПСТМ, — концевые фрезы для обработки пазов, уступов и других полузакрытых и закрытых поверхностей.

Разработаны конструкции концевых фрез, оснащенных сменными многокристальными ножами из СТМ. На рис. 6.14, *а* показаны схема расположения элементов и общий вид концевой фрезы со сменными многокристальными ножами из СТМ.

Корпус *1* имеет базовые поверхности для установки сменных ножей *2, 3*. Они крепятся к корпусу винтами с конической головкой *4* через фасонное отверстие в ноже. Производятся также напайные многокристальные концевые фрезы (рис. 6.14, *б*), однокристалльные, с механическим креплением сменных пластин с запаянным поликристаллом и цельных пластин из ПСТМ.

Для обработки пазов в деталях из труднообрабатываемых материалов применяются дисковые фрезы и пилы, оснащенные ПСТМ (рис. 6.15), выполняемые с монолитными или двухслойными режу-

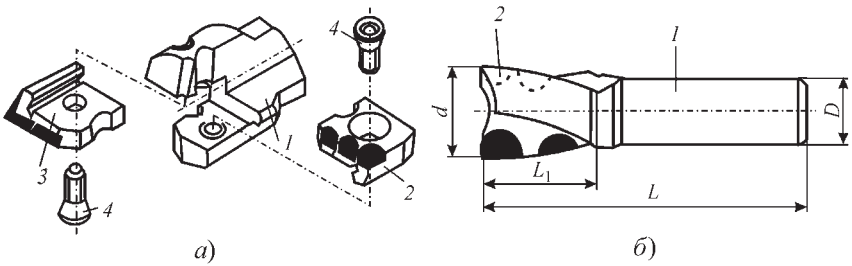


Рис. 6.14. Концевые фрезы, оснащенные режущими элементами из СТМ с механическим креплением напайных вставок (а) и напайная (б)

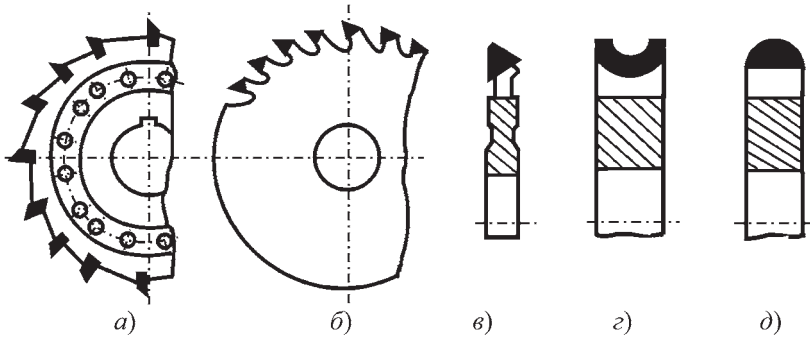


Рис. 6.15. Дисковые фрезы, оснащенные режущими элементами из ПСТМ: а — фреза; б — пила; в–д — фрезы со специальной формой режущей части

щими элементами, которые крепятся методом пайки с последующей заточкой. Выпускают дисковые фрезы с механическим креплением сменных вставок, оснащенных ПСТМ, для обработки пазов в деталях из закаленных сталей.

Червячные зуборезные фрезы, оснащенные режущими элементами из ПСТМ, работают по двум отличным друг от друга схемам резания — кромочной и профильной.

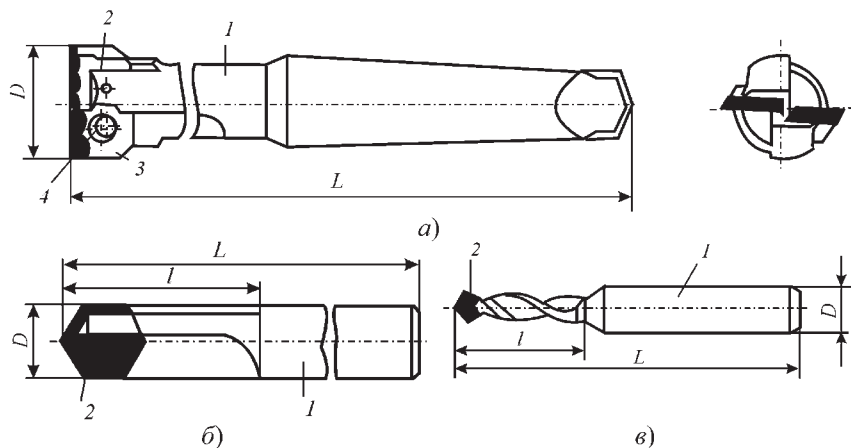
По типу режущих элементов червячные фрезы делят на фрезы с механическим креплением сменных вставок или пластин. Конструктивно червячные фрезы могут состоять из одной и двух полуфрез. Обычно режущая часть фрезы выполняется из ПСТМ на осно-

ве нитрида бора. Поликристаллы располагают на корпусе таким образом, чтобы обеспечить взаимное перекрытие режущих кромок и снятие требуемого припуска равномерно на всей заданной длине обрабатываемой поверхности. Способы закрепления режущих элементов в червячных фрезях, оснащенных ПСТМ, применяют те же.

### 6.1.5. Инструменты для обработки отверстий

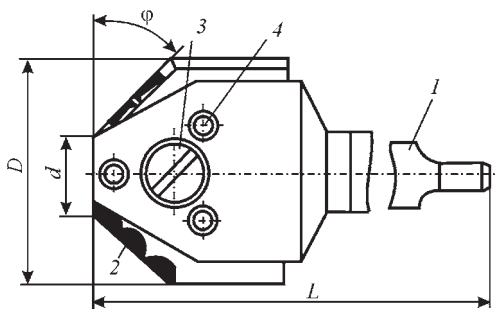
Инструмент для обработки отверстий, оснащенный режущими вставками из СТМ, не получил широкого распространения. Однако именно при обработке отверстий (особенно малых диаметров) наиболее полно реализуются преимущества такого инструмента.

Разработана конструкция сверл с механическим креплением сменных многокристалльных ножей из СТМ. На рис. 6.16 показаны схема расположения элементов и общий вид сверл, оснащенных режущими вставками из СТМ. Наиболее широкое распространение получили напайные сверла: с впаянными поликристаллами и



**Рис. 6.16. Сверла, оснащенные СТМ, с механическим креплением режущих элементов (а); с прямыми (б) и спиральными (в) канавками и впаянными режущими элементами:**

1 — корпус; 2, 3 — сменные ножи (их устанавливают в сверла и крепят винтами 4 к корпусу через фасонные отверстия)



**Рис. 6.17. Зенкер, оснащенный режущими элементами из СТМ:**

1 — корпус; 2 — сменные многокристалльные ножи, соединенные между собой штифтами 4 и прижатые к корпусу винтом 3;  $\varphi$  — главный угол в плане

цельной головкой из ПСТМ, ружейные, с прямыми канавками, однокромочные, спиральные.

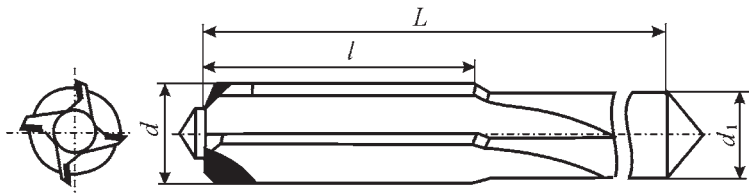
На рис. 6.17 показан зенкер, оснащенный режущими элементами из СТМ. Положение ножей можно регулировать винтами.

Зенковки для обработки отверстий в деталях из неметаллических материалов изготавливают с напайными элементами и с механическим креплением вставок или пластин из СТМ.

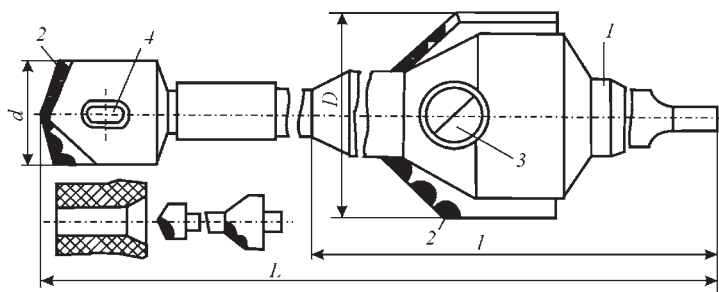
На рис. 6.18 показана наиболее распространенная развертка с режущими элементами из СТМ. Развертки делают с коническим и цилиндрическим хвостовиком, прямозубые и спиральные, без направляющих и с направляющими поясками, с отверстием для подвода СОТС.

Разработан комбинированный инструмент для обработки отверстий (рис. 6.19) с механическим креплением сменных многогранных ножей с режущими элементами из СТМ: сверло-зенковка и сверло—сверло. Конструктивные размеры инструмента определяются параметрами обрабатываемых отверстий.

Для оснащения рассмотренного выше осевого инструмента выпускают специальные двухслойные, такие как Syndite-макро, и



**Рис. 6.18. Развертка, оснащенная режущими элементами из СТМ**



**Рис. 6.19.** Комбинированный инструмент сверло—зенкер, оснащенный режущими элементами из СТМ:

*1* — корпус; *2* — режущие элементы; *3, 4* — установочно-крепежные элементы

цельные, такие как ПСТМ киборит, поликристаллические материалы; для изготовления сверл диаметром до 16 мм и двухслойные, такие как Syndite-микро, для изготовления сверл, используемых в электротехнической промышленности при сверлении отверстий в печатных платах.

## 6.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТМ

### 6.2.1. Разрезка заготовок поликристаллических СТМ и монокристаллов алмаза

Для снижения потерь дорогостоящего СТМ при изготовлении инструмента используются отдельные фрагменты кристаллов или спеков, получаемые при их рациональном раскросе.

При изготовлении режущих элементов алмазных инструментов используют кристаллы алмаза без трещин, раковин, других видимых при (10...15)-кратном увеличении дефектов. Алмазы проверяют на внутренние напряжения, вызываемые различными включениями, путем просвечивания кристалла поляризованным светом. В случае наличия внутренних напряжений в кристалле видны зоны двойного лучепреломления.

Технология изготовления инструментов из природного алмаза зависит от метода крепления кристалла в державке, конфигурации режущей кромки и требований, предъявляемых к ней. Учитывая,



что стоимость алмазных резцов в зависимости от размеров кристалла алмаза в пятьдесят и более раз превышает стоимость аналогичных инструментов из твердых сплавов, форма отобранных кристаллов алмаза должна приближаться к форме будущего резца для того, чтобы избежать лишних потерь алмаза.

Обычно заготовки из природного алмаза разрезают шаржированными алмазными дисками с относительно низкой производительностью процесса — 30...40 мм<sup>2</sup>/ч.

Заготовки алмазных поликристаллов имеют, как правило, форму диска толщиной 3...8 мм, диаметром от 9 до 105 мм. Для изготовления сменных режущих пластин, режущих элементов, впаиваемых в твердосплавные пластины, и напайного инструмента эти заготовки необходимо обработать для придания требуемой формы (рис. 6.20). Использование для этой цели алмазных отрезных и шлифовальных кругов неэффективно, так как сопровождается большим расходом инструментов и не всегда позволяет получать элементы необходимой формы.

Для изготовления режущих элементов из поликристаллов разработан ряд эффективных процессов с использованием источников концентрированной энергии, а именно — электроискровой технологии, лазерной обработки и гидроабразивной резки (рис. 6.21–6.23).

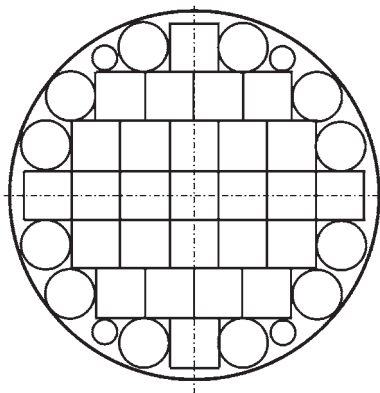


Рис. 6.20. Схема раскроя крупногабаритной заготовки на отдельные режущие пластины различной формы

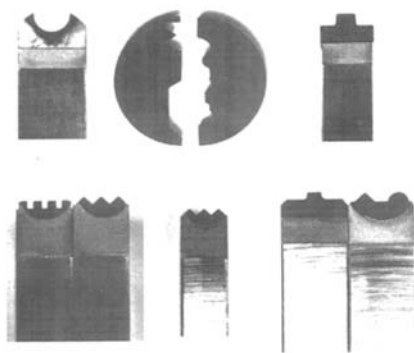


Рис. 6.21. Примеры режущих инструментов, оснащенных ПСТМ, профиль которых выполнен электроискровым методом

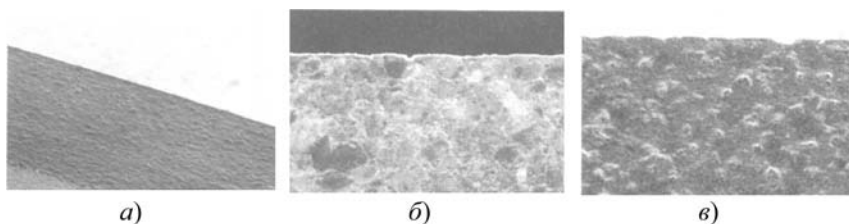


Рис. 6.22. Внешний вид режущей кромки (а), передней (б) и задней (в) поверхностей инструмента с режущим элементом из алмазного ПСТМ после электроискровой обработки:

а —  $\times 150$ ; б, в —  $\times 250$

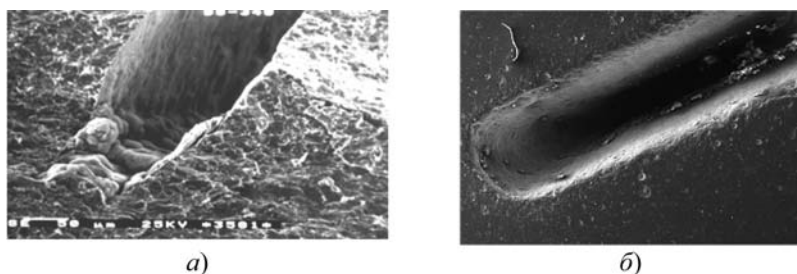


Рис. 6.23. Канавки, прорезанные в пластинах из ПСТМ:

а — лазерным лучом в пластине АТП; б — гидроабразивной струей в пластине из ПСТМ киборит

Электроискровой резкой алмазных поликристаллических двухслойных пластин подвижным гибким проволочным электродом можно изготавливать режущие элементы различных форм. Достижимая скорость движения электрода — до 4,5...5,0 мм/мин; шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,8...1,6; точность изготовленных элементов —  $\pm 0,05$  мм; точность по углу —  $\pm 10'$ .

Оценка влияния режимов электроискровой обработки на процесс резки алмазных ПСТМ показывает [32], что увеличение частоты импульсов улучшает качество обработки, увеличение разрядного тока повышает скорость съема, но ухудшает качество обработки, повышает шероховатость режущей кромки. Необходимо отметить, что с уменьшением зернистости алмазного слоя в двухслойных ПСТМ скорость съема увеличивается. Так, скорость съема для

Syndite 010 составляет 15, для Syndite 002 — 18, для СТС 002 — 20 мм<sup>2</sup>/мин. В связи с тем, что возникающая в процессе спекания переходная зона между твердым сплавом и слоем поликристалла алмаза обогащена кобальтовой фазой, при резке поликристалла между твердосплавной подложкой и алмазным слоем появляется надрез, глубина которого достигает 45...50 мкм.

Опыт обработки алмазных ПСТМ на электроискровых станках проволочными и другими электродами привел к разработке электроискровой обработки вращающимся дисковым электродом.

Дисковые электроды изготавливают из графита, меди, вольфрама. Наибольшее распространение получили графитовые диски. Правку и профилирование электрода осуществляют непосредственно на станке с использованием дополнительных приспособлений.

Сравнение результатов обработки на станках различных фирм показало, что шероховатость кромки для образцов ПСТМ, обработанных вращающимся электродом, составляет  $R_a$  1,59...2,82, что сопоставимо по качеству со шлифованными [28]. Наиболее высокая чистота поверхности может быть получена при многоступенчатой обработке с использованием оптимальных режимов электроискровой обработки. Шероховатость рабочей поверхности и производительность съема зависят от системы контроля и способа управления процессом. Имеет значение и выбор марки ПСТМ.

Пластины из ПСТМ на основе алмаза и cBN больших размеров эффективно резать лазерным лучом. В табл. 6.2 приведены показатели производительности разрезки различных ПСТМ.

При лазерной резке применяются контурная и торцовая схемы. При первой схеме обработки обеспечивается точность 9...10 качества и шероховатость поверхности  $R_a$  0,63...1,25, при второй — 12 квалитет. Минимальное значение радиуса округления режущей кромки изменяется в пределах 3...6 мкм. Стоимость лазерной обработки ПСТМ в 2,5...4 раза ниже, чем алмазного шлифования.

Лазерная разрезка кристаллов природного алмаза не нашла широкого применения в промышленности из-за ряда недостатков: снижение интенсивности процесса при глубоком резании, появление сколов и микротрещин в результате нагрева. Более перспективным для разрезки природного алмаза признан термохимический метод. Он заключается в том, что алмаз при температуре 1073...1473 К приводят в контакт с инструментом, изготовленным из металлов, спо-

## 6.2. Производительность при лазерной резке ПСТМ

Показатели обработки	Обрабатываемый материал					
	На основе алмаза			На основе cBN		
	АРК	АРВ	Карбонит	Киборит	Композит 01	Композит 10
Производительность резки, мм <sup>3</sup> /мин	6,60	6,60	7,60	14,6	8,60	15,10
Толщина единичного слоя, мм	0,19	0,19	0,20	0,71	0,25	0,64

собных растворять в себе углерод, например, железа, кобальта, никеля. В месте контакта углерод поглощается металлом, растворяя таким образом алмаз. Недостатком метода является достаточно длительное время реализации.

Эффективность обработки инструментов с режущими элементами из ПСТМ на основе нитрида бора определяется их электропроводностью. Например, для обработки элементов из киборита, Amborite, Ambrozit целесообразно использовать лазерную резку заготовок, так как эти ПСТМ не проводят электрического тока, а при обработке инструмента из хорошо проводящего электрический ток DBC-50 эффективно используют методы электроискровой резки проволокой и электроискрового шлифования.

Гидроабразивная резка является перспективным методом раскроя ПСТМ на основе cBN (см. рис. 6.23, б).

Раскрой ПСТМ гидроабразивной струей эффективно производится при давлении технологической среды 400 МПа с абразивом твердостью по Моосу более 9 при скорости разрезания 2...3 мм/мин. Производительность процесса может быть увеличена за счет использования абразива с высокой абразивной способностью, например, ультрадисперсных алмазов.

Низкие температуры в зоне реза при гидроабразивном воздействии не вызывают теплового нарушения поверхностного слоя пластин из ПСТМ. В тоже время, в связи с формированием на поверхностях реза системы неровностей, гидроабразивная резка является предварительной операцией, после которой необходимо выполнять финишную алмазно-абразивную обработку.

### 6.2.2. Алмазно-абразивная обработка моно- и поликристаллических СТМ

Абразивная обработка СТМ может осуществляться двумя методами: с применением связанных абразивов и свободных абразивных порошков. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. При равенстве площадей контакта абразивного инструмента с обрабатываемой пластиной производительность шлифования алмазными кругами в 6...8 раз выше, чем свободным порошком. Вместе с тем при использовании свободных абразивов легче обеспечить одновременную обработку большого количества заготовок и регулировать усилия резания. Для реализации метода шлифования свободным абразивом применяют чугунные диски и алмазный порошок; не требуются специальных устройств, которые необходимы для чистки и правки абразивных кругов. Однако метод эффективен в основном при обработке плоскостей и свободных граней пластин. Обработку цилиндрических и конических поверхностей, фасок, радиусных вершин, заточку задних и передних поверхностей у напайных резцов наиболее эффективно проводить алмазными абразивными кругами.

*Алмазное шлифование сверхтвердых материалов* представляет собой случай взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов с одинаковыми или сопоставимыми значениями твердости.

В условиях алмазного шлифования СТМ реализуются различные виды микроразрушения. Существенную роль в разрушении поверхности играют растягивающие напряжения, возникающие при скольжении по ней алмазных зерен. Определенное влияние оказывает термическая активация процесса за счет мгновенных значений контактной температуры. При трении алмаза по алмазу величина локальной температуры может превышать 2000 °С.

Термически активируемые процессы при алмазном шлифовании способствуют интенсификации микроразрушения природных алмазов и синтетических поликристаллов на основе алмаза и нитрида бора.

Обработка (огранка) кристаллов природного алмаза проводится на специальных ограночных станках. Плоский диск, обрабатывающий природный алмаз, изготавливают из мелкозернистого серого

чугуна с ферритной структурой твердостью 100...120 НВ. Рабочая поверхность диска шаржируется алмазным порошком.

При изготовлении алмазных резцов передняя поверхность инструмента обрабатывается в первую очередь, затем шлифуется его задняя грань с учетом требуемого заднего угла. После этого проводится шлифование и доводка фасок на задней и передней поверхностях.

В выбранном кристалле алмаза режущие кромки резца располагаются таким образом, чтобы износ инструмента происходил в направлении вектора наибольшей твердости, а усилия резания не совпадали с направлением спайности, по которым алмаз легко раскалывается.

При изготовлении алмазных резцов расход алмазных порошков составляет до 20 % от первоначального веса обрабатываемого кристалла.

Процесс обработки ПСТМ на основе нитрида бора имеет ряд особенностей по сравнению с обработкой поликристаллов на основе алмаза. Микротвердость алмазного зерна круга на 20...30 ГПа больше микротвердости кристаллов обрабатываемого поликристалла сBN, размеры кристаллитов боронитрида на порядок меньше, чем у алмазных поликристаллов. Алмазное зерно при нагружении способно внедриться в поверхность поликристалла вюртцитного или сфалеритного нитридов бора на заметную глубину и оставить на них хорошо различимый отпечаток.

#### ***Шлифовальные круги для обработки режущих элементов из СТМ.***

К основным факторам, определяющим работоспособность алмазного круга, относятся форма и размеры круга, состав связки, марка, зернистость, покрытия и концентрация алмаза (табл. 6.3).

Работоспособность связки характеризуется двумя основными свойствами: прочностью удержания зерен абразива и износостойкостью.

Для прочного удержания алмазных зерен связка должна быть адгезионно активна по отношению к поверхности алмаза и в то же время обладать минимальной адгезией по отношению к обрабатываемому материалу. Необходимо, чтобы связка не только была износостойкой, но и обеспечивала высокую режущую способность алмазоносного слоя, т.е. обеспечивала своевременное вскрытие новых режущих зерен и наиболее полное использование их.

### 6.3. Типаж алмазных кругов

Форма круга	Обозначение
Чашечные с углом 45°	12A2
Плоские прямого профиля	1A1
Плоские с выточкой	6A2
Плоские с двусторонней выточкой	9A3
Плоские с двусторонним коническим профилем	1EE1, 14EE1
Тарельчатые	12P4, 12P5, 12D9
Чашечные с углом 20°	12A2

Для алмазных кругов, работающих с применением воздействия электрического тока, большое значение имеет электропроводность связки.

Для обработки ПСТМ применяют круги, изготавливаемые на органических, металлических и керамических связках. В органических связках в качестве основы используются пульвербакелит и неорганические полимеры силоксанового ряда, в металлических — различные металлы, в керамических — боросиликатное стекло.

На практике наиболее широкое применение находят круги на органических связках. Они сравнительно просты в изготовлении и эксплуатации, универсальны в работе. Между собой органические связки отличаются связующим наполнителем. Связки, нашедшие применение в отечественной промышленности при обработке ПСТМ, имеют следующие наполнители: В2-01 — карбид бора; В1-02 — карбид бора, смесь порошков цветных металлов; В1-01, В1-03 — карбид бора, порошок меди и др., В1-10 — карбид бора, порошок меди, В3-01 — дробленую резину. Введение наполнителей в связку позволяет регулировать ее физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики алмазного инструмента. Присутствие в связке частиц карбида бора увеличивает жесткость связки, улучшает процесс самозатачивания круга при шлифовании, снижает удельный расход алма-

зов. Металлические наполнители обеспечивают меньший износ алмазов, чем хрупкие наполнители, однако использование только металлических наполнителей усиливает засаливаемость кругов, снижает их самозатачиваемость. Дробленая резина придает связке эластичность, что способствует снижению шероховатости обработанной поверхности.

Применение алмазных шлифовальных кругов на силоксановой связке ПКН при черновой обработке боковых рабочих поверхностей многогранных сменных неперетачиваемых режущих пластин из ПСТМ на основе сBN позволяет увеличить допустимую глубину шлифования до двух раз (до 0,2 мм) при обеспечении требуемой шероховатости поверхности.

Шлифовальные круги на силоксановой связке отличаются высокой износостойкостью, равномерностью износа рабочего слоя круга, что позволяет их эффективно использовать при высокопроизводительном шлифовании на станках-автоматах с ЧПУ.

Керамические связки удерживают режущие зерна более прочно, чем органические, отличаются большей хрупкостью, и поэтому круги с этими связками обладают лучшей самозатачиваемостью.

Металлические связки обеспечивают более прочное, чем органические и керамические, удержание алмазных зерен, обладают большей теплопроводностью и высокой удельной электропроводностью.

Круги на металлических связках рекомендуется применять при наличии непрерывного дополнительного воздействия на рабочую поверхность круга. Использование кругов на металлических связках для шлифования ПСТМ с непрерывным управлением их режущим рельефом позволяет исключить взаимодействие связки круга с ПСТМ и снизить в 1,3...1,4 раза уровень средней температуры на поверхности поликристаллов при их обработке по сравнению с температурой, которая возникает при обработке кругами на органической связке.

При обработке ПСТМ в алмазных кругах применяют в основном шлифпорошки марок АС2...АС20 и микропорошки АСМ и АСН.

Микропорошки АСН обладают абразивной способностью на 18...22 % большей, чем АСМ. Зернистость микропорошков, применяемых в кругах для обработки ПСТМ — 10/7...60/40.



Для шлифования ПСТМ используются следующие марки алмазного порошка в зависимости от связки круга:

связка:	марка алмазного порошка:
органическая	АС2...АС6
металлическая	АС6
керамическая	АС4, АС6

От зернистости алмазных кругов зависят шероховатость обработанной поверхности, радиус округления и зазубренность режущей кромки инструмента, производительность обработки, расход кругов. С увеличением зернистости повышается производительность обработки, но увеличивается и шероховатость обработанной поверхности, причем интенсивность изменения этих параметров зависит от конкретных условий обработки.

Для повышения эффективности работы алмазных кругов при их изготовлении используют алмазные порошки с различными металлическими и неметаллическими покрытиями, которые обеспечивают лучшее удержание зерен связкой, повышают их прочность, улучшают условия теплоотвода из зоны шлифования. Однако при шлифовании поликристаллических сверхтвердых материалов металлизация зерен не всегда дает положительные результаты, особенно это проявляется при работе кругов на металлических связках. Наилучший эффект достигается при использовании кругов на органической связке с металлизированными агрегированными порошками алмаза, представляющими собой агрегаты, содержащие несколько зерен алмаза, которые покрыты и спаяны между собой медно-оловянным, медно-сурьмянистым и другим сплавом.

Повышение самозатачиваемости алмазных кругов, снижение засаливаемости, повышение температуры и мощности шлифования могут быть достигнуты при нанесении на алмазные зерна покрытий на основе натриево-боросиликатных стекол. Размягченное при контактировании с обрабатываемым материалом стекло является хорошей смазкой. На выбор концентрации алмаза в кругах влияют характер выполняемой технологической операции, форма рабочей поверхности круга, площадь контакта круга и изделия, размерная стойкость рабочей поверхности круга, величина алмазного зерна. В большинстве случаев используют круги с относительной концентрацией алмаза, равной 100, как наиболее универсальной.

Вместе с тем, роль концентрации алмаза в кругах при обработке поликристаллических сверхтвердых материалов заключается в том, что при ее уменьшении (до 25 %) можно повысить коэффициент участия зерен в работе, обеспечить их самозатачиваемость, сократить удельный расход алмаза, увеличить производительность обработки и исключить брак из-за растрескивания ПСТМ.

Концентрация алмазных зерен в круге, содержащем токопроводящую связку, обеспечивающая минимальный удельный расход кругов и наилучшее качество изделия из ПСТМ при их шлифовании, может быть определена из соотношения

$$K = 25\tau_1/\tau_2,$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  — предел прочности на сжатие шлифуемого сверхтвердого материала и алмазных зерен соответственно.

Одной из наиболее характерных особенностей процесса шлифования ПСТМ алмазным кругом является быстрая потеря его режущей способности в результате интенсивного изменения рельефа режущей поверхности и ее свойств.

Для обеспечения высокой эффективности алмазного шлифования ПСТМ необходима постоянная развитость микро- и субмикрорельефа прочных алмазных зерен и надежное удержание зерен в связке круга.

**Интенсификация процесса шлифования СТМ.** Режим самозатачивания не всегда обеспечивает требуемое условиями обработки состояние режущей поверхности круга. Необходима периодическая правка для восстановления режущей способности кругов [23]. Для абразивно-механической правки (чистки) кругов используют абразивные бруски или круги, в том числе алмазные. Правка может выполняться вручную или с помощью специальных приспособлений.

В качестве правящего инструмента рекомендуется использовать для ручной правки бруски твердостью М1, М2, а для механизированной — круги твердостью СМ1 и С1 из электрокорунда или карбида кремния зеленого на керамической связке с зернистостью, равной или на 1...2 номера больше зернистости алмазного круга.

При правке абразивными брусками при их жестком закреплении продольная подача бруска составляет 1...2 м/мин, поперечная — 0,01...0,02 мм/дв. ход.

Правка методом шлифования проводится с помощью специальных приспособлений при скорости 10...35 м/с, продольной подаче 1,5...2,0 м/мин, поперечной подаче 0,005...0,2 мм на 3...6 дв. ходов. Алмазный круг в обоих случаях вращается с рабочей скоростью.

Наиболее производительными являются методы шлифования ПСТМ алмазными кругами на металлических связках с обязательным управлением их режущим рельефом. Оно достигается дозируемым разрушающим воздействием на связку и алмазные зерна, находящиеся на рабочей поверхности круга, а также удалением из межзеренного пространства продуктов шлифования и износа.

Способы такого воздействия должны обеспечивать: возможность регулировать интенсивность разрушения в широких пределах; избирательность разрушающего воздействия; развитость микро- и субмикрорельефа алмазных зерен при допустимых интенсивностях износа; доступность реализации в условиях производства.

В зависимости от места на рабочей поверхности круга и реализации дозируемого разрушающего воздействия управление (рис. 6.24) [21] является автономным, совмещенным или комбинированным. В первом случае зона управления отделена от зоны шлифования, во втором — совмещена, в третьем — имеется самостоятельная и совмещенная зоны шлифования.

При обработке СТМ чаще других используется автономное управление режущей поверхностью круга. При этом разрушающему воздействию подвергают участки рабочей поверхности круга вне зоны шлифования. Для шлифования поликристаллов совместно со стальной державкой рекомендуется комбинированный метод, совмещающий электроалмазное шлифование стальной державки и алмазное шлифование ПСТМ с непрерывным управлением режущим рельефом алмазного круга. Для осуществления такого процесса шлифования используют две электрические цепи.

При шлифовании композиции ПСТМ—сталь возможна также обработка по более простой схеме (с одной электрической цепью). В качестве катода используется стальная державка.

Упрощенная схема шлифования ПСТМ с автономным управлением режущим рельефом алмазного круга путем электрохимического воздействия на круг наиболее просто реализуется на станках, предназначенных для электроалмазного шлифования, или на станках, модернизированных для этой цели. Алмазный круг в цепи ис-

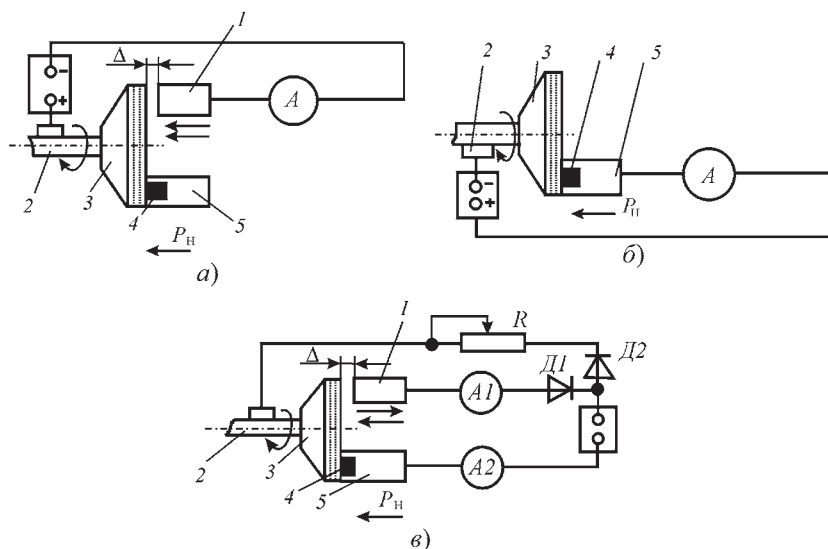


Рис. 6.24. Принципиальные схемы шлифования СТМ:

*а* — с непрерывным автономным электрохимическим управлением режущим рельефом круга на токопроводящих связках; *б* — с совмещенной зоной управления и шлифования; *в* — комбинированная; 1 — автономный электрод; 2 — токосъемник; 3 — алмазный круг; 4 — СТМ; 5 — державка

точника постоянного тока является анодом, а специальное устройство — катодом. Наиболее совершенная реализация данного процесса включает в себя автоматическую стабилизацию уровня режущей способности круга. Для этого разрушающее воздействие на круг дозируется в результате действия системы, стабилизирующей силу тока в цепи автономного катода. Сила тока регулируется за счет изменения зазора между рабочей поверхностью круга и катодом.

При уменьшении силы тока, проходящего через межэлектродный зазор, по мере износа алмазного слоя круга по сравнению с заданным значением возникает сигнал рассогласования. Со сравнивающего устройства он поступает на вход фазочувствительного усилителя, нагрузкой которого является реверсивный асинхронный двигатель типа РД-09 механизма подачи катода. Катод перемещается с помощью червячной передачи, имеющейся в механизме подачи.

При выборе конструктивных размеров катода, в частности площади его рабочей поверхности, необходимо исходить из следующих условий:

- достижение линейных скоростей съема поверхностных слоев связки круга, которые обеспечили бы стабильное поддержание высокой развитости режущего рельефа, особенно в неблагоприятных условиях работы алмазных кругов, характеризующихся интенсивным сглаживанием рельефа при шлифовании алмазных ПСТМ;

- ограничение интенсивности электрохимических процессов в межэлектродном зазоре и недопущения самопроизвольного перехода их в электроэрозионные, имеющие характер электродуговых разрядов, разрушающих рабочие поверхности круга и катода;

- исключение шлифования катода кругом;

- гарантированный зазор между рабочей поверхностью катода и наиболее выступающими зернами круга должен быть не менее 0,1 мм.

Для интенсивного растворения связки в процессе шлифования ПСТМ, а также исключения отрицательного влияния чрезмерного нагрева электролита, площадь катода должна быть максимальной. Однако установлено, что для кругов зернистостью до 315/250 можно ограничиваться рабочей площадью катода 1000...1200 мм<sup>2</sup>.

Подачу электролита в межэлектродный зазор целесообразно осуществлять через отверстия в катоде. При использовании для шлифования чашечных кругов эти отверстия необходимо располагать под внутренней кромкой рабочей поверхности круга для обеспечения равномерного заполнения межэлектродного зазора электролитом.

В качестве электролитов рекомендуется применять состав № 1 (табл. 6.4).

При осуществлении приведенного способа управления режущими свойствами круга возможна потеря устойчивости управления высотой зерен. Это явление в случае использования схемы шлифования с постоянным условием прижима обрабатываемого изделия к кругу приводит к снижению средней производительности обработки, а при шлифовании с фиксированной подачей наблюдается возрастание силы  $P_n$ .

Шлифование с автоматической стабилизацией уровня электрохимического воздействия на круг осуществляется при завышенной

#### 6.4. Составы технологических сред, применяемых при шлифовании ПСТМ

Состав	Массовая доля компонентов*, %						Способ подачи СОТС
	NaNO <sub>3</sub>	NaNO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Глицерин	Триэтаноламин	Олеиновое масло	
1	5	0,3	—	—	—	—	Полив
2	—	—	0,3...2,0	—	—	—	Полив или распыление
3	0,6	—	—	0,6	1,8	—	
4	—	12	0,3	—	—	3,0	Капельный

\* — остальное вода.

на гарантированное значение силы тока в цепи автономного катода, устраняющей наступление потери устойчивости. Показатели обработки ПСТМ (производительность, расход алмаза и др.) существенно зависят от силы тока в цепи управления. Так, с увеличением силы тока от 0 до 80 А удельный расход алмаза уменьшается в 5...6 раз. Однако при дальнейшем ее увеличении удельный расход начинает расти.

С целью обеспечения стабильности процесса шлифования может быть дополнительно применена следящая система, реагирующая на изменение силовых нагрузок на круг, в частности, на изменение мощности.

Для осуществления электрохимического воздействия на круг используют источники постоянного тока 12...16 В. Плотность тока в межэлектродном зазоре для самого нагружаемого режима практически не превышает 0,1 А/мм<sup>2</sup>.

Алмазные поликристаллы целесообразно сначала шлифовать с силой тока в цепи управления 75...80 А. При этом производительность обработки составляет 8...15 мм/мин. На заключительном этапе обработки силу тока следует уменьшать до 20...25 А. В результате обеспечивается снижение шероховатости обработанной поверхности и исключается возможность ее термического растрескивания.

Управление режущим рельефом круга дозируемым электрофизическим воздействием осуществляется также на станках для электроалмазного шлифования. Алмазный круг на токопроводящей связке служит одним электродом, а катодное устройство — другим.

В качестве источников электрической энергии можно использовать генераторы импульсных напряжений: ШГИ40-440, ОПИ 3/100-М, ВГ-ЗВ, ШГИ100-125, МГИ, ГКИ-5 и др.

Чем выше интенсивность электроэрозионного процесса, тем интенсивнее удаление связки, больше высота выступания зерен алмазного круга над уровнем связки, выше производительность шлифования ПСТМ. Постоянство межэлектродного зазора обеспечивается системой поднастройки катода; контролируется стабильность работы генератора в режиме, близком к короткому замыканию.

Изменяя энергию электрических импульсов, в процессе шлифования поликристаллов можно изменять характеристики режущего рельефа алмазного круга и благодаря этому существенно повышать производительность обработки.

Перспективен электроэрозионный способ управления при помощи регулируемых источников постоянного тока.

Совмещение различных по природе разрушающих воздействий (электрохимического и абразивного, электроэрозионного и абразивного) создает дополнительные возможности управления режущим рельефом. Комбинация электрофизико-химического и механического разрушающего воздействия на рабочую поверхность круга лежит в основе способа управления режущим рельефом с помощью щеточных гибких электродов. Гибкие микроэлектроды катодного устройства, проникая в межзеренное пространство и огибая алмазные зерна, обеспечивают локальное разрушающее воздействие на участки связки перед фронтом и с флангов зерна, оставляя своеобразные возвышения связки за зерном.

На практике применяется электроэрозионная правка алмазных кругов с помощью алмазных брусков на токопроводящих связках, используемых в качестве катода. Алмазный брусок имеет упругий контакт с рабочей поверхностью круга, что обеспечивает дополнительное абразивное воздействие на круг.

Этот способ отличается простотой и достаточно высокой эффективностью поддержания режущих способностей алмазного круга. Для правки кругов указанным способом могут быть исполь-

зованы источники постоянного тока напряжением 10...18 В. Сила поджатия бруска составляет 20...30 Н.

Закономерности изменения режущего рельефа, описанные для алмазных кругов на металлических связках, справедливы и для кругов на органических связках. Однако в этом случае невозможно управление высотой выступания зерен и устранение контакта связки с обрабатываемым ПСТМ. Поэтому тангенциальная сила  $P_z$ , мощность  $N$  и среднеинтегральная температура  $Q$  выше, чем при шлифовании кругами на металлической связке с непрерывным управлением режущим рельефом кругов. Большей оказывается и степень влияния поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ , а также скорости круга  $v_{\text{кр}}$ . Эти величины определяются в зависимости от подачи и силы резания по следующим формулам [12]:

$$P_z, N, Q = a_i (S_{\text{поп}}/0,03)^{b_i}; \quad (6.1)$$

$$P_z, N, Q = a_{1i} (v_{\text{кр}}/20)^{b_{1i}}, \quad (6.2)$$

где  $a_i, a_{1i}, b_i, b_{1i}$  — экспериментальные коэффициенты.

Алмазные круги на органических связках могут шлифовать ПСТМ в режиме самозатачивания до полного износа без дополнительной правки. Необходимым условием этого является внедрение поликристалла в связку, что связано с высокой силовой и тепловой напряженностями процесса (нормальное давление в контакте с кругом может достигать 30...50 МПа, температура шлифования — 900...1000 К, а эффективная мощность шлифования больше 3 кВт).

Величина поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ , при которой исключается периодичность самозатачивания кругов на органических связках в диапазоне скорости круга 20...40 м/с, зернистости 125/100...200/160, относительной концентрации 50...100, рассчитывается по формуле [4]

$$S_{\text{поп}} = 25 - 30/H_{\mu}^3 S_k \text{ HRB}, \quad (6.3)$$

где  $S_{\text{поп}}$  — поперечная подача, мм/дв. ход;  $H_{\mu}$  — микротвердость ПСТМ, ГПа;  $S_k$  — площадь контакта обрабатываемого образца ПСТМ с кругом, мм<sup>2</sup>; HRB — условная твердость связки круга.

Для органических связок расчетные значения поперечной подачи приведены в табл. 6.5 [12].



### 6.5. Расчетные значения подачи, исключаяющей периодичность процесса самозатачивания кругов на органических связках

Связка круга	Марки ПСТМ				
	АСПК	Диамет	СКМ-Р	Композит 05	Композит 10Д
В2-01	0,03...0,04	0,03...0,04	0,02...0,03	0,1...0,12	0,06...0,08
В1-10	0,04	0,04	0,03...0,04	0,12	0,08...0,10

Использование алмазных кругов позволяет разрабатывать высокоэффективные технологические процессы шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов. Важно в каждом конкретном случае правильно определить схему шлифования, способ управления режущей поверхностью, характеристику круга и режим обработки (табл. 6.6).

Группы сверхтвердых материалов существенно отличаются друг от друга физико-механическими свойствами, а значит, обрабатываемостью (табл. 6.7). Обрабатываемость поликристаллов ухудшается с повышением их твердости. Более интенсивные режимы шлифования назначаются при обработке поликристаллов, имеющих меньшую твердость. При многопозиционной обработке ее производительность возрастает.

Шлифование алмазными кругами режущих лезвий инструмента из ПСТМ при соответствующих режимам чистовой обработки и доводки условиях обеспечивает получение кромок с радиусом округления 4...15 мкм.

Шлифование и заточку ПСТМ и инструмента из них необходимо производить с применением СОТС.

**Обработка ПСТМ свободным абразивом.** При обработке свободным абразивом удаление материала проводится в результате воздействия на обрабатываемую поверхность зерен, шаржированных в поверхность притира либо временно в нем закрепившихся, а также вследствие перекатывания остальных зерен между заготовкой и притиром. С помощью этого способа можно выполнять операции как предварительной, так и доводочной обработки. Наиболее целесообразно его использовать для обработки плоскостей. Применяемое для этого метода оборудование отличается простотой обслуживания,

## 6.6. Режимы шлифования и заточки инструмента из ПСТМ

Вид обработки	Характеристика круга			Режимы обработки				Параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra$ , мкм
	Связка	Марка алмаза	Зернистость	Скорость		Подача		
				Круга, м/с	Вращения изделия, м/мин	Поперечная, мм/дв.ход	Продольная, м/мин	
Бесцентровое шлифование	M1-04	AC6	125/100	30...40	—	0,07...0,10	—	1,2...1,6
	M1-01 M20							
Плоское шлифование	M1-04	AC6 AC4	125/100...200/160	10...20	—	0,02...0,03	1,0...1,5	0,3...0,4
	M1-01 M20							
Заточка	M1-03	AC6 AC4	125/100...200/160	20...30	—	0,02...0,03	1,5...2,0	0,6...0,8
	TM2 MBK							
Круглое наружное шлифование	B2-01	AC6 AC4	125/100...200/160	15...35	0,2...0,5	0,02...0,03	0,1...0,3	0,8...1,2
	B1-01 B1-03							
Заточка	B1-10	агрегативные тирыванные	125/100...200/160	20...30	—	0,02...0,03	1,0...1,5	0,6...0,8
	B1-02							

Предварительная обработка

Окончание табл. 6.6

Вид обработки	Характеристика круга			Режимы обработки				Параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra$ , мкм
	Связка	Марка алмаза	Зернистость	Скорость		Подача		
				Круга, м/с	Вращения изделия, м/мин	Поперечная, мм/дв.ход	Продольная, м/мин	
<i>Чистовая обработка</i>								
Бесцентровое шлифование	M1-04	АС6	63/50...100/80	30...40	—	0,03...0,05	—	0,4...0,8
	M1-01	АС4						
Плоское шлифование	—	—	—	15...25	—	0,01...0,02	1,0...1,5	0,1...0,2
	—	—	—	25...35	—	0,01...0,02	0,5...1,0	
Заточка	—	—	—	15...35	0,2...5,0	0,01...0,02	0,1...0,2	0,4...0,8
Круглое наружное шлифование	V2-01	АС4	50/40...80/63	20...30	—	0,01...0,02	0,2...0,5	0,2...0,6
	V1-01	АС2						
Заточка	V1-03	АС6						
	V1-10	АС6						
<i>Доводочная операция</i>								
Круглое наружное шлифование	V2-01	АСН	10/7...40/28	20...30	0,1...1,0	0,005...0,015	0,1...0,2	0,05...0,15
	V3-01	АСМ						
Заточка	V2-01	АСН	10/7...40/28	20...30	—	0,005...0,010	0,2...0,5	0,05...0,15
	V3-01	АСМ						

## 6.7. Обрабатываемость различных марок поликристаллов

Марка ПСТМ	Относительный расход алмаза, мг/мг	Производительность обработки, м <sup>3</sup> /мин
АСПК	5,0...16,0	0,5...6,0
АСБ	4,0...14,0	0,2...0,65
Карбонит	3,0...10,0	0,4...15,0
БПА	1,7...7,6	0,7...10,0
Композит 01	0,2...0,3	20,0...160,0
Композит 05	0,1...0,2	30,0...200,0
Композит 10	0,2...0,4	60,0
ПТНБ	0,2...0,4	25,0...140,0
Киборит	0,3...1,5	15,0...50,0

компактностью, не требует рабочих высокой квалификации, позволяет осуществлять многостаночную обработку.

Для реализации метода обработки ПСТМ свободным абразивом достаточно оснастить соответствующий притирочный или доводочный станок кассетами для укладки заготовок из ПСТМ. Образующийся при работе шлам легко поддается рекуперации и алмазный порошок может повторно использоваться.

Для предварительной обработки ПСТМ свободным абразивом на притирочно- и шлифовально-полировальных станках применяются алмазные порошки АС6 100/80...АСН 40/28, для окончательной — АСМ 28/20...5/3. Алмазный порошок в зону обработки подается в суспензии. В качестве суспензии используют смесь глицерина, жидкого масла с алмазным порошком соответствующей марки и зернистости. Объемная концентрация алмазного порошка в суспензии составляет 2 %. Для выполнения операции шлифования ПСТМ с помощью свободного абразива используют чугунные притиры. Суммарное усилие прижима притиров 300...1500 Н.

При доводке ПСТМ алмазными порошками указанной зернистости обеспечивается шероховатость поверхности  $Ra$  0,1...0,2.

Эффективность обработки свободным абразивом может быть значительно увеличена путем наложения механических колебаний ультразвуковой частоты.

**Доводка СТМ.** Одной из главных задач при разработке технологических процессов изготовления инструмента из СТМ, предназначенного главным образом для финишной обработки, является образование режущего лезвия высокого качества — с минимальной величиной зазубрин и выкрашиваний. Для преобладающего большинства случаев финишной обработки в машиностроении величина этих дефектов, как показывает практика, не должна превышать 5 мкм. При этом обеспечивается шероховатость обработанной поверхности деталей  $Ra\ 0,32...1,25$ .

Немаловажным является также шероховатость передней и задней поверхностей резца. Снижение шероховатости рабочей поверхности до значений менее  $Ra\ 0,1...0,2$  уменьшает силы трения, развивающиеся в процессе резания, понижает интенсивность адгезии при контактировании инструмента и изделия в зоне резания.

Доводочные операции в большинстве случаев целесообразны для инструмента, используемого при чистовых, получистовых и черновых операциях. Доводка обеспечит повышение прочности и долговечности режущих лезвий.

Доводочные операции необходимы также для обеспечения высокой точности режущих элементов. Особое значение это имеет для многолезвийного инструмента и инструмента с механическим креплением режущих элементов.

По возможности доводку при изготовлении и переточках инструмента с использованием алмазных кругов рекомендуется проводить только по узким фаскам с минимальной площадью контакта.

Для получения высококачественного лезвия инструмента рекомендуется проводить доводку мелкозернистым инструментом при сравнительно мягких режимах.

Доводку резцов из природного алмаза выполняют на чугунном притире, шаржированном алмазным порошком АСМ зернистостью 7/5...10/7.

Обычно резцы, изготовленные из кристаллов природного алмаза с октаэдрической формой и направлением доводки по передней поверхности перпендикулярно режущей кромке, имеют пониженную стойкость. Для повышения стойкости алмазных резцов

целесообразно режущую кромку резца в кристалле располагать таким образом, чтобы при эксплуатации направление сходящей стружки и действие сил резания совпадало с направлением наибольшей твердости кристалла. Угол между режущей кромкой и «мягким» направлением или направлением доводки алмазного резца целесообразно принимать ближе к величине  $90^\circ$ . Экономически целесообразно применять алмазные резцы с углом доводки по передней грани  $20^\circ$ . Направление обработки кристалла должно идти навстречу режущей кромке, чтобы обеспечить отсутствие сколов на ней.

Указанные условия имеют значение как для использования инструмента при непрерывном, так и при прерывистом резании.

Формы лезвий инструмента из природного алмаза представлены на рис. 6.25.

Технологический процесс обработки режущих лезвий инструмента в общем случае включает в себя три операции: черновую, чистовую и доводку. При выполнении этих операций следует применять алмазный инструмент (порошок) с последовательно уменьшающейся зернистостью. Особенно это важно для получения режущих лезвий без выкрашиваний.

Радиус округления режущих кромок при доводке инструмента, оснащенного поликристаллами наиболее часто используемых марок, выбирается в пределах  $4\text{...}10$  мкм.

На рис. 6.25, б представлена фотография качественно обработанной режущей кромки многогранной пластины из ПСТМ на основе cBN.

**Станки и приспособления для шлифования, заточки, доводки.** В связи с повышенной чувствительностью инструментов из ПСТМ

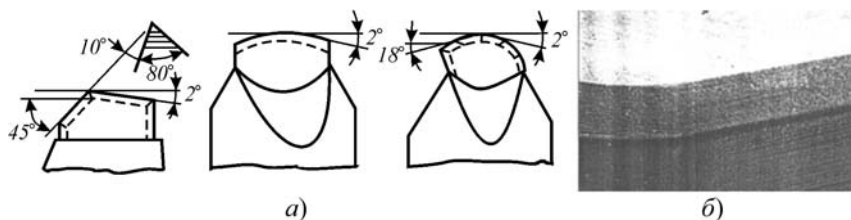


Рис. 6.25. Формы лезвий инструмента из природного алмаза (а) и режущая кромка пластины из ПСТМ на основе cBN Amborite (б)

к вибрациям и ударным нагрузкам, к станкам, используемым для обработки режущих элементов из ПСТМ, предъявляются повышенные требования в отношении точности, виброустойчивости и жесткости (табл. 6.8).

### 6.8. Требования, предъявляемые к станкам для обработки ПСТМ

Параметр	Значение
Биение шпинделя при работе, мкм	
Радиальное:	
торцом круга	5...8
периферией круга	2,5...6,0
Осевое:	
торцом круга	3...5
периферией круга	5...8
Амплитуда, мкм	
Колебаний шлифовальной головки относительно изделия:	
по оси шпинделя	5...8
нормально к оси	15
Вибраций на холостом ходу	5...15
Допустимое смещение, мкм	
Центра тяжести для шпинделя в сборе	1...2
Алмазного круга с оправкой	3...5
Жесткость, кН/мм	Не менее 15

По точности станки должны соответствовать следующим классам:

- для предварительной и чистовой обработки — повышенной точности (П) и частично высокой точности (В);
- для доводки — повышенной точности (П), высокой точности (В) и частично особо высокой точности (А).

Уменьшение вибраций станка достигается за счет тщательной динамической балансировки вращающихся деталей станка, применения клееных или бесшовных ремней, использования высокоточных подшипников класса С, гидро- и аэростатических подшипни-

ков скольжения, динамической балансировки электродвигателя и установки его на отдельном виброустойчивом фундаменте, установки станка на изолированном от источника вибрации фундаменте или пневмоопорах, тщательной балансировки шлифовальной оправки с кругом.

Диапазон чисел оборотов шпинделя станка должен обеспечить рекомендуемые окружные скорости кругов, а механизм поперечной подачи стола — малые (тонкие) подачи (0,001...0,005 мм/дв.ход). Станки рекомендуется оборудовать механизмами для автоматической продольной и поперечной подачи стола.

Необходимо, чтобы станки, предназначенные для обработки поликристаллов алмазными кругами, имели систему охлаждения и защиту от разбрызгивания охлаждающей жидкости. Для обеспечения высоких классов чистоты обработанной поверхности станки должны оснащаться фильтрами тонкой очистки охлаждающей жидкости.

Для повышения долговечности и точности станков все основные механизмы, подшипниковые узлы и направляющие, а также шлифовальные головки должны иметь эффективные средства защиты от попадания абразивной пыли и охлаждающей жидкости.

Современные станки для заточки режущих пластин представляют собой сложные роботизированные комплексы, совмещающие в себе функции формообразования, контроля точности обрабатываемого изделия, а также правки шлифовального инструмента (примером является станок для обработки сменных многогранных неперетачиваемых пластин INSERT LINE фирмы EWAG). Станок выполнен с применением наиболее передовых технологий — гидростатические направляющие в сочетании с прямым приводом шпинделя способствуют повышению точности изготавливаемого инструмента, а интеграция в контур станка робота-манипулятора с шестью независимыми осями вращения — высокой степени автоматизации процесса и производительности производства.

Станок позволяет изготавливать режущие пластины любых форм и типоразмеров из различных инструментальных материалов: режущей керамики, твердого сплава, cBN с учетом их конструктивных и геометрических особенностей — фасок, наличием или отсутствием центральных отверстий и т.п. Это достигается применением специальных высокоточных, оснащенных собственным приводом,



систем крепления и позиционирования разнотипных пластин. Точность размеров и форм изделия обеспечивается 3D щуповой системой контроля непосредственно в процессе изготовления.

Станок ориентирован на массовое производство, поэтому на нем реализована технология высокоскоростной обработки за счет возможности установки шлифовальных кругов большого диаметра — до 500 мм и высоких (до 3200 об/мин) частот вращения шпинделя. Опционально также поставляется лазерное устройство маркировки изделий.

Большое внимание уделено разработчиками интерфейсу системы ЧПУ. Он основан на интуитивно понятных алгоритмах (The human machine interface — HMI) ввода управляющих программ с высокой степенью визуализации как особенностей готового изделия, так и самого процесса обработки, включая его 3D-симуляцию. В готовом виде в базу данных комплекса входят программы изготовления режущих пластин всех типоразмеров по стандарту ISO.

Для применения прогрессивных способов обработки СТМ и инструмента из них, станки, отвечающие основным требованиям, но не предназначенные специально для выполнения операций по шлифованию, заточке и доводке инструмента из СТМ, целесообразно модернизировать.

Модернизированные станки должны обеспечивать:

1. Поджим детали к кругу, продольную и поперечную подачу посредством гидравлических устройств, обладающих достаточной демпфирующей способностью: усилие прижатия определяется исходя из необходимости создания нормальных давлений до  $200...250 \text{ Н/см}^2$  с учетом площади шлифуемых поверхностей. При этом в других конструктивных решениях должны обеспечиваться плавность хода механизмов и их виброустойчивость.

2. Регулировку силы и напряжения тока в цепях управления и шлифования при использовании кругов на токопроводящих связках. Иногда целесообразно регулировать и стабилизировать плотность тока, а напряжение рассматривать как ее функцию.

3. Жесткость и надежность существующих конструкций с учетом нового, более значительного прижимного усилия или повышенных усилий резания, которые могут возникнуть в результате увеличения мощности двигателей вращения шпинделей станков.

4. Уменьшение вероятности проскальзывания ременной передачи главного привода и чрезмерного снижения оборотов шпинделя под нагрузкой.

При модернизации станков для работы с использованием средств, обеспечивающих непрерывное управление режущей способностью круга, станки оснащают источниками постоянного или импульсного тока, системой подачи электролита, специальными устройствами подачи электрода для взаимодействия с рабочей поверхностью алмазного круга. Регулирование подачи электрода на круг может осуществляться различными способами, например при помощи блоков регулирования тока в цепи управления, а в случае необходимости — и в цепи шлифования. Для воздействия электрического тока на процесс шлифования ток должен подводиться непосредственно к вращающемуся алмазному кругу (к корпусу круга или к планшайбе, на которой закреплен круг) и к электроду. В случае совместной обработки СТМ и материала державки в качестве электрода (в цепи шлифования) может служить обрабатываемое изделие. Изолировать достаточно только алмазный круг (планшайбу с алмазным кругом) или электрод, служащий в данном случае катодом.

Токоподводящее устройство должно быть простым конструктивно и технологичным в изготовлении и установке на станок. Следует избегать такого подключения токоведущих шин, при котором ток протекает через подшипники станка, вызывая их преждевременное эрозионное разрушение. Допускается подвод тока к вращающимся частям шпинделя станка, на котором устанавливается алмазный круг. При модернизации может изолироваться шпиндельная головка от станины станка, что также обеспечивает необходимые условия для протекания электрохимических и электроэрозионных процессов при шлифовании.

Универсально-заточные станки, имеющие ручную продольную и поперечную подачи, целесообразно оборудовать устройствами, механизующими эти подачи. Такая модернизация может быть осуществлена путем оснащения универсально-заточных станков гидроприводом с выносной насосной станцией, включающей в себя насос типа Г12-41 (давление 0,063 кПа, расход рабочей жидкости 8 г/мин, потребляемая мощность 1,7 кВт, частота вращения 1440 мин<sup>-1</sup>). В гидравлической системе используется индустриаль-

ное масло 30. Регулировка продольной подачи производится дросселем, а поперечной — храповым устройством.

Для шлифования торцовых плоскостей круглых пластин из поликристаллов на основе алмаза плоскошлифовальные станки типа ЗГ71 целесообразно модернизировать так, чтобы имелась возможность шлифования изделий торцом чашечного круга. Такая схема обработки обеспечивает более высокое качество изделий из ПСТМ, чем обработка периферией круга прямого профиля.

Для заточки режущих пластин из поликристаллов универсально-заточные станки моделей ЗА64Д, ЗВ642, ЗА64М и другие с ручной продольной и поперечной подачей оборудуются специальным устройством для осцилляции стола станка, обеспечивающим плавную продольную подачу с ходом стола 0...10 мм и бесступенчато регулируемую скорость перемещения 0,1...1,0 м/мин. Поперечное перемещение стола механизировано благодаря оснащению его храповым механизмом, укрепленным на винте поперечной подачи стола.

Применяемые для шлифования и заточки паяного инструмента из ПСТМ приспособления принципиально не отличаются от используемых для обработки инструмента из твердых сплавов.

Для широкого применения инструмента с механическим креплением режущих элементов разработаны типовые технологические процессы шлифования и заточки режущих пластин из поликристаллов.

В связи с тем, что промышленность стран СНГ не выпускает специального оборудования для шлифования и заточки режущего инструмента из ПСТМ, используются универсальное модернизированное оборудование и специальные приспособления.

**Типовая технология шлифования и заточки многогранных непере-  
тачиваемых режущих пластин из ПСТМ на модернизированных стан-  
ках.** Заготовки пластин из поликристаллов диаметром 7...8,5 мм подвергают предварительной обработке. На шлифовально-полировальных станках проводится многопозиционное шлифование пластин по торцовым плоскостям свободным абразивом — шлифовальными алмазными порошками зернистостью АСН 60/40, АС6 50/40. После этого пластины обрабатываются по наружному диаметру на бесцентрово-шлифовальной станке кругами на металлических связках М04 с алмазом марки АС6 зернистостью 100/80...125/100.

Чистовое шлифование торцов пластин проводится на плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71. Для предотвращения ударов и вибраций процесс групповой обработки режущих пластин осуществляется при постоянном контакте шлифовального круга и поликристаллов. Шлифование проводится алмазными кругами чашечной формы (связка металлическая) на модернизированном станке с вертикальной осью вращения шпинделя. Станок оснащен источником технологического тока и специальным приспособлением, которое осуществляет постоянный прижим правящих электродов к рабочей поверхности круга. В качестве электродов используются алмазосодержащие бруски на металлической связке. Сила прижима бруска 20...30 Н. Ток от источника подводится к алмазному кругу при помощи графитовых щеток, находящихся в контакте с бронзовой втулкой, насаженной на оправку алмазного круга. Непрерывная электроэрозионная правка рабочей поверхности алмазного круга необходима для поддержания его режущей способности. Для крепления пластин при шлифовании применяют многоместные приспособления.

Предварительная и чистовая заточка задней поверхности режущих пластин круглой формы проводится на универсально-заточных станках при использовании специального приспособления. Оно представляет собой плиту, на которой крепится поворотный корпус, имеющий два соосновращающихся шпинделя (один неподвижный в осевом направлении, а другой — подвижный). Обрабатываемая пластина крепится между двумя шпинделями с помощью прижимов. Частота вращения шпинделя составляет 100 мин. Для центрирования заготовки с заданной точностью приспособление снабжено специальным устройством. В том случае, когда на станке предусмотрена плавная продольная подача стола на длине хода 5...10 мм, стол имеет устройство для осцилляции, позволяющее бесступенчато регулировать скорость перемещения стола от 0,1 до 1,2 м/мин. Устройство представляет собой электродвигатель с редуктором, на выходном валу которого насажен эксцентрик — вращение его обеспечивает возвратно-поступательное движение стола. Поперечное перемещение стола осуществляется с помощью храпового механизма. В комплект приспособления для заточки включается также специальное устройство для доводки пластин по передней поверхности. Устройство оснащается кассетой, в кото-

рую устанавливается пять заготовок. Кассета обеспечивает поджатие пластин к алмазному кругу.

Для обеспечения равномерного износа алмазоносного слоя круга по его ширине кассета с заготовками приводится во вращение. Обработка задней поверхности круглых пластин может также осуществляться на универсальных круглошлифовальных станках с помощью приспособлений, аналогичных описанным выше. Заточка задней поверхности и доводка передней проводятся алмазными кругами на органической связке.

Рабочая поверхность кругов подвергается периодической или непрерывной правке абразивными брусками или кругами из электрокорунда и карбида кремния зеленого на керамической связке.

Бруски и круги для правки должны быть равной зернистости или на один-два номера больше, чем алмазные круги. Твердость брусков, применяемых для ручной правки — М1, М2, брусков и кругов для механической правки — СМ1-С1.

При правке абразивными жестко закрепленными брусками продольная подача составляет 1...2 м/мин, поперечная — 0,01...0,02 мм/дв.ход.

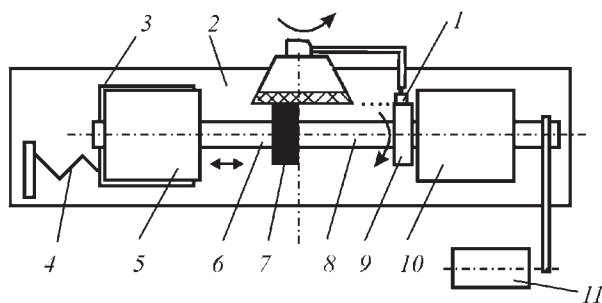
Правка кругами методом шлифования проводится с помощью специальных приспособлений при скорости вращения абразивного круга 10...35 м/с, продольной подаче 1,5...2 м/мин, поперечной подаче 0,005...0,2 мм на 3...6 дв. ход.

Непрерывная правка кругов на органической связке абразивными брусками осуществляется при помощи несложных приспособлений, обеспечивающих постоянный упругий прижим бруска к кругу.

Технические средства, используемые для заточки и доводки задней поверхности, применяются как при изготовлении пластин, так и для переточки при их эксплуатации.

Для обработки многогранных пластин на универсальном оборудовании разработан ряд приспособлений. Многоместные приспособления предназначены для предварительной обработки граней многогранных пластин.

Для окончательной обработки многогранных пластин по контуру разработано специальное приспособление (рис. 6.26). На плите 2, устанавливаемой на столе универсально-заточного станка, монтируется подвижная подпружиненная каретка 3, на которой



**Рис. 6.26. Приспособление для обработки многогранных пластин:**

1 — упор; 2 — плата; 3 — подвижная каретка; 4 — пружина; 5 — корпус прижима; 6 — ведомый прижим; 7 — режущая пластина; 8 — прижим; 9 — копир; 10 — электродвигатель

крепится корпус 5 с подвижным в осевом направлении ведомым прижимом 6. Ведомый прижим может свободно вращаться вокруг своей оси. На каретке также крепится корпус ведущего, неподвижного в осевом направлении прижима 8. На валу этого прижима устанавливается копир 9, имеющий форму многогранной пластины. Подпружиненный упор 1, жестко связанный с шлифовальным кругом, прижимается при обработке к вращающемуся копиру, обеспечивая тем самым воспроизведение его формы на режущей пластине. Ведущий прижим приводится во вращение электродвигателем через редуктор и клиноременную передачу.

При использовании этого приспособления вначале проводится окончательная обработка граней режущей пластины, а затем обрабатываются вершины многогранной пластины из ПСТМ.

Процесс окончательной обработки многогранных пластин по контуру аналогичен процессу заточки круглых пластин по задней поверхности.

Низкая обрабатываемость сверхтвердых поликристаллических материалов требует особой тщательности при разработке технологических процессов шлифования, заточки и доводки инструмента с рабочей частью из ПСТМ. Необходимо стремиться к созданию условий для постоянного контакта обрабатываемого изделия и алмазно-абразивного инструмента. Без выполнения этого условия чрезвычайно затруднительно обеспечивать плоскостность изделий и высокое качество режущих кромок.

На операциях плоского шлифования при одновременной обработке большого количества заготовок из поликристаллов, когда их крепление затруднено, может быть использован способ заливки заготовок легкоплавкими сплавами (висмут — 50 %, олово — 25 %, свинец — 25 %, температура плавления — 110 °С) или другими составами, быстро твердеющими и достаточно прочными для удержания заготовок.

В связи с высокой стоимостью режущих пластин из ПСТМ, применяемых для оснащения фрез и резцов, существуют различные системы переточки таких пластин. К ним относится, в частности, переточка фрезерных пластин из ПСТМ по системе внутреннего контура. При этом после износа новой пластины производится до шести переточек с уменьшением размера сторон пластины при каждой переточке на 0,1 мм. При первоначальном размере пластины 12,7 мм после шести переточек ее размер составляет 12,1 мм. Количество переточек отмечается условным знаком, поэтому легко определить, какой размер имеет та или иная пластина.

### **6.3. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ С РЕЖУЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СТМ**

#### **6.3.1. Инструменты с режущими элементами из природного алмаза**

Геометрические параметры алмазного инструмента во многом определяются специфическими свойствами кристаллов природного алмаза.

Монокристаллы алмаза обладают ярко выраженной анизотропией и высокой хрупкостью, однако режущие кромки инструментов должны обладать повышенной прочностью. С целью упрочнения режущей кромки алмазного инструмента его угол заострения должен быть максимально допустимым с точки зрения процесса резания (не менее 90°). При меньшем угле заострения получить режущую кромку необходимого качества и достаточной прочности очень сложно.

Геометрические параметры алмазного инструмента при точении цветных металлов и сплавов, полимерных композиций приведены в табл. 6.9. При этом следует иметь в виду, что большее значение

заднего угла принимается для более мягкого обрабатываемого материала.

### 6.9. Геометрические параметры алмазных резцов

Обрабатываемый материал	Передний угол $\gamma$ , град	Задний угол $\alpha$ , град	Радиус при вершине $R$ , мм
Алюминиевые сплавы	0...5	8...15	0,5...1,0
Латунь	0...5	6...10	0,5...0,8
Бронза	0...(-5)	6...10	0,2...0,5
Титан	0...(-2)	8...10	0,5...0,8
Текстолит	0...5	10...15	0,5...1,0
Эбонит	0...5	8...12	0,3...0,8

Величина переднего угла должна обеспечивать величину угла заострения около  $90^\circ$ . Угол в плане инструмента, работающего на врезание, определяется конфигурацией обрабатываемой детали.

В зависимости от требований, предъявляемых к обработанным поверхностям, конфигурации и размеров деталей применяют обработку на врезание или на проход.

Влияние вида обработки на геометрические параметры инструмента отражено в табл. 6.10. При этом необходимо учитывать, что при работе на врезание задний угол выполняется на фаске шириной 0,1...0,4 мм, а отрицательный передний угол — на фаске шириной до 0,6 мм.

Угол заострения инструмента из природного алмаза принимается в зависимости от обрабатываемого материала (табл. 6.11).

В процессе приработки контактирующих тел реализуются энергетические закономерности процесса износа, заключающиеся в стабилизации геометрических параметров тел. Поэтому задавая режущему инструменту форму, соответствующую приработанному состоянию, можно существенно повысить его работоспособность за счет снижения интенсивности изнашивания, уменьшить энергетические затраты на процесс резания.



### 6.10. Геометрические параметры алмазных инструментов для различных видов обработки

Геометрические параметры	Обработка	
	На врезание	На проход
Передний угол $\gamma$ , град	(-8)...(-15)	0...(-5)
Задний угол $\alpha$ , град	2...4	6...15
Главный угол в плане $\varphi$ , град	30...90	
Вспомогательный угол в плане $\varphi_1$ , град	2...45	
Радиус при вершине $R$ , мм	0,2...1,0	

### 6.11. Углы заострения алмазных резцов

Угол заострения $\beta$ , град	Обрабатываемый материал
90	Твердая латунь, бронза, цинк, антрацит, графит, пластик с абразивными наполнителями
84	Поршневые Al-Si сплавы, алюминиевые литейные сплавы, Mg-Al сплавы, медь, латунь, свинцовистая бронза, платина, мельхиор, предварительно спеченные твердые сплавы, терморезистивные пластмассы
78	Электrolитическая медь, чистый алюминий, золото, серебро, термопласты

Для обеспечения чистоты обработанной поверхности до  $Ra$  0,1 при работе на врезание режущая кромка инструмента не должна иметь сколов. Получение такой кромки возможно в том случае, или передняя и задняя поверхность инструмента обработаны до шероховатости  $Ra$  0,01...0,015.

На формирование обработанной поверхности при точении на проход основную роль играет вершина инструмента в плане — ее радиус, углы в плане и величина подачи. При обработке на врезание

большее значение имеет состояние режущей кромки инструмента — радиус округления, наличие дефектов и т.д.

Особенности процесса резания алмазными лезвийными инструментами определяются физико-механическими свойствами и структурой алмаза: низким коэффициентом трения по обрабатываемым материалам, высокими значениями тепло- и температуропроводности, обеспечивающими сравнительно низкие температуры в зоне резания и позволяющими проводить обработку на высоких скоростях резания; малыми значениями радиуса округления режущих кромок (до 0,05 мкм); малыми силами резания по сравнению с силами при точении резцами из других инструментальных материалов (тангенциальная сила  $P_z$  меньше в 1,5–3 раза, радиальная сила  $P_y$  — в 3–12 раз); высокой износостойкостью, обеспечивающей размерную стойкость и длительную работу инструмента без подналадок.

Исследования коэффициента трения алмаза по разным материалам показали, что он имеет различные значения в зависимости от направления скольжения, связанные с анизотропией свойств по кристаллографическим направлениям. Значения коэффициентов трения по некоторым материалам приведены в табл. 6.12.

### 6.12. Коэффициенты трения инструментальных материалов

Материал контртела	Коэффициент трения	
	Природный алмаз	ПСТМ
Медь	0,05...0,07	0,10...0,22
Латунь	0,05...0,07	0,10...0,24
Дуралюмин	0,06...0,07	0,10...0,25
Магниевый сплав	0,06...0,08	0,12...0,26
Сталь	0,08...0,10	0,11...0,30
Титановый сплав	0,40	—

Значения коэффициента трения для природного алмаза существенно ниже, чем для синтетических поликристаллов и твердых

сплавов. Как известно, коэффициент трения зависит от природы контактирующих материалов. Для более активных металлов, таких как титан, адгезионные связи за одинаковое время успевают возникнуть на большей площади контактной поверхности, что обуславливает увеличение силы трения, способствует росту заторможенного слоя и, как результат, возникновению внутреннего трения на контактных поверхностях, с характерным для него высоким значением коэффициента трения.

При обработке цветных металлов инструментами из алмаза коэффициент трения имеет низкие значения и практически остается неизменным при увеличении скорости резания более 33,0 м/с. Исключения составляют Ti, Zr и некоторые другие металлы, в контакте с которыми поверхность алмаза покрывается прочно удерживающейся пленкой трущегося металла, что исключает внешнее трение. По этой причине при обработке титана на контактных участках инструмента реализуется внутреннее трение, а удельная работа трения составляет до 74 % от всей работы резания.

Уровень сил резания при алмазном точении значительно ниже, чем при обработке другими инструментами. При малых сечениях среза сила  $P_y$  может быть больше силы  $P_z$ , так как при малых толщинах среза процесс резания предопределяется силами на задней поверхности инструмента, т.е. работой трения. Это объясняет превалирующее изнашивание инструмента по задней поверхности. Важной особенностью алмазного точения является сравнительно малое изменение сил резания при износе инструмента, что определяется малым изменением величины радиуса округления режущей кромки при износе инструмента. В связи с тем что в процессе работы площадка износа по задней поверхности резца увеличивается быстрее, чем сила, давление на задней поверхности с износом инструмента снижается.

С ростом скорости резания до 2,5...3,3 м/с происходит уменьшение сил резания, связанное со снижением интенсивности образования заторможенного слоя металла на передней поверхности инструмента. В дальнейшем с увеличением скорости резания силы резания стабилизируются или изменяются незначительно. Увеличение глубины резания практически прямолинейно связано с ростом сил резания.

Меньшая, в сравнении с обработкой другими материалами, работа резания при алмазном точении предопределяет и меньшее тепло-

выделение. Высокая теплопроводность алмаза обеспечивает малые температуры в зоне резания при точении цветных металлов. При практически используемых скоростях резания средняя температура в зоне резания редко превышает 473...523 К. Исключение составляют титановые сплавы, при точении которых температура в объеме обрабатываемого материала достигает 973 К. Наибольшее влияние на температуру оказывает скорость резания. Основным источником теплоты при алмазной обработке является трение на задней поверхности инструмента. При точении цветных металлов низкое тепловыделение и малый нагрев детали и инструмента позволяют вести обработку с максимальной точностью. В обрабатываемом материале не происходят структурно-фазовые превращения.

При точении титановых сплавов температура нагрева также не достигает значений, при которых начинаются структурно-фазовые изменения в обрабатываемом материале.

Для сравнения следует отметить, что в случае применения инструмента из твердого сплава, температура на передней и задней поверхностях соответственно на 62 и 34 % выше.

Баланс теплоты для случая точения титанового сплава инструментом из алмаза и твердого сплава соответственно: в резец 71 и 49 %, в стружку 28,7 и 47 %, в изделие 0,3 и 4 %.

Таким образом, при алмазном точении в изделие поступает значительно меньше теплоты, чем при точении твердым сплавом. Это создает основу для получения малых температурных деформаций изделий в процессе обработки. При этом большая доля тепла, отводящегося в инструмент, не приводит к снижению точности изделия вследствие малого температурного коэффициента линейного расширения алмаза.

Относительно низкие средние температуры, соответствующие процессу обработки, определяют значительный резерв варьирования условиями резания.

Применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) снижает температуру резания на 25...50 %. Различные составы СОТС по-разному влияют на температуру в зоне резания. Снижая температуру обработки, СОТС расширяют возможный диапазон скоростей резания и стойкости алмазного инструмента.

Кроме того, СОТС частично или полностью устраняет влияние сил адгезии на контактных участках инструмента, уменьшая интен-

сивность образования заторможенного слоя и снижая силу трения стружки о переднюю поверхность алмазного резца. Поэтому во многих случаях большее значение имеет не охлаждающая, а смазывающая способность среды. К таким средам относятся масла низкой вязкости.

Зависимость высоты микронеровностей обработанной поверхности от условий точения алмазным резцом имеет экстремальный характер. Увеличение шероховатости поверхности при малых значениях скорости резания и подачи связано с интенсификацией процесса образования и срыва нароста, а также вырыванием частиц обрабатываемого материала со стороны задней поверхности инструмента.

Износостойкость алмазных резцов неодинакова при обработке различных материалов, условно разделяемых на четыре группы.

При обработке *материалов первой группы* (меди, латуни, магния, драгоценных металлов, бронзы, алюминия, полимерных композиций, не имеющих абразивных включений и т.д.) резцы выходят из строя в результате длительного адгезионного изнашивания, а также случайных причин — динамического воздействия вибраций, ударов, случайных включений в материале и др.

Наиболее благоприятными свойствами с точки зрения минимизации износа инструмента при обработке среди материалов первой группы обладают медные покрытия, полученные гальваническим путем.

*Материалы второй группы* (медные и алюминиевые сплавы, полимерные композиционные материалы, содержащие в себе твердые и абразивные частицы и др.) обрабатываются с медленным износом инструмента, связанным с абразивным и адгезионным взаимодействием контактирующих материалов. Износ инструмента при обработке материалов этой группы не связан с повышением температуры в зоне резания.

Характерной особенностью износа алмазных резцов при обработке материалов первой и второй групп является слабое влияние скорости резания на износ инструмента. Износ определяется длиной пути резания. Зависимость, связывающая величину износа инструмента по задней поверхности  $h_3$  при точении меди с длиной пути резания  $L$  имеет вид [6]:

$$h_3 = 0,00042 L^{0,537}. \quad (6.4)$$

Следует иметь в виду, что при алмазном точении меди преобладает износ по задней поверхности, а при точении алюминия инструмент изнашивается и по передней поверхности.

К *третьей группе материалов* относятся титан, цирконий, их сплавы, вольфрам, твердые сплавы, обработка которых связана с возникновением высоких температур в зоне резания 873...973 К.

В *четвертую группу материалов* входят железо, никель, кобальт и другие, активно взаимодействующие с углеродом металлы и металлы, в которых углерод растворяется.

При работе врезанием любые изменения режущей кромки алмазного инструмента переносятся на обработанную поверхность в негативном отображении. В процессе обработки в дефекты на инструменте (микротрещины, сколы и т.д.) набивается уплотненный металл, который прочно удерживается их неровностями. Уплотненный материал в микротрещине режущей кромки резца начинает деформировать более мягкий обрабатываемый материал и вызывает появление кольцевых рисок, ширина которых равна ширине микродефекта на кромке.

Обычно сколам на режущей кромке сопутствуют микротрещины, направленные в тело резца.

Разрушение алмазных резцов происходит по следующей схеме: вначале образуются микротрещины на режущей кромке, затем в образовавшийся дефект попадают микрочастицы обрабатываемого материала, которые, накапливаясь, будут оказывать расклинивающее действие и увеличивать величину микротрещин, что вызовет еще большее накопление микрочастиц металла, скапливающегося у режущей кромки. При достижении определенной величины часть этих частиц скалывается, унося с собой микрочастицы алмаза.

Несмотря на высокую плотность алмаза, низкие коэффициент трения и адгезионную способность, высокую чистоту рабочих поверхностей в процессе резания в интервале скоростей резания от 0,13 до 8,3 м/с, на передней поверхности резца образуется заторможенный слой и нарост. Наиболее интенсивно они образуются при скоростях резания до 2,7 м/с.

Прочность сцепления заторможенного слоя металла очень высока и удаление его с передней поверхности алмазного резца возможно только растворением в 15 %-ном растворе  $\text{HNO}_3$ . После удаления заторможенного слоя с передней поверхности резца не удастся обна-

ружить каких-либо следов изменения поверхности. Это свидетельствует о том, что заторможенный слой металла на поверхности алмазного резца удерживается за счет сил адгезии.

Периодические срывы нароста способствуют интенсификации износа инструмента, что связано с резким перераспределением напряжений в поверхностном слое инструмента в момент срыва нароста и заторможенного слоя.

Уменьшению интенсивности образования заторможенного слоя способствует применение СОТС — масел низкой вязкости, которые уменьшают трение стружки о переднюю поверхность инструмента и уменьшают интенсивность адгезии между металлом и алмазом. Применение СОТС уменьшает интенсивность образования заторможенного слоя и нароста в 1,25–1,8 раза.

При обработке с ударом интенсивность образования сколов и микротрещин на режущей кромке резца увеличивается в 10 и более раз. В этих условиях преобладает выкрашивание режущей кромки не за счет адгезии, а за счет воздействия ударной нагрузки.

Если при обработке металлов первой и второй групп износ инструмента определяется относительно слабым адгезионным и абразивным взаимодействием, появлением отдельных сколов и микротрещин на режущей кромке, то при обработке материалов третьей и четвертой групп износ инструмента характеризуется интенсивным адгезионным взаимодействием, а также диффузией углерода в обрабатываемый материал. Для износа алмазного инструмента при точении металлов четвертой группы с высокими скоростями резания имеет значение специфический вид износа — эвтектический.

Вид износа при обработке металлов четвертой группы зависит от структуры обрабатываемого материала. Так, при точении нержавеющей стали (аустенитная структура) наблюдается износ по задней поверхности инструмента при значительной адгезии контактирующих материалов. При фрезеровании нержавеющей стали износ инструмента по задней поверхности происходит значительно интенсивнее, однако адгезионное взаимодействие реализуется на отдельных участках контакта. При точении перлитно-ферритной стали имеет место износ инструмента по передней и задней поверхностям резца. Наиболее сильно износ протекает по задней поверхности резца. Износ по передней поверхности качественно аналогичен износу инструмента при точении цветных металлов и сплавов с абра-

живными включениями. Однако износ при обработке стали более интенсивный, что позволяет предположить наличие в ней твердых абразивных частиц, например, карбидов.

Износ алмазного резца при точении АРМКО-железа (ферритная структура) происходит только по задней поверхности, где адгезия имеет интенсивный характер. На передней поверхности наблюдается адгезионное разрушение обрабатываемого материала.

Наличие в обрабатываемом материале абразивных или других твердых частиц увеличивает интенсивность образования сколов на режущей кромке инструмента на 30...40 % и способствует округлению его режущей кромки.

В целом, в зависимости от обрабатываемого материала и условий обработки алмазный инструмент в процессе резания подвергается следующим видам износа: адгезионному, абразивному, диффузионному, эвтектическому, а также комбинированному, когда износ вызван одновременным действием нескольких видов износа.

Для *абразивного износа* характерно наличие на изношенной поверхности рисок, параллельных вектору скорости резания. Механизм абразивного износа состоит в том, что твердые включения в обрабатываемом материале, внедряясь в контактные поверхности инструмента, производят царапание и пропахивание инструментального материала. Учитывая, что при появляющихся при обработке цветных металлов температурах твердость алмаза меняется незначительно, абразивный износ инструмента минимален. Противоположная картина наблюдается при точении материалов с твердыми абразивными включениями и, в особенности, твердых сплавов на основе карбидов.

Поверхность алмазного резца, изношенная в результате *адгезионного* взаимодействия, имеет бугристый вид. Удаление инструментального материала с контрольных поверхностей происходит вследствие их среза и отрыва. Возникновению интенсивной адгезии при резании способствуют высокие давления в контакте и непрерывное движение свежесформированных ювенильных поверхностей обрабатываемого материала относительно поверхностей инструмента. Мерой адгезионного взаимодействия материалов является коэффициент адгезии, представляющий собой отношение усилия, необходимого для разъединения контактирующих материалов, к величине приложенной нагрузки.



По адгезионной способности к углероду все металлы разделяются на две группы. В первую группу, характеризующуюся сравнительно низкими температурами начала адгезии ( $0,4...0,5 T_{пл}$ ), попали все взаимодействующие с углеродом металлы и металлы, в которых углерод растворяется. Наименьшая относительная температура начала адгезионного взаимодействия зафиксирована для Zr и Mo, Fe, Ni, Co являются активными карбидообразующими элементами и характеризуются интенсивным адгезионным взаимодействием с алмазом. При этом взаимодействие с железом протекает наиболее интенсивно.

Для металлов группы Ib периодической таблицы элементов (медь, серебро), неактивных к углероду, характерны относительные температуры начала адгезионного взаимодействия  $0,7 T_{пл}$ .

Характер разрушения инструментального материала при адгезионном взаимодействии связан с отрывом частиц, срезом и усталостными явлениями на отдельных пятнах контакта. При обработке таких материалов, как титан и цирконий, на поверхности алмаза интенсивно образуются налипы обрабатываемого материала значительной величины. С течением времени наблюдается непрерывное чередование образования налипов и удаления микрообъемов алмаза, вследствие чего растет площадка износа инструмента.

*Диффузионный износ* проявляется в образовании гладкой, полированной площадки износа алмазного инструмента. Объясняется это тем, что вследствие диффузионного растворения копируется микропрофиль поверхности резания или прирезцово́й стороны стружки. При обработке таких металлов, как железо, никель, кобальт, происходит значительное тепловыделение в зоне резания и достигаемых контактных температур достаточно для активизации диффузии углерода в обрабатываемый материал. Учитывая, что основным законом диффузии является параболический рост диффузионного слоя, показывающий, что начальный период диффузии характеризуется высокой скоростью растворения, времени контакта инструмента с отдельными участками обрабатываемого материала вполне достаточно для интенсивной диффузии. В течение нескольких секунд резания на алмазном резце образуется лунка на передней поверхности, а на задней поверхности резца появляется блестящая полоса износа.

Эксперименты подтверждают, что, начиная с температуры 1173 К, происходит интенсивное растворение углерода в стали.

В связи с тем что углерод имеет различную растворимость в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе, диффузионный износ инструмента при обработке различных материалов на основе железа изменяется в широких пределах.

Т.Н. Лоладзе предложил следующие экспериментальные зависимости для определения стойкости инструмента при резании, мин [13]:

$$\text{аустенита} \quad - \quad T = \frac{5,11 \cdot 10^{-3} e^{32840/Q}}{C_V^{0,5}}; \quad (6.5)$$

$$\text{феррита} \quad - \quad T = \frac{1,34 \cdot 10^{-2} e^{20110/Q}}{C_1 v^{0,5}}, \quad (6.6)$$

где  $C_1$  — массовая доля углерода продифундировавшего, соответственно в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железо, %;  $Q$  — температура резания, °С;  $v$  — скорость резания, м/с.

Расчет по приведенным формулам показывает, что при скорости резания  $v = 8 \dots 9$  м/с стойкость алмазного инструмента при точении аустенита в 25 раз меньше, чем при точении феррита.

Углерод растворяется в титане значительно хуже, чем в железе. Это и определяет меньший диффузионный износ резца при точении титана при аналогичных температурах. Его расчетная стойкость в данном случае более чем в 110 раз превышает стойкость при точении феррита.

При резании меди, цинка, алюминия и их сплавов, не растворяющих в себе углерод, не происходит диффузионного износа алмазного инструмента, что подтверждает эффективность использования такого инструмента.

Одним из видов взаимодействия материалов при высоких температурах является контактное *эвтектическое плавление*. Это явление заключается в том, что в любой системе, имеющей границы между компонентами, составляющими эвтектическую пару, или в системе, имеющей диаграмму состояния с неограниченной растворимостью с минимумом, на этой границе появляется жидкая фаза при достижении эвтектических температур. Необходимо отметить, что жидкая фаза образуется не после, а в момент формирования эвтектического состава в результате твердофазной диффузии.

Материалы триады железа (табл. 6.13) образуют с углеродом эвтектические сплавы, температура плавления которых существенно ниже температур плавления самих металлов.

**6.13. Температуры плавления металлов и эвтектик**

Металл	Температура плавления, К		Разность температур, К
	Металла	Эвтектики с углеродом	
Железо	1807	1426	381
Кобальт	1768	1582	186
Никель	1728	1591	137

При трении инструмента из алмаза по таким обрабатываемым металлам, как железо и сплавы на его основе, на контактных участках может создаваться температура выше 1426 К, особенно при высоких скоростях резания или относительного скольжения. Отсюда следует, что имеет место контактное эвтектическое плавление инструментального материала, причем взаимодействует с обрабатываемым материалом не графит, в который переходит алмаз, а непосредственно сам алмаз, так как скорость его графитизации при температуре 1426 К еще очень мала.

В процессе относительного движения инструмента и обрабатываемого материала образовавшаяся жидкая фаза удаляется из контактной зоны, в результате чего геометрия поверхностей трения изменяется, т.е. происходит их износ.

При обработке резанием цветных металлов и сплавов не возникают столь высокие температуры, вследствие чего указанный выше механизм не реализуется.

Таким образом, износ режущего инструмента из монокристаллов природного алмаза при обработке цветных металлов, их сплавов и полимерных материалов обуславливается адгезией, абразивным взаимодействием, микроразрушением материала вследствие динамических нагрузок, а при обработке черных металлов еще и диффузионным растворением и контактным эвтектическим плавлением с удалением продуктов взаимодействия с рабочих поверх-

ностей. При обработке полимерных композиционных материалов определенное значение имеет взаимодействие углерода алмаза с продуктами деструкции обрабатываемого материала, макрорадикалами полимерных цепочек. Имеются данные об интенсификации разрушения алмаза в присутствии компонентов полимерных материалов.

### 6.3.2. Инструменты с режущими элементами из синтетического алмаза

Процесс резания инструментом, оснащенным поликристаллическими сверхтвердыми материалами на основе алмаза, имеет некоторые отличия от рассмотренного выше [29].

Коэффициент трения ПКА по металлам несколько выше, чем природных. Это объясняется наличием пор на поверхности поликристалла, вызванных выпадением частиц кристаллитов, а также наличием частиц металлической фазы или связующего. Однако величина коэффициента трения синтетического алмаза по многим металлам менее 0,2. Это говорит о превалировании при контактном взаимодействии внешнего трения, что является особенностью контактных процессов синтетического алмаза с большинством металлов. Так же, как и для природного алмаза, исключение составляют титан, цирконий и другие материалы, в контакте с которыми поверхность режущего элемента покрывается прочно удерживающейся пленкой трущегося материала, что полностью исключает внешнее трение и приводит к внутреннему.

При точении резцами из поликристаллического алмаза силы резания несколько выше, чем при работе резцами из природного алмаза, но значительно меньше, чем при работе инструментом, оснащенным твердым сплавом или минералокерамикой. Увеличение сечения среза приводит к повышению сил резания. Однако необходимо учитывать, что при малых сечениях среза  $P_1$  может быть больше  $P_2$ , так как в этом случае процесс резания предопределяется силами резания на задней поверхности. Необходимо отметить, что при алмазном точении силы резания при износе резца изменяются меньше, чем при тонком точении твердым сплавом. Это связано с меньшим изменением радиуса округления режущей кромки алмазного резца при износе. По мере износа резца силы на задней по-

верхности по своей абсолютной величине растут, но удельные напряжения при этом уменьшаются, так как площадь износа увеличивается быстрее, чем сила резания.

Температура резания при точении резцами из ПСТМ по сравнению с тонким точением меньше, хотя и несколько выше, чем при обработке инструментом из природного алмаза. Как отмечалось ранее, при резании цветных металлов и сплавов, а также полимерных композиционных материалов она обычно в среднем не превышает 473...523 К, а при обработке титана, циркония, никеля, железа и др. температура резания достигает 973 К и выше. Это предопределяет возможность активного адгезионного взаимодействия инструмента из поликристаллов алмаза, а также диффузии углерода в обрабатываемый материал. Наибольшее влияние на температуру, так же, как и при работе инструментом из природного алмаза, оказывает скорость резания, наименьшее — глубина. Основным источником тепловыделения является трение на задней поверхности инструмента. При обработке цветных металлов и сплавов большая часть теплоты распределяется между деталью и стружкой, а при резании материалов с низкой теплопроводностью, например, полимерных композиций, увеличивается количество теплоты, уходящей в резец. В случае обработки как цветных материалов и сплавов, так и полимерных композиций температура поверхности детали обычно не превышает 373...393 К, что позволяет проводить обработку без термических изменений в обрабатываемом поверхностном слое. В связи с низким тепловыделением, малым нагревом детали и, главным образом, инструмента, обработка производится с максимальной точностью — тепловое удлинение резца и расширение детали незначительно.

Стойкость алмазного инструмента при лезвийной обработке медных, алюминиевых сплавов и других цветных металлов составляет сотни часов. Это позволяет использовать инструмент из поликристаллических алмазов на операциях, где требуется большая размерная стойкость, т.е. на станках с ЧПУ, в системах ГАП, массовом производстве, например, деталей двигателей внутреннего сгорания.

Инструмент с рабочей частью из поликристаллов синтетического алмаза имеет свои особенности, отличающие его от инструмента из природного алмаза. Износостойкость резцов, оснащенных ПСТМ на основе синтетического алмаза, значительно

превышает износостойкость инструмента из природного алмаза. Экспериментально показано, что при обработке силуминов средняя стойкость поликристаллического резца в 3 раза выше средней стойкости монокристаллического алмазного резца.

Сравнение причин отказов монокристаллических и поликристаллических алмазных резцов показало, что поликристаллические резцы, отличаясь более высокой прочностью и вязкостью, чем монокристаллические, имеют большее количество и долю резцов с нормальным износом и незначительным выкрашиванием. Такая же картина наблюдается и при растачивании крупных подшипников скольжения, изготавливаемых из цветных сплавов.

Преимущества инструмента с режущей частью из ПКА проявляются вследствие произвольной ориентации кристаллов в алмазном слое пластин, что обеспечивает высокую однородность твердости и стойкости к истиранию во всех направлениях. Монокристалл алмаза, как отмечалось ранее, имеет несколько твердых и мягких кристаллографических плоскостей и для достижения минимального износа режущей кромки инструмента из природного алмаза необходимо обеспечить правильную кристаллографическую ориентацию монокристалла алмаза в инструменте.

Другим преимуществом ПСТМ является повышенная стойкость к ударным нагрузкам. Взаимное скрепление мелких кристаллов алмаза в поликристаллическом слое сводит к минимуму возможность образования крупных сколов под действием ударных нагрузок. Кроме того, прочная твердосплавная основа служит хорошей опорой для алмазного слоя и способствует увеличению прочности на удар.

Подобные результаты получены при обработке заэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов (20...22 % Si). Обычные режущие инструменты, в том числе и твердосплавные, быстро разрушаются абразивными кремниевыми частицами, находящимися в сплавах алюминия. Чередование твердой и мягкой структуры действует на инструмент как прерывистое резание, т.е. способствует его поломке. При обработке алюминиево-кремниевого сплава (20...22 % Si) износ резцов из поликристаллических алмазов происходит в основном по задней поверхности, причем площадка износа выглядит хорошо отполированной. Температура резания при этом не превышает 523...573 К, а давление 0,1...1,0 ГПа. Изменение содержания кремния в составе сплава обратно пропорционально влияет на

стойкость резцов. Уменьшение содержания Si в 2 раза приводит к такому же повышению стойкости инструмента.

Применение поликристаллических алмазных инструментов при обработке алюминиевых поршней позволяет в 100...300 раз повысить стойкость резцов по сравнению с твердосплавными, повысить скорость резания.

Обработку инструментами, оснащенными ПСТМ на основе алмаза, необходимо проводить на жестких и быстроходных станках, обеспечивающих скорость резания до 20 м/с, частоту вращения шпинделя до 10 000 мин<sup>-1</sup>. Жесткость токарных станков должна быть не менее 22 кН/мм, а расточных — 14,5 кН/мм. Амплитуда колебаний станка не должна превышать 5 мкм, а радиальное и осевое биение шпинделя не должно быть больше 5...8 мкм для токарных и 3...5 мкм для расточных станков. Особое внимание следует уделять снижению вибраций в технологической системе станок—инструмент—приспособление—деталь (СПИД) и изоляции станков от внешних источников вибраций.

При проектировании режущего инструмента из ПСТМ, разработке технологического процесса и выборе металлорежущего оборудования для осуществления процесса необходимо учитывать влияние жесткости системы СПИД на работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ.

Как отмечалось, большая износостойкость резцов из синтетического алмаза по сравнению с резцами из природного алмаза объясняется различием их структур. У природного алмаза в результате усталостно-механического воздействия появляются трещины на режущей кромке, которые могут достигать значительных размеров. У синтетического алмаза, представляющего собой поликристалл, появляющиеся трещины тормозятся и останавливаются границами кристаллитов, что и предопределяет более высокую, в среднем в 1,5—2,5 раза, износостойкость синтетического алмаза.

В отличие от инструмента из твердого сплава группы ВК, где передняя поверхность после 20 мин резания оказывается химически полированной, на передней поверхности резца с режущей частью из ПСТМ при обработке материалов третьей группы наблюдается «зубчатый износ», т.е. поверхность имеет участки с более высокой скоростью износа и участки, на которых практически нет следов износа. Поэтому предполагают, что на различных участках

передней поверхности условия контакта в процессе резания неодинаковы.

Механизм износа резцов, оснащенных ПКА, представляется следующим: на передней поверхности в зоне контакта резец—стружка прилипает слой титана и остается заторможенным. Движение стружки происходит внутри материала стружки (внутреннее трение). В соответствии с законом Фика этот «неподвижный» граничный слой быстро насыщается компонентами инструментального материала, что ограничивает массоперенос с поверхности инструмента. В результате на определенных участках резцов практически не происходит износа за счет диффузии углерода алмаза.

Таким образом, при обработке титановых сплавов инструментом, оснащенным ПКА, происходит химическая реакция с образованием реакционного слоя, толщина которого определяется равновесием скорости диффузии углерода через этот слой и скоростью растворения этого слоя в обрабатываемом материале. При сохранении стабильного реакционного слоя скорость износа инструментального материала ограничивается скоростью диффузии углерода из зоны контакта резец—стружка.

Резцы с ПСТМ не обеспечивают такой низкий уровень шероховатости, как резцы из природного алмаза. Поликристаллическое строение не позволяет получить ровную режущую кромку у резца, так как при заточке отдельные блоки кристаллитов выкрашиваются, оставляя на кромке вырывы, неровности. Чем более крупнозернистый поликристалл, тем более шероховатой будет режущая кромка резца. При использовании поликристаллов алмаза с мелкозернистым строением и хорошей доводкой инструмента можно приблизиться к результатам, получаемым при обработке лезвийным инструментом из природного алмаза. В общем случае при использовании резцов из синтетического алмаза при обработке металлов и сплавов первой и второй групп высота микронеровностей обработанной поверхности примерно в 1,5–2,5 раза выше, чем при применении резцов из природного алмаза при одинаковых условиях резания.

Существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает износ инструмента, обычно ухудшающий качество обработки. Величина критерия затупления регламентируется двумя факторами: качеством обработанной поверхности и себестоимостью обработки. Критерий затупления резцов из поликристаллического син-



тетического алмаза составляет обычно 0,2...0,3 мм по задней поверхности. При такой величине критерия затупления обеспечивается высота микронеровностей менее 0,8...1,0 мкм, что удовлетворяет требованиям производства наиболее массовых деталей из алюминиевых высококремнистых сплавов — поршней двигателей внутреннего сгорания. При необходимости получения высококачественной обработанной поверхности критерий затупления ограничивают величиной 0,1 мм.

При точении таких материалов, как титановые сплавы, износ алмазных резов носит ярко выраженный температурный характер со значительным увеличением радиуса округления режущей кромки. Таким образом, износ реза увеличивает теплонапряженность процесса резания. Поэтому при обработке титановых сплавов за критерий затупления принимают износ по задней поверхности, равный 0,2...0,3 мм. Если же к шероховатости предъявляют повышенные требования, то принимается износ по задней поверхности не более 0,2 мм.

Широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) сдерживается трудностями, возникающими при их механической обработке. Они вызваны применением в ПКМ таких наполнителей, как полимерные, органические, неорганические малотвердые и непрочные; неорганические твердые и механически прочные; проволоочные (борные и металлические). Из-за низкой теплопроводности ПКМ в зоне резания возбуждается высокая температура. Алмазные ПСТМ в качестве инструментальных материалов с наибольшей теплопроводностью и минимально изменяющимся радиусом округления режущей кромки обеспечивают наименьшую температуру в зоне резания, лучшее качество обработанной поверхности ПКМ, максимальную стойкость инструмента при наивысших режимах обработки.

Износ инструмента из поликристаллов вызывается действием в основном трех факторов: механическим напряжением резания, механо-химическими превращениями полимера, поверхностными адсорбционными эффектами на контактных площадках режущего клина.

Вследствие сильного изнашивающего действия ПКМ, их специфических физико-механических и технологических свойств для оснащения инструмента следует выбирать наиболее износостойкие

инструментальные материалы на основе алмаза. Причем у инструмента следует максимально увеличивать главные и вспомогательные задние углы для уменьшения влияния упругого последствия обрабатываемого полимерного материала на процесс резания и размер обработанной поверхности. Передняя поверхность инструмента и канавки, по которым удаляется стружка, должны быть тщательно отполированы для исключения прилипания стружки к прикромочным поверхностям и стружечным пространствам инструмента, оснащенного ПСТМ, и его металлическим участкам. Существенно меньшие, чем при резании металлов, силы позволяют использовать инструмент с ПСТМ при значительных по абсолютной величине подачах (до 1,2 мм/об) и глубинах резания (до 7...8 мм при размере пластины 12,7 мм, т.е. до 0,5...0,6 длины режущей кромки).

Поэтому при использовании режущего инструмента с поликристаллами алмаза достигаются наиболее благоприятные условия обработки ПКМ. Снижаются составляющие силы резания по сравнению с твердосплавным инструментом ( $P_z$  в 1,2–1,5 раза,  $P_y$  в 4–6 раз), уменьшается теплонапряженность процесса (средняя температура в зоне резания находится в пределах 423...623 К) при одновременном повышении скорости резания до 12...15 м/с и уменьшении высоты микронеровностей обработанной поверхности до  $Ra$  0,63...2,5. Стойкость режущих инструментов, оснащенных ПКА, достигает 300 мин.

Алмазные инструменты разработаны для длительного использования преимущественно на станках с программным управлением и ЧПУ в целях их максимальной загруженности. Для успешного использования алмазных инструментов необходимы мощные стационарные станки с точным движением в плоскости при минимальном торцевом биении инструментальных шпинделей, обеспечивающие оптимальную скорость резания. Кроме того, следует обеспечить минимальный допуск посадочного места для установки инструмента. Станки должны иметь механическую подачу.

В последнее время появились пластины ПСТМ диаметром до 100 мм. Это дало возможность изготавливать инструмент с режущими кромками большой длины, что позволило упростить изготовление профильного фрезерного инструмента. За время эксплуатации такого инструмента режущую кромку можно перетачивать 15 раз. Стоимость одной переточки составляет 7...11 % от стоимости нового инструмента.

Проведенное сопоставление затрат между алмазной пазовой дисковой и твердосплавной фрезами при обработке древесностружечных плит показало, что издержки на их эксплуатацию находятся в соотношении 1:7 в пользу алмазного инструмента.

### **6.3.3. Инструменты с режущими элементами из ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора**

Оптимальные геометрические параметры инструмента, оснащенного ПСТМ на основе сBN, определяются условиями резания и свойствами обрабатываемого материала. При этом нужно отметить, что, как и для инструмента на основе алмазных ПСТМ, выбор геометрических параметров перетачиваемого, т.е. паяного инструмента, отличается от выбора геометрии инструмента, оснащенного неперетачиваемыми режущими пластинами.

Если в первом случае путем заточки возможно задание практически любого сочетания геометрических параметров режущей части инструмента, то во втором случае имеется ограничение, связанное с тем, что основные формы, размеры и геометрические параметры режущих элементов регламентируются международным стандартом ISO 1832–2004. В этом случае дополнительным резервом является задание различных углов базирующим элементам державки, на которые устанавливается режущая пластина.

В первую очередь геометрия инструмента с режущей частью из ПСТМ должна обеспечивать прочность вершины и режущих кромок.

Для этого в большинстве случаев переднему углу инструмента придается отрицательное значение, как при обработке сталей, так и при обработке чугунов.

В некоторых случаях при расточке чугунных деталей, точении вязких материалов, например Ni-сплавов, используют резцы с передним углом  $\gamma = 0^\circ$ , что связано с возникновением вибраций при резании инструментом с отрицательным передним углом.

Для увеличения прочности вершины резца в большинстве случаев назначают углы в плане — 45 и 20°.

Величина заднего угла инструмента, оснащенного ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора, имеет значительное влияние на его работоспособность. Так, при точении закаленных

инструментальных и быстрорежущих сталей увеличение заднего угла от  $4...6^\circ$  до  $20...25^\circ$  повышает стойкость инструмента в 2–3 раза. Однако чрезмерное увеличение заднего угла ослабляет режущую кромку. Поэтому при большом заднем угле ( $20...25^\circ$ ) необходимо увеличивать передний угол до  $15...20^\circ$ .

Угол наклона режущей кромки при обработке без удара принимается равным  $3...6^\circ$ . При обработке с ударом угол уменьшается для обеспечения прочности.

Сопряжение между главной и вспомогательной режущими кромками могут выполняться с радиусом  $0,1...1,6$  мм или в виде прямолинейной кромки длиной  $0,3...0,8$  мм, расположенной параллельно обрабатываемой поверхности (угол в плане  $\phi_0 = 0$ ). При обработке торцовых поверхностей переходная кромка выполняется длиннее (до  $1,5$  мм), что позволяет увеличить подачу в сравнении с продольной обработкой.

Шероховатость поверхности после фрезерования ПСТМ зависит от длины зачистной кромки и ее отклонения от перпендикуляра к оси фрезы, его допустимое значение — не более  $\pm 15'$ . Рекомендуются следующие длины зачистной кромки: для обработки серых чугунов —  $1,5$  мм; для обработки высокопрочных чугунов —  $1$  мм; для обработки сталей  $35...55$  HRC —  $0,8$  мм; более  $55$  HRC —  $0,3...0,6$  мм.

При точении науглероженных термообработанных сталей в условиях резания без удара и с ударными нагрузками рекомендуется выполнять на инструменте упрочняющую фаску шириной до  $0,2$  мм с отрицательным передним углом.

Для случая обработки с ударом на задней поверхности инструмента рекомендуется выполнять фаску  $0,1...0,2$  мм перпендикулярно основной плоскости, что снижает напряжения, действующие на его задней поверхности, в результате чего время работы инструмента увеличивается приблизительно в 25 раз за счет снижения интенсивности микроразрушения инструмента.

Необходимо отметить, что геометрические параметры инструмента зависят от формы обрабатываемого изделия, т.е. от операции, для которой он предназначен.

Выбирая геометрические параметры инструмента, следует помнить, что при использовании неперетачиваемых режущих пластин изменение переднего и заднего углов инструмента происходит одновременно за счет соответствующей переустановки пластины в

державке. В этом случае целесообразно указывать изменение угла резания.

Сочетание высоких физико-механических свойств и химических характеристик ПСТМ на основе сBN обуславливает значительно меньшие значения сил резания, чем при обработке инструментами из быстрорежущих сталей и твердых сплавов. Это находится в соответствии со снижением коэффициента трения и возрастанием температуры в зоне резания, при которой ослабляются прочностные характеристики обрабатываемого материала, и снижается работа пластической деформации.

Сравнение силовых зависимостей при точении сталей резцами из различных ПСТМ показывает отсутствие качественных отличий в характере зависимостей. Наблюдаются лишь различия в численных значениях.

Степень износа инструмента оказывает заметное влияние на усилия резания. Увеличение износа инструмента по задней поверхности вызывает повышение всех составляющих силы резания, при этом наибольшее значение имеет и наиболее интенсивно возрастает радиальная сила  $P_y$ .

Снижение продольной усадки до величины, близкой к единице, является результатом влияния теплового фактора. При этом чем ниже теплопроводность инструментального материала и выше коэффициент трения на рабочих поверхностях инструмента, тем интенсивнее снижается усадка стружки.

Скорости резания, при которых работают лезвийные инструменты из ПСТМ на основе сBN, вызывают значительное теплообразование в зоне резания, особенно при обработке материалов высокой твердости. Низкий коэффициент трения и высокая теплопроводность ПСТМ обеспечивают быстрый отвод тепла от режущей кромки в тело инструмента. Температурный градиент в поликристалле на основе сBN при точении закаленных сталей — менее 473 К/мм, в то время как в инструменте из твердых сплавов — 503 К/мм, а в минералокерамике — 523 К/мм.

Характер влияния скорости резания на температуру при обработке закаленной стали резцами из ПСТМ и твердых сплавов идентичен. При низких скоростях резания (менее 0,5...0,8 м/с) резцами из ПСТМ образуется ярко выраженная элементная стружка, длина контакта которой с передней поверхностью инструмента невелика.

Повышение скорости резания до 1,5 м/с и более приводит к образованию сливной стружки. Длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента увеличивается, повышается температура контакта. Дальнейший рост скорости резания еще больше повышает температуру резания, и в некоторых случаях стружка может оплавляться.

Степень влияния подачи на температуру резания больше, чем глубины резания. Характер влияния режимов резания на температуру при точении сталей и чугунов не меняется.

Специфические физико-механические свойства материалов на основе cBN обуславливают возможность достижения высокого качества обработанной поверхности на финишных операциях механической обработки. По показателям экономичности, производительности, качества обработанной поверхности операции точения и фрезерования инструментом из ПСТМ конкурируют, а зачастую и превосходят процесс шлифования [26].

Кроме малой шероховатости обработанной поверхности и практически полного отсутствия ее шаржирования, применение резцов из ПСТМ формирует в поверхностном слое сжимающие тангенциальные остаточные напряжения  $\sigma_{\text{ост}}$ , которые благоприятно сказываются на дальнейшей эксплуатации изделия. Обработка практически не вызывает структурно-фазовых превращений в поверхностном слое.

Как отмечалось ранее, износ режущего инструмента представляет собой сложное термодинамическое явление, определяемое одновременно несколькими механизмами — абразивным, адгезионным, усталостным, диффузионным, химическим. Различный механизм проявляется в зависимости от природы контактирующих материалов и условий контактирования, обуславливая в большинстве случаев экстремальный характер зависимости стойкость инструмента — скорость резания.

Интенсивность адгезии с ростом температуры возрастает. При этом коэффициент адгезии для стали в 1,5–2 раза выше, чем для чугуна [26].

Коэффициент упрочнения адгезионной связи несущественно изменяется от температуры (в 1,1–1,3 раза при изменении температуры от 473 до 1173 К). Для закаленной стали он в 3–4 раза меньше, чем для сырой.

В результате механического и адгезионного разрушения из поликристаллов на основе cBN вырываются отдельные частицы материала, которые способствуют интенсификации абразивного взаимодействия на контактных участках инструмента за счет «самоизнашивания».

Необходимо отметить, что величина износа инструментов с режущей частью из ПСТМ на основе cBN при обработке нетермообработанных сталей обусловлена не особенностями материалов на основе cBN, а способом изготовления и свойствами конкретного ПСТМ.

Химические процессы в зоне резания играют важную роль в износе поликристаллов на основе cBN.

При обработке металлов, содержащих Fe, Cr, Ti, инструментами, оснащенными поликристаллами на основе плотных модификаций нитрида бора, в зоне контакта происходит перенос обрабатываемого материала на поверхность поликристалла и протекают химические реакции с образованием нитридов, боридов, оксидов и, вероятно, более сложных соединений, таких как оксибориды, входящих в обрабатываемый материал элементов.

При высоких скоростях резания процесс обработки сопровождается образованием на контактных поверхностях инструмента тонкого жидкого слоя из соединений, имеющих температуру плавления более низкую, чем обрабатываемый и инструментальный материалы, т.е. в зоне резания реализуется механизм контактно-реактивного плавления между материалами инструмента и изделия.

При малых скоростях резания образующийся в контакте расплав из-за недостаточной температуры имеет высокую вязкость, а кинетической энергии стружки и детали недостаточно, чтобы далеко выбросить расплав из зоны контакта. Расплавленный продукт взаимодействия выдавливается в сторону вспомогательной режущей кромки на заднюю вспомогательную поверхность и выносится стружкой на переднюю поверхность резца в непосредственной близости от поверхности контакта.

С увеличением скорости резания возрастает контактная температура, что снижает кинематическую вязкость жидкой фазы. Материал получает возможность быть выброшенным на значительное расстояние от зоны резания.

Результаты химического анализа продуктов взаимодействия согласуются с полученными ранее данными, показывающими, что

взаимодействие сBN со сталью начинается при 1473 К с образованием эвтектики Fe–Fe<sub>2</sub>B, а со сталью, содержащей хром — при 1273...1373 К с образованием соединений CrB и Fe<sub>4</sub>N. Взаимодействие с Ti и Cr возможно при температурах на 200...300 К ниже, чем с Fe. Увеличение давления в контакте снижает температуру начала взаимодействия на 250 К. При этом с ростом давления значительно увеличивается диффузия азота в сталь.

В диапазоне практически применяемых скоростей резания на износ инструмента из ПСТМ на основе сBN оказывает влияние химическое взаимодействие инструментального материала с обрабатываемым, а также с элементами окружающей среды в зоне резания, приводящее к образованию, плавлению и удалению жидкой фазы из зон контакта. Это позволяет объяснить известный факт, что стойкости инструментов, оснащенных различными композитами на основе сBN, при обработке сталей и сплавов со скоростями резания более 2,0...2,5 м/с близки между собой. Наличием жидкой фазы можно объяснить и относительно низкий коэффициент трения, наблюдаемый при работе инструментом с ПСТМ на основе сBN.

Учитывая приведенное выше, экстремальную зависимость стойкости инструмента от скорости резания можно быть объяснить следующим образом.

При низких скоростях резания, соответствующих началу левой ветви кривой  $T = f(v)$ , износ инструмента обусловлен адгезионно-усталостными явлениями и сопутствующим им «самоизнашиванием», абразивным воздействием обрабатываемого материала. На контактных поверхностях инструмента отчетливо наблюдаются характерные борозды, совпадающие с направлением движения стружки на его передней и скорости резания на задней поверхностях. Химическое взаимодействие контактирующих материалов проявляется относительно слабо.

С ростом скорости резания увеличивается контактная температура, следствием чего является превалирующее разупрочнение обрабатываемого материала, снижение абразивного и адгезионного разрушения инструментального материала, а также возрастание интенсивности химического взаимодействия и, следовательно, толщины слоя жидкой фазы. На контактных участках инструмента увеличивается роль жидкостного трения. При достижении опреде-



ленной толщины слоя жидкой фазы, соответствующей состоянию системы трения, когда интенсивность абразивного и адгезионного износа значительно снизилась, а интенсивность химического взаимодействия еще не играет основную роль в изнашивании, реализуется максимальная работоспособность инструмента. На контактных поверхностях инструмента имеются участки со следами воздействия обрабатываемого материала и зоны вторичных структур, являющихся следствием окисления материала инструмента и химического взаимодействия в зоне резания.

При дальнейшем увеличении скорости резания интенсивность изнашивания инструмента за счет образования и удаления из зон контакта жидкой фазы возрастает и в условиях, отвечающих нижнему участку правой ветви кривой  $T = f(v)$ , полностью определяет износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе cBN, обуславливая минимум его стойкости.

#### **6.3.4. Повышение эффективности обработки инструментами, оснащенными ПСТМ на основе cBN**

Для решения задачи повышения эффективности применения режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе cBN, при обработке закаленных сталей возможны несколько альтернативных решений. Одним из таких решений является совершенствование конструкции режущего инструмента и оптимизации режимов резания, что позволяет снимать больший объем материала в единицу времени (резцы с зачистной кромкой, большим радиусом при вершине, инструменты с *wire*-геометрией). Другим — управление контактным взаимодействием инструмента с обрабатываемым изделием в зоне резания за счет разработки и применения новых инструментальных композитов с более высокими физико-механическими свойствами, оптимизации соотношения основной фазы и связки в составе композитов, нанесения различных покрытий на инструмент и т.д. Второе направление совершенствования режущих инструментов связано с повышением износостойкости инструмента в условиях интенсивных термобарических нагрузок, что позволяет увеличить порог максимально допустимых скоростей резания. В любом случае, увеличение производительности обработки достигается в основном путем создания специализированного ре-

жущего инструмента, оптимизированного для конкретных технологических условий.

Примером реализации первого направления является использование в процессе точения инструментов, реализующих процесс косягольного резания: однокромочные (безвершинные, бреющие) резцы (рис. 6.27, *а*) и резцы с цилиндрической передней поверхностью (рис. 6.27, *б*), которые позволяют проводить процесс обработки с большими подачей и скоростью резания, обеспечивая получение низкой шероховатости обработанной поверхности [9]. Конструкция резцов предполагает оснащение специально изготовленных державок режущими пластинами по стандарту ISO 1832–2004 (SNUN 0903, SNUN 1204, RNMN 070300, RNMN 090300, RNMN 120300).

Геометрические параметры таких инструментов обуславливают формирование широких и тонких срезов, что позволяет избежать возникновения разрушающих нагрузок на инструмент даже при больших подачах.

При использовании режущих пластин отмеченных размеров обработка однокромочными инструментами проводится с подачей до 1 мм/об, резцами с цилиндрической передней поверхностью — до 0,6 мм/об, что в 2–10 раз выше в сравнении с подачами, характерными для традиционных инструментов. При этом на обработанной поверхности обеспечивается шероховатость с высотными параметрами  $Ra$  0,20...0,80,  $Rz$  1,25...2,50 (рис. 6.28, *а*).

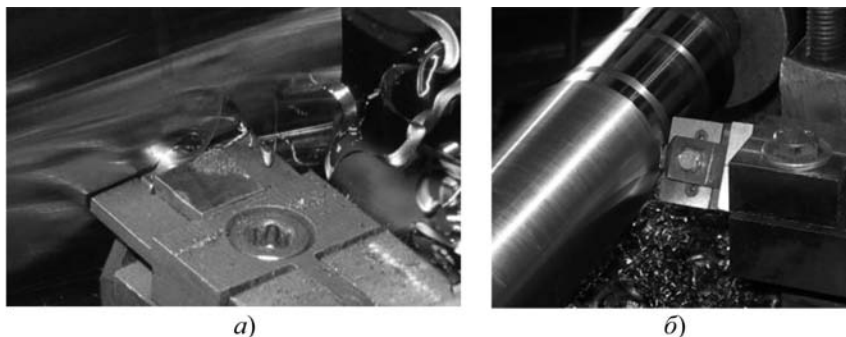
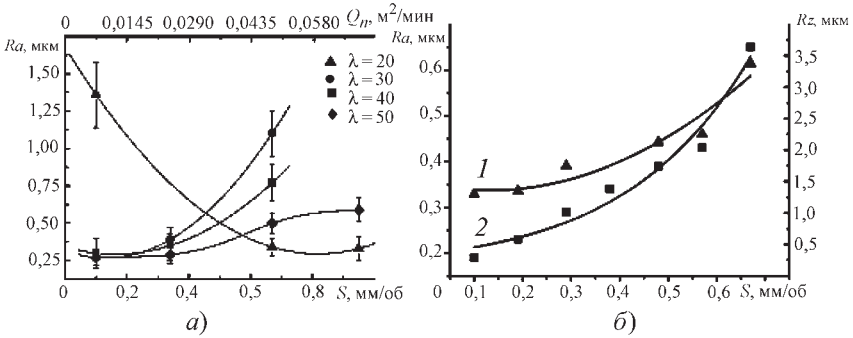


Рис. 6.27. Обработка инструментом с цилиндрической передней поверхностью (*а*) и косягольным однокромочным инструментом (*б*)



**Рис. 6.28.** Влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности (а), технологические возможности реза с цилиндрической передней поверхностью ( $v = 75$  м/мин,  $t = 0,1$  мм) (б):

1 —  $Ra$ ; 2 —  $Rz$

Инструмент с цилиндрической передней поверхностью имеет проекцию режущей части на основную плоскость существенно меньшей кривизны, чем обычные резы. Это обуславливает снижение шероховатости обработанной поверхности. Еще одной из причин формирования на обработанной поверхности низкой шероховатости в случае применения инструментов, реализующих процесс косоугольного резания, является характер протекания пластических явлений в зоне резания. Известно, что между высотой микронеровностей и степенью деформации срезаемого материала перед передней поверхностью инструмента имеет место функциональная связь [22]. Это явление обусловлено образованием перед сходящей стружкой волны деформации из-за того, что в процессе съема стружки принимают участие главная и вспомогательная режущие кромки инструмента. В точке над передней поверхностью инструмента, в которой реализуются максимальные касательные напряжения, происходит разделение материала на срезаемую и выдавливаемую части с последующим перемещением последней в сторону вершины формируемой неровности обратно направлению подачи. В случае, когда условия резания приближены к свободному резанию, влияние данного эффекта снижается, что обеспечивает получение значительно меньшей шероховатости обработанной поверхности в сравнении со стандартными инструментами (рис. 6.28, б).

Стойкость инструмента с цилиндрической передней поверхностью при обработке стали ШХ15 (60...62 HRC) со скоростями резания 1,0...2,0 м/с составляет 30...80 мин в зависимости от величины подачи, что позволяет проводить обработку длинномерных деталей. Период стойкости одокромочных резцов при оптимальных условиях обработки закаленной стали соответствует 90...110 мин. Обработка проводится с глубиной резания 0,05...0,30 мм.

Увеличение диапазона используемых подач при точении однокромочными резцами и резцами с цилиндрической передней поверхностью обуславливает повышение производительность чистового точения в 2–10 раз в зависимости от требований, предъявляемых к шероховатости обработанной поверхности.

Как показано выше, высокопроизводительное точение закаленных сталей инструментом, оснащенным ПСТМ на основе cBN, характеризуется высокими контактными давлениями, достигающими 3...5 ГПа, и средними температурами, превышающими 1200 °С. На интенсивность изнашивания инструмента влияет химическое взаимодействие инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды. Взаимодействие протекает с образованием боридов металлов, входящих в состав обрабатываемого материала, и выделением азота. Учитывая это, перспективным является подход, связанный с управлением химическим взаимодействием в зоне резания за счет предварительного введения в нее свободного азота, что сдвигает в более высокотемпературную область реакцию с образованием боридов Fe и Ni и выделением азота. Результаты термодинамического анализа подтверждают увеличение температуры образования указанных боридов на 150...300 °С при наличии в системе азота с повышенным парциальным давлением до 100 Па (рис. 6.29).

Кроме выполнения функции ингибитора химического взаимодействия, азот в зоне резания снижает интенсивность окисления инструментального материала.

Указанные причины изменяют механизм изнашивания инструмента, снижая его интенсивность, в особенности в условиях высокоскоростной обработки, сопровождающейся высокой температурой на контактных поверхностях инструмента.

С учетом химического взаимодействия в зоне резания, для повышения работоспособности режущих инструментов, оснащенных

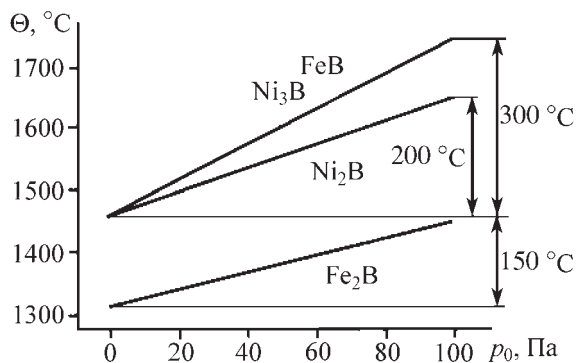


Рис. 6.29. Влияние давления азота на увеличение температуры образования боридов Fe и Ni

ПСТМ на основе cBN, необходимо вводить в состав композита или защитного покрытия на инструментах составляющих, которые под действием термобарических условий процесса обработки обеспечивают формирование в зоне резания среды с повышенным парциальным давлением азота (рис. 6.30).

Взаимодействие этих составляющих с элементами обрабатываемого материала с выделением азота происходит при температурах более низких, чем температуры, характерные для взаимодействия с элементами обрабатываемого материала основы инструментального композита — cBN.

Анализ физико-механических и химических свойств ряда нитридов позволяет предложить в качестве таких составляющих нитриды кремния (Si) и ниобия (Nb). Нитрид кремния предлагается как составляющая ПСТМ, а нитрид ниобия — защитного покрытия.

При этом покрытие является многослойным: верхний слой покрытия, из оксида алюминия, обеспечивает минимизацию окисления композита, слой NbN снижает интенсивность химического взаимодействия ПСТМ и элементов из состава обрабатываемого материала, а слой титана обеспечивает качественное сцепление покрытия с поверхностью режущей пластины (рис. 6.31).

Изнашивание инструмента имеет интегральный характер, который охватывает механические, адгезионные, химические и др. яв-

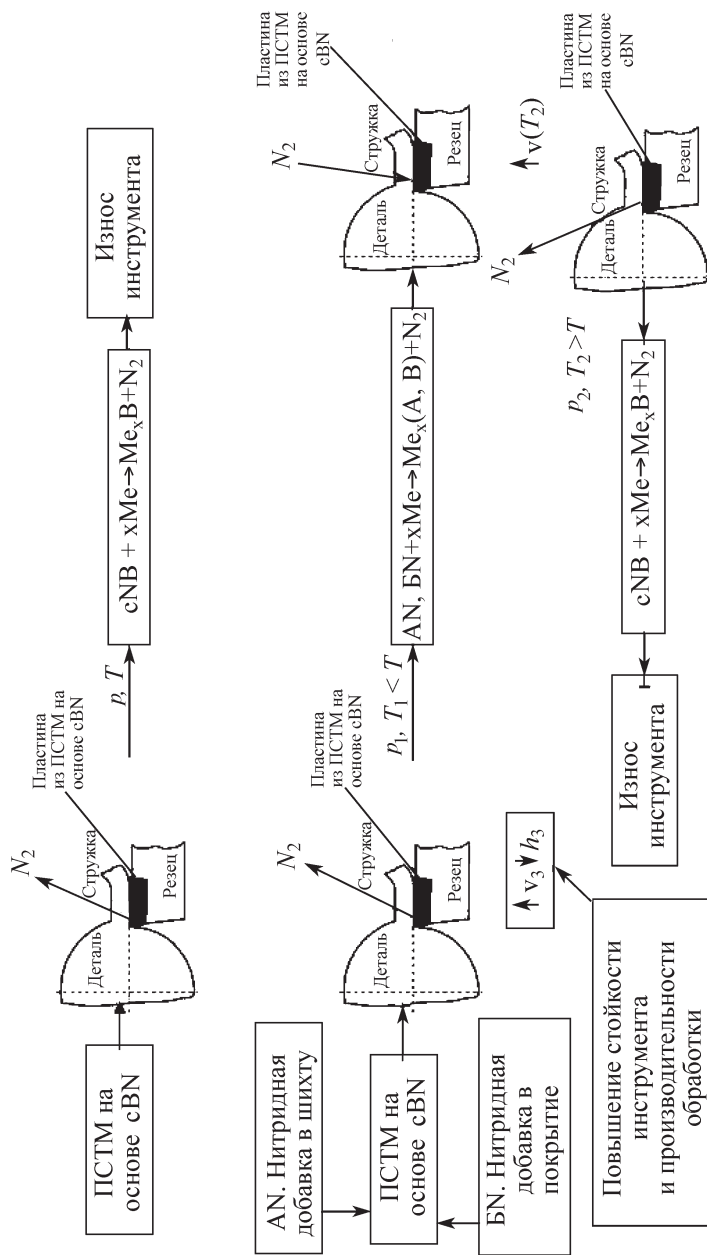
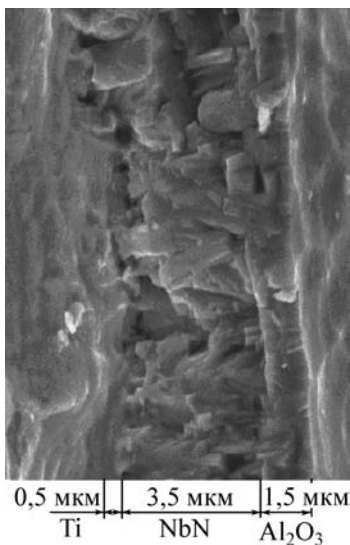


Рис. 6.30. Графическое представление концепции повышения работоспособности режущих инструментов, оснащенных ПСТМ на основе СВН



**Рис. 6.31.** Излом режущей пластины из ПСТМ на основе cBN с покрытием

ления на контактных поверхностях инструмента. При этом для изнашивания инструмента из ПСТМ на основе cBN повышение температуры образования в зоне резания боридов (оксидборидов) металлов, которое реализуется за счет введения в систему нитридов  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{NbN}$ , и формирование на основе боридов (оксидборидов) легкоплавких эвтектик и их контактное плавление имеет принципиальное значение, обеспечивая повышение износостойкости инструмента.

Применение в инструменте композита cBN- $\text{Si}_3\text{N}_4$  и защитного покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -NbN-Ti способствует повышению работоспособности режущих инструментов при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов (рис. 6.32) за счет уменьшения интенсивности их изнашивания, что связано со снижением химического и адгезионного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в зоне резания.

Применение защитных покрытий на режущих инструментах обуславливает повышение производительности обработки за счет скорости резания без снижения периода стойкости инструмента на 25...60 % при точении закаленных сталей и никелевых сплавов соответственно.

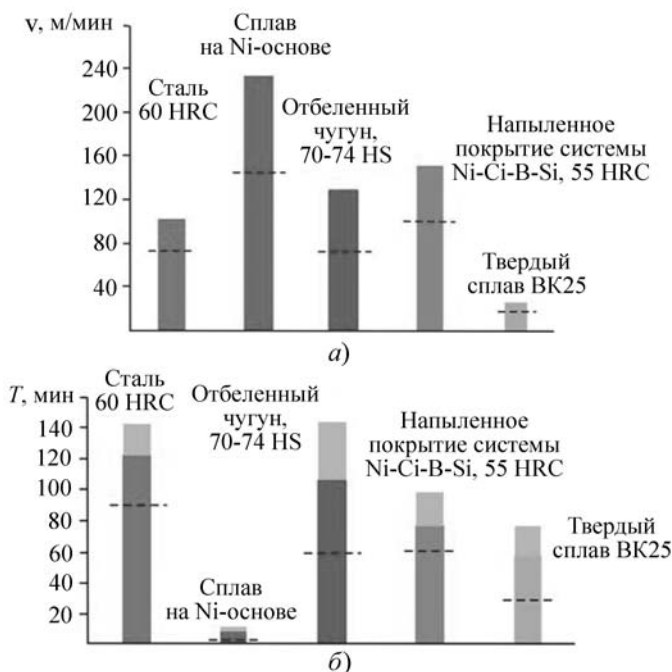


Рис. 6.32. Повышение (над чертой) скорости резания (а) и стойкости инструмента (б) за счет применения режущих пластин из ПСТМ  $cBN-Si_3N_4$  без покрытия и с покрытием

#### 6.4. АЛМАЗНОЕ МИКРОТОЧЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ОПТИКИ

Алмазным микроточением (АМТ) принято называть процесс обработки алмазным монокристаллическим резцом зеркальных поверхностей с глубиной резания  $0,1 \dots 5,0$  мкм. При этом формируется обработанная поверхность, характеризующаяся точностью со средним квадратичным отклонением формы  $0,10 \dots 0,05$  мкм ( $\lambda/6 - \lambda/50$  при  $\lambda = 0,6328$  мкм), шероховатостью  $10 \dots 100 \text{ \AA}$ , коэффициентом отражения до 96 %.

Традиционно такой уровень обработки достигается, последовательно применяя шлифование, полировку, машинную и ручную доводку, что требует больших затрат времени и высокого мастерст-



ва исполнителя, в то время как изготовление точных зеркальных поверхностей становится, в ряде случаев, необходимым в серийном и массовом производствах. Преимуществом АМТ зеркальных поверхностей является обеспечение требуемых точности и качества обработанной поверхности деталей при высокой производительности и обеспечении повторяемости результатов в узком диапазоне требований к изделию.

Метод АМТ позволяет достичь таких же показателей по точности формы, шероховатости поверхности и коэффициенту зеркального отражения, как и при традиционных методах финишной обработки, но со значительно большей производительностью и меньшей себестоимостью — при замене традиционных технологий обработки зеркальных поверхностей на метод АМТ затраты на изготовление плоских и сферических изделий снижаются до двух раз, а при обработке асферических деталей их снижение может достигать 15 раз.

Кроме того, во многих случаях переход на АМТ приводит к улучшению конструкции детали, в том числе и за счет использования в оптических изделиях более эффективных конструкционных материалов.

Для осуществления процесса АМТ точной зеркальной поверхности необходимы, прежде всего, специальный станок сверхвысокой точности (рис. 6.33), оснащенный системами наладки и управления технологическим процессом, и алмазный инструмент, изготовленный из монокристалла природного алмаза размером

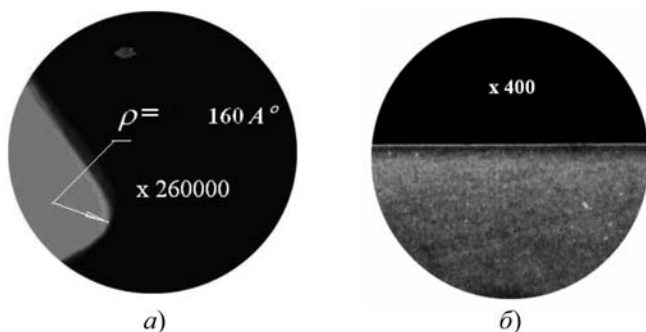


а)



б)

Рис. 6.33. Стенд алмазного микроточения МО1045 (а), планшайба с вакуумными спутниками для пяти деталей (б)



**Рис. 6.34.** Режущая кромка инструмента:

*a* — поперечное сечение; *б* — вид качественной кромки

0,8...2,0 карат, и заточенный с радиусом округления режущей кромки 30...300 Å [22].

К качеству заточки инструмента для АМТ предъявляются чрезвычайно высокие требования как по величине радиуса округления режущей кромки, так и по совершенству самой кромки (рис. 6.34).

Одним из основных условий, способствующих обеспечению работоспособности режущего инструмента для АМТ, является учет кристаллографических особенностей монокристаллов алмаза, из которого изготавливается инструмент — при изготовлении инструмента алмаз должен быть сориентирован таким образом, чтобы лезвие резца располагалось по вектору наибольшей твердости кристалла.

## 6.5. ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПСТМ

До 50 % резцов, используемых в промышленности, выходят из строя вследствие поломок. В 60 % случаев вмешательство оператора для поддержания работоспособности токарных станков с ЧПУ вызвано отказами режущего инструмента.

При обработке закаленных и легированных сталей, наплавов из труднообрабатываемых металлов и сплавов все чаще применяют

поликристаллические сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора. Эти материалы, наряду с высокой твердостью и износостойкостью, отличаются широким диапазоном прочностных характеристик. Применение резцов из ПСТМ требует использования более жесткого оборудования. При этом требования к работоспособности режущих инструментов возрастают.

Для оценки работоспособности резцов применяют различные критерии. Наиболее часто оценивают стойкость, т.е. время от начала эксплуатации до критического износа инструмента. Для этого проводят длительные испытания и определяют интенсивность изнашивания инструмента при фиксированных, как правило, оптимальных режимах резания, а также его стойкость.

Кроме того, оценивают стабильность работы инструмента при этих же режимах, применяя различные методики, учитывающие стохастическую природу прочности материала инструмента и самого процесса резания. В качестве критерия оценки стабильности используют либо гамма-процентный ресурс либо вероятность разрушения при конкретных режимах обработки и геометрических параметрах инструмента [5].

Оба этих подхода оценки работоспособности резцов дополняют друг друга, так как стойкость инструмента и вероятность его разрушения характеризуют различные аспекты качества инструмента и входят в общем виде в понятие «надежность». Стойкостные испытания инструмента очень трудоемки по затратам времени и расходу обрабатываемого материала, превращаемого в стружку. В качестве альтернативы стойкостным испытаниям измеряют твердость материалов инструментов и по ее значениям проводят сравнительную оценку различных материалов из гаммы существующих.

Для оценки вероятности разрушения лезвийных инструментов, твердость материала их рабочей части не подходит. Это связано с тем, что часто повышение твердости приводит к уменьшению прочности и трещиностойкости (т.е. к увеличению хрупкости) материалов. Кроме того, на вероятность разрушения сильное влияние оказывает изменение геометрических параметров резца, свойств обрабатываемого материала, условий обработки — режимов резания, характера ударных нагрузок, биения обрабатываемой детали, изменения припуска на обработку и т.д. Таким образом, очевидно, что оценка вероятности разрушения требует знания и учета свойств

материала инструмента и обрабатываемого материала, а также величин сил и напряжений на передней и задней поверхностях инструмента в процессе резания.

Для оценки вероятности разрушения разработан подход, основанный на анализе дифференциальных функций распределения прочности при растяжении и сжатии материала инструмента ( $S_p$  и  $S_c$ ) и дифференциальных функций распределения напряжений на передней и задней поверхностях резца [4]. Методология численного определения вероятности разрушения инструмента основана на фундаментальных положениях общей теории надежности.

В ходе обработки за счет неоднородности свойств материала детали и нестационарности процесса стружкообразования величина силы резания изменяется. С учетом этого максимальные напряжения можно характеризовать средним значением эквивалентных напряжений  $\bar{S}_R$ , возникающих в инструменте при эксплуатации и их среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{S_R}$ , предполагая, что распределение этих параметров не противоречит нормальному закону.

Прочность материала инструмента также характеризуется средними значениями предела прочности при растяжении и сжатии и их среднеквадратическими отклонениями  $\sigma_{S_p}$ ,  $\sigma_{S_c}$ . Распределение прочности хрупких материалов наиболее хорошо описывается законом В. Вейбулла. Однако при оценке параметров распределения по малой выборке (до 20–30 образцов) трудно отдать предпочтение закону Вейбулла по сравнению с нормальным или логарифмически нормальным распределением. Для упрощения расчетов на первом этапе допустим, что распределение прочности  $S_p$  и  $S_c$  подчиняются усеченному нормальному закону распределения.

Вероятность  $P$  разрушения резца в данном случае будет равна площади фигуры (на рис. 6.35 эта площадь заштрихована), образованной пересечением кривых дифференциальных функций  $f(S_p)$  и  $f(S_R)$ . Тогда

$$P = \int_0^{S_a} f(S_p) dS + \int_{S_a}^{\infty} f(S_R) dS, \quad (6.7)$$

где  $S_a$  — напряжение, соответствующее точке  $A$  пересечения дифференциальных функций  $f(S_p)$  и  $f(S_R)$ , МПа;  $S_R$  — эквивалентные напряжения, возникающие в резце при эксплуатации, МПа;

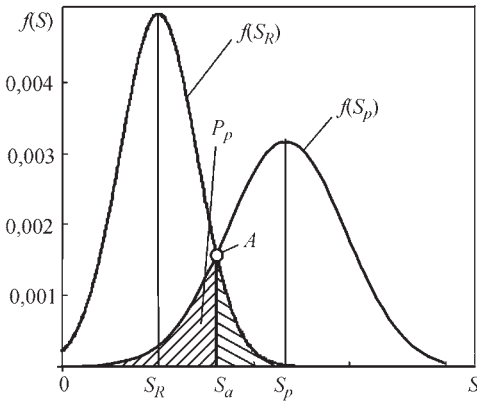


Рис. 6.35. Дифференциальные функции распределения  $S_R$  и  $S_p$

$S_p$ ,  $S_c$  — соответственно прочность материала инструмента при растяжении и сжатии, МПа.

Величину  $S_a$  находим, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} f(S_p) = \frac{1}{\sigma_{S_p} \sqrt{2\tau}} \exp[-(S_a - \bar{S}_p)^2 / 2\sigma_{S_p}^2]; \\ f(S_R) = \frac{1}{\sigma_{S_p} \sqrt{2\tau}} \exp[-(S_a - \bar{S}_R)^2 / 2\sigma_{S_R}^2], \end{cases} \quad (6.8)$$

откуда

$$\begin{aligned} (\sigma_{S_R}^2 - \sigma_{S_p}^2)^2 S_a^2 + 2(\sigma_S S_R - \sigma_{S_R}^2 S_p) S_a + \sigma_{S_R}^2 S_p^2 - \sigma_{S_p}^2 S_R^2 - \\ - 2\sigma_{S_R}^2 \sigma_{S_p}^2 \ln(\sigma_{S_R} / \sigma_{S_p}) = 0. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Координата точки  $A$  —  $S_a$  является корнем уравнения (6.9).

Предел прочности при растяжении и сжатии желательно определять при скорости, близкой к скорости резания. Для этих целей можно использовать вертикальной копер, приняв в качестве образцов круглые, квадратные или ромбические режущие пластины.

Опыт эксплуатации твердосплавных резцов показал, что разрушение наступает на их передней поверхности, на расстоянии  $l = (1,5 \dots 2,5)C$ , где  $C$  — полная длина контакта стружки с инструментом. Теоретические расчеты [1] выявили, что в этой области находятся максимальные растягивающие напряжения  $S_{p\max}$ . Традици-

онно напряжения в опасных точках на передней грани резца вычисляют по формуле

$$S = \frac{2P}{bk_0C} \left\{ \frac{\sin \frac{\beta}{2} \sin \left[ \gamma_0 - \left( \frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta - \sin \beta} - \frac{\cos \frac{\beta}{2} \cos \left[ \nu_0 - \left( \frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta + \sin \beta} \right\}, \quad (6.10)$$

где  $P$  — результирующая сила резания, Н;  $b = t/\sin\phi$  — ширина среза, мм;  $t$  — глубина резания, мм;  $k_0$  — коэффициент, учитывающий смещение точки максимальных напряжений от вершины резца;  $\phi$  — главный угол в плане;  $\beta$  — угол заострения;  $\gamma$  — передний угол;  $\nu_0$  — угол, определяющий направление оси резания,  $\operatorname{tg} \nu_0 = \frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}$ ,  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  — соответствующие силы резания.

Опыт эксплуатации резцов из ПСТМ показал, что возможны случаи их разрушения со стороны задней поверхности. Кроме того, при тчении инструментом из ПСТМ, особенно с малой глубиной резания, по мере его износа составляющие  $P_y$  и  $P_x$  растут более интенсивно, чем  $P_z$ . Это приводит к изменению угла  $\nu_0$  и, как следствие, к появлению растягивающих напряжений на задней поверхности и сжимающих на передней (рис. 6.36).

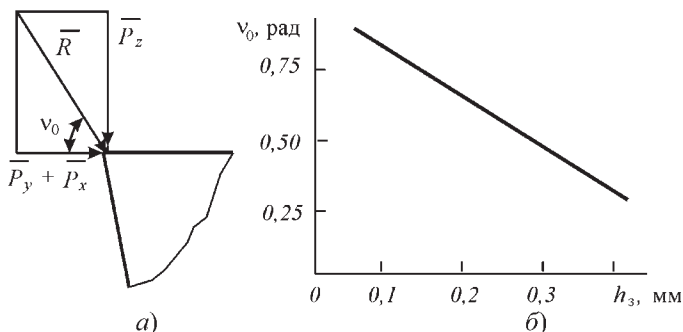


Рис. 6.36. Составляющие и результирующий вектор силы резания (а) и изменение угла  $\nu_0$  в зависимости от износа резца  $h_3$  (б)

Для вычисления напряжений на передней и задней поверхностях реза можно использовать формулу

$$S_R = \frac{2P}{br} \left\{ \frac{\cos \left[ \nu_0 - \left( \frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \cos \left[ \theta - \left( \frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta + \sin \beta} + \frac{\sin \left[ \gamma_0 - \left( \frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right] \sin \left[ \theta - \left( \frac{\beta}{2} + \gamma \right) \right]}{\beta - \sin \beta} \right\}, \quad (6.11)$$

где  $r$ ,  $\theta$  — полярные координаты точки, в которой определяют напряжения.

Расстояние  $r$  от режущей кромки до зоны максимальных напряжений примем равным  $2C$ . Обычно полная длина контакта  $C = (1,8 \dots 2,5)C_1$ . Здесь  $C_1$  — длина пластического контакта, которую для  $\gamma = 0^\circ$  вычисляли по формуле [3]:

$$C_1 = \frac{a \sin \left( \frac{\pi}{4} \right)}{\sin \Phi \sin \left( \frac{\pi}{4} + \Phi \right)}, \quad (6.12)$$

где  $a = S \sin \varphi$  — толщина среза;  $S$  — подача;  $\varphi$  — угол сдвига,  $\Phi = \arctg \frac{1}{\xi}$ ;  $\xi$  — усадка стружки.

Визуальный контроль позволил определить образующуюся стружку как сливную, что, очевидно, объясняется значительным разогревом зоны резания. Поэтому ее усадка  $\xi$  находилась по известной формуле  $\xi = \frac{a_1}{a}$ , где  $a_1$  — толщина стружки, мм (измерялась на микроскопе МБС-10). Для  $v = 1,66$  м/с усадка стружки  $\xi$  равна  $2,85 \pm 0,12$ .

Однако, как показала практика, возможны варианты, когда  $S_R \approx S_p$ . Тогда  $S_a < S_R < S_p$ . В этом случае кривые  $f(S_R)$  и  $f(S_p)$  при

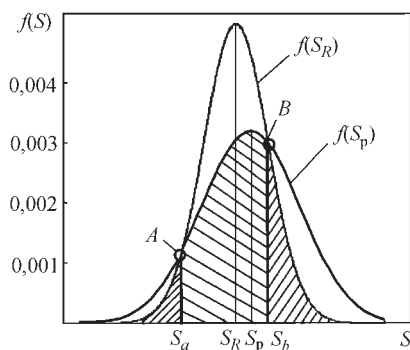


Рис. 6.37. Дифференциальные функции распределения при  $S_R \approx S_p$  и  $\sigma_{S_R} > \sigma_{S_p}$

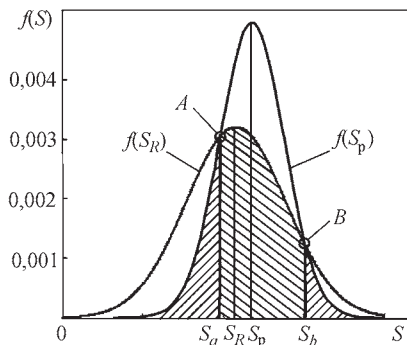


Рис. 6.38. Дифференциальные функции распределения при  $S_R \approx S_p$  и  $\sigma_{S_R} < \sigma_{S_p}$

$\sigma_{S_R} < \sigma_{S_p}$  будут иметь вид, показанный на рис. 6.37, а вероятность разрушения будет равна площади заштрихованной фигуры.

Тогда формула для определения вероятности разрушения будет иметь вид

$$P_p = \int_0^{S_a} f(S_R) dS + \int_{S_a}^{S_b} f(S_p) dS + \int_{S_b}^{\infty} f(S_R) dS, \quad (6.13)$$

где  $S_a$  и  $S_b$  — напряжения, соответствующие точкам пересечения графиков дифференциальных функций  $f(S_p)$  и  $f(S_R)$ .

В случае, когда  $\sigma_{S_R} > \sigma_{S_p}$ , функции  $f(S_R)$  и  $f(S_p)$  будут иметь вид, показанный на рис. 6.38.

В этом случае вероятность разрушения определяется по формуле:

$$P_p = \int_0^{S_a} f(S_p) dS + \int_{S_a}^{S_b} f(S_R) dS + \int_{S_b}^{\infty} f(S_p) dS. \quad (6.14)$$

В зависимости от соотношения между  $S_p$ ,  $S_R$ ,  $\sigma_{S_p}$  и  $\sigma_{S_R}$  имеем три варианта для расчета вероятности разрушения резцов:

когда  $S_R \ll S_p$ ,

$$P_p = \int_0^{S_a} f(S_p) dS + \int_{S_a}^{\infty} f(S_R) dS;$$

когда  $S_R \approx S_p$  и  $\sigma_{S_R} > \sigma_{S_p}$ ,

$$P_p = \int_0^{S_a} f(S_R) dS + \int_{S_a}^{S_b} f(S_p) dS + \int_{S_b}^{\infty} f(S_R) dS;$$



когда  $S_R \approx S_p$  и  $\sigma_{S_R} < \sigma_{S_p}$ ,

$$P_p = \int_0^{S_a} f(S_p) dS + \int_{S_a}^{S_b} f(S_R) dS + \int_{S_b}^{\infty} f(S_p) dS.$$

Аналогично для напряжений сжатия, когда  $S_R \gg S_c$ ,

$$P_p = \int_{-\infty}^{S_a} f(S_R) dS + \int_{S_a}^0 f(S_c) dS;$$

когда  $S_R \approx S_c$  и  $\sigma_{S_R} > \sigma_{S_c}$ ,

$$P_p = \int_{-\infty}^{S_a} f(S_c) dS + \int_{S_a}^{S_b} f(S_R) dS + \int_{S_b}^0 f(S_c) dS;$$

когда  $S_R \approx S_c$  и  $\sigma_{S_R} < \sigma_{S_c}$ ,

$$P_p = \int_{-\infty}^{S_a} f(S_R) dS + \int_{S_a}^{S_b} f(S_c) dS + \int_{S_b}^0 f(S_R) dS.$$

На протяжении периода стойкости резец может разрушиться как со стороны передней, так и со стороны задней поверхности. Для расчета вероятности разрушения напряжения на поверхностях резцов после каждого реза сравнивали с пределами прочности при растяжении и сжатии. В этом случае формула (6.7) выглядит иначе:

$$P = \begin{cases} \int_0^{S_a} f(S_p) dS + \int_{S_a}^{\infty} f(S_R) dS; \\ \int_{-\infty}^{S_a} f(S_R) dS + \int_{S_a}^0 f(S_p) dS. \end{cases} \quad (6.15)$$

Учитывая, что вероятности разрушения по передней и задней поверхностям резца являются независимыми случайными величинами, вероятность разрушения резца в целом вычисляется по формуле

$$P_p = P_{п} + P_{з} - P_{п}P_{з}.$$

## 6.6. ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СТМ

### 6.6.1. Применение алмазных инструментов

Наиболее эффективно применение алмазного инструмента на чистовых и отделочных операциях при обработке деталей из цветных металлов и их сплавов, а также из различных полимерных композиционных материалов. Инструмент может быть использован при точении прерывистых поверхностей и при фрезеровании одно- и многозубой фрезой, однако стойкость инструмента будет ниже, чем при обработке без удара. Например, средняя стойкость алмазных резцов между переточками при обработке латуни: точение непрерывное —  $(1,5...2) \cdot 10^5$  м; точение прерывистое —  $(1,5...2,5)10^4$  м; фрезерование —  $(1,7...3) \cdot 10^4$  м [22]. Обработка может проводиться на врезание и на проход.

Если стойкость инструмента при обработке латуни принять за единицу, то при обработке алюминиевых сплавов стойкость инструмента составит 1,15...1,25, а свинцовистого нейзильбера — 0,75...0,85.

Алмазное фрезерование обычно применяют для обработки деталей из цветных металлов и сплавов, драгоценных металлов, плоскостей и пазов с высокими требованиями по плоскостности. При этом на чистовую обработку оставляют припуск не более 0,1...0,15 мм. В табл. 6.14 приведены рекомендации по режимам резания инструментом из природного алмаза.

Двухслойные алмазно-твердосплавные режущие пластины круглой формы эффективно используются при обработке поршней двигателей внутреннего сгорания из силуминовых сплавов. Такие пластины применяются при обточке поршней по копиру на четырехшпиндельных станках-полуавтоматах мод. ОС-6036, в автоматических линиях. Режущие пластины крепятся в специальных державках, вставляемых в резцедержатели, которые связаны с копировальным устройством и совершают при обработке поршней качательные движения, обеспечивающие заданную геометрию обрабатываемых деталей. Резцедержатель с инструментом помещается в суппорте, осуществляющем продольную подачу по направляющим скольжения. Подача суппорта производится посредством гидравлической системы.

## 6.14. Рекомендуемые режимы резания резцами из природного алмаза

Обрабатываемый материал	Скорость резания $v$ , м/с	Подача $S$ , мм/об	Глубина резания $t$ , мм
Алюминиевые литые сплавы	10,0...11,5	0,010...0,04	0,01...0,20
Алюминиево-магниевые сплавы	6,6...8,3	0,010...0,05	0,01...0,20
Алюминиевые жаропрочные сплавы	4,1...6,6	0,020...0,04	0,05...0,10
Дуралюмин	8,3...11,5	0,021...0,04	0,03...0,15
Медь	6,0...8,3	0,010...0,04	0,01...0,40
Бронза:			
оловянистая	4,1...6,6	0,040...0,07	0,08...0,20
алюминиево-железистая	11,5	0,020...0,04	0,03...0,06
свинцовистая	10,0...11,5	0,025...0,05	0,02...0,05
Латунь	8,3	0,020...0,06	0,03...0,06
Баббит	6,6...8,3	0,010...0,05	0,05...0,20
Монель	2,5...5,0	0,010...0,02	0,03...0,05
Титановые сплавы	1,6...5,0	0,020...0,05	0,03...0,06
Пластмассы	1,6...3,3	0,020...0,05	0,05...0,15
Стеклотекстолит	10,0...11,5	0,020...0,05	0,03...0,05
Резина	5,0...6,6	0,010...0,04	0,02...0,06

Технические требования к обрабатываемым деталям: допуск на диаметр головки поршня 0,08 мм, юбки 0,02 мм, шероховатость поверхности менее  $Ra$  1,25. Поршни обрабатываются за один проход при скорости до 2 м/с, подаче — 0,3 мм/об. В связи с овалностью профиля юбки в поперечном сечении, а также ее конусностью глубина резания за один оборот шпинделя изменяется от 0,39 до 0,45 мм, а по мере движения резца вдоль детали от 0,39 до 0,54 мм. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости используется 5 %-ный водный раствор эмульсола.

Для обточки применяют режущие пластины диаметром 6,35, 7,50 и 12,7 мм, толщиной 2,48, 2,80, 3,18 мм соответственно. Резцы, оснащенные этими пластинами, имеют передний угол  $\gamma = 0$ , задний — 7 и 11°. Применение круглых пластин позволяет обеспечить четыре–шесть периодов стойкости без переточек (за счет поворота пластины и использования всего ее периметра), стабильную шероховатость обработанной поверхности, повысить производительность обработки в 1,5 раза, снизить процент брака. Срок службы режущих пластин составляет 15...20 тыс. поршней, что в 2 раза больше, чем резцовых вставок из алмаза марки АСПК.

Успешно применяют режущие пластины из ПСТМ при обработке полимерных композиционных материалов. Использование режущих пластин с механическим креплением и их переустановкой позволяет повысить стойкость в 15–25 раз по сравнению с инструментом из твердого сплава и в 2–4 раза — из балласа (АСБ). Форма и размеры режущих пластин из поликристаллов способствуют увеличению глубины резания до 4...10 мм, подачи — до 0,6...0,9 мм/об, совмещению получерновых, получистовых и чистовых операций лезвийной обработки деталей из композиционных материалов.

Скорость резания при обработке деталей из полимерных композиционных материалов составляет 6...8,5 м/с. Применение режущих пластин из поликристаллов круглой формы позволяет значительно повысить качество обрабатываемых деталей. Производительность обработки повышается в 2–3 раза.

Еще одной из перспективных областей применения поликристаллического алмазного инструмента является обработка трудно поддающихся резанию и вызывающих быстрый износ инструмента таких материалов, как древесно-стружечные плиты, плиты средней плотности с высоким содержанием клея, с покрытиями на основе меламиновой смолы, декоративный бумажно-слоистый пластик, а также другие материалы, обладающие абразивным действием. Обработка таких материалов обычным инструментом неэкономична.

Режущий инструмент, применяемый в деревообрабатывающей промышленности и промышленности по переработке пластмасс, оснащают поликристаллами алмаза. Такой инструмент имеет стойкость в 200–300 раз превышающую стойкость твердосплавных инструментов.

### 6.6.2. Применение инструментов с режущими элементами из ПСТМ на основе сBN

Как показывает опыт использования режущего инструмента, каждому обрабатываемому материалу соответствует оптимальный инструментальный материал, отличающийся от других какими-либо характеристиками зерен сBN (модификация, размер зерна, концентрация и т.д.), связки (материал, размер зерна, физико-механические характеристики и т.д.), режимами получения и т.д.

Например, для точения напыленного покрытия на основе Ni–Cr рекомендуется композиция с содержанием 60 % сBN на металло-карбидной связке. Оптимальной концентрации сBN соответствует материал, обеспечивающий максимальную работоспособность при обработке конкретного материала. Вероятно, в материале инструмента в этом случае реализуется такое сочетание свойств и структуры, которое обеспечивает его минимальный износ при заданных условиях эксплуатации. При этом совсем не обязательно, чтобы характеристики материала были максимально высокими.

В то же время соображения экономики предполагают использование определенных марок инструментальных материалов для обработки больших групп и классов обрабатываемых материалов.

С учетом совокупности свойств, в табл. 6.15 приведены области рационального применения некоторых ПСТМ.

Главным резервом повышения производительности обработки при использовании инструментов с режущими элементами из ПСТМ на основе сBN является скорость резания (табл. 6.16). Из табл. 6.16 видно, что наибольшая эффективность применения ПСТМ имеет место при обработке высокопрочных сталей и сплавов.

Работоспособность режущего инструмента во многом определяется химическим составом обрабатываемого материала. Наличие в обрабатываемом материале адгезионно-активных к сBN металлов, таких как Ti, Cr и др., обуславливает повышенную интенсивность износа инструмента и, как правило, меньшую производительность обработки за счет снижения скорости резания.

Так, максимумы стойкости инструмента для сталей с большим содержанием хрома располагаются в зоне более низких скоростей резания.

**6.15. Области применения инструментов с режущими элементами из ПСТМ на основе cBN**

ПСТМ, производитель	Область применения
Amborite, Element Six, ЮАР	Непрерывное и прерывистое резание закаленных легированных сталей, твердых чугунов, отливок 60 HRC, труднообрабатываемых материалов
Ambrazite, Element Six, ЮАР	Обработка высокопрочных чугунов, сталей, твердых покрытий паяным инструментом
DBC 50 (80), Element Six, ЮАР	Чистовая обработка закаленных и легированных сталей и чугунов
Sumiboron BN200, Sumitomo Electric Ind., Япония	Непрерывное и прерывистое резание закаленных и легированных сталей и чугунов и легированных сталей и чугунов
Q-bonite BX241, Toshiba Tangaloy Co. Ltd, Япония	Обработка сталей и чугунов в условиях прерывистого резания
Wurtzin WBN-T8, Nippon Oil and Fats Co, Япония	Обработка сталей твердостью 40...60 HRC. Обработка сталей твердостью менее 40 HRC
Композит 01, ПО «Ильич», Россия	Чистовая обработка закаленных сталей и чугунов
MBR7010, Микробор Нанотех Россия	Получистовая и черновая обработка твердых материалов, особенно закаленных сталей, может обрабатывать чугуны. Подходит как для прерывистой обработки при тяжелых условиях с большой глубиной резания, так и для непрерывного получистового точения
MBR 7020, Микробор Нанотех Россия	Непрерывная черновая, получистовая и финишная обработка чугуна марок СЧ, ВЧ, хромистого и легированного чугуна. Может использоваться для получистовой обработки закаленных сталей

Окончание табл. 6.15

ПСТМ, производитель	Область применения
МВР 7040, Микробор Нанотех, Россия	Высокоскоростная обработка закаленных сталей в условиях непрерывной получистовой и финишной обработки. Можно обрабатывать как с охлаждением, так и без него
Композит 10, ИПМ, Украина	Непрерывное и прерывистое резание термообработанных сталей, чугунов, твердых сплавов с содержанием 15 % Со, наплавленных и напыленных покрытий. Обработка сталей с аустенитной структурой
Киборит, борсинит, ИСМ, Украина	Непрерывное и прерывистое резание труднообрабатываемых термообработанных сталей и сплавов, чугунов любой твердости, высокотвердых наплавленных материалов мартенситного класса, напыленных материалов на основе Fe, Ni, Со, композиций с включениями твердых сплавов
ВЗN Comрах, General Electric Co, США	Получистовая и чистовая обработка цветных металлов и сплавов, в том числе с абразивными включениями, например, силуминов, полимерных композиционных материалов с абразивными включениями, древесных и древесно-стружечных материалов

Эффективность применения инструментов из различных материалов может быть оценена с помощью коэффициента  $K$  [27] по формуле:

$$K = \left( \frac{h_3}{TQ} \right) \left( \frac{TQ}{h_3} \right), \quad (6.16)$$

где  $h_3$  — износ инструмента за период стойкости, мм;  $T$  — стойкость инструмента, мин;  $Q$  — производительность обработки, м<sup>3</sup>/мин; значком «э» обозначены показатели для эталонного инструмента.

### 6.16. Скорости резания резцами, оснащенными ПСТМ и твердым сплавом

Обрабатываемый материал	Скорость резания $v$ , м/с, для инструментального материала	
	ПСТМ	Твердый сплав
Сталь:		
150...250 HB	1,66...3,33	2,10...5,00
45...55 HRC	1,33...2,66	0,6...1,15
60...70 HRC	1,00...2,00	0,15...0,50
Серый чугун: 120...240HB	6,66...16,66	1,66...3,33
Высокопрочный чугун: 160...330 HB	5,00...13,33	0,83...1,66
Отбеленный и закаленный чугун: 40...60 HRC	0,83...2,50	0,15...0,31

В табл. 6.17 для сравнения работоспособности инструментов из твердого сплава Т15К6 и киборита при точении наплавленных покрытий представлены некоторые значения коэффициента  $K$  [27].

### 6.17. Сравнительная работоспособность\* инструментов из ПСТМ

Обрабатываемый материал	$K$
Наплавленное покрытие ЛС 5Х4В3МФС	36,0
Наплавленное покрытие ПП-Нп-35В9Х3СФ	24,2
Напыленное покрытие ПН-Х80С3Р3	17,3

\* Сравнение с работоспособностью резцов из твердого сплава Т15К6.

Предлагаемый коэффициент учитывает эффект от применения инструментального материала за счет увеличения стойкости инструмента и производительности обработки, т.е. учитывает изменение себестоимости процесса обработки.

Приведенные в табл. 6.17 значения коэффициента  $K$  соответствуют повышению производительности обработки покрытий в



2–5 раз при одновременном увеличении стойкости резцов в 4–8 раз при использовании инструмента, оснащенного ПСТМ киборит.

Одной из возможностей повышения эффективности инструмента из ПСТМ на основе сVN является использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Могут использоваться жидкие и газообразные СОТС. Учитывая особенности инструмента из сVN, более целесообразно применение жидких сред не поливом, а распылением. Распыление СОТС рекомендуется при скоростях резания до 1,5...1,7 м/с.

Эффективно использование масляных СОТС с присадками для сверхвысоких давлений. Благодаря реакции с сVN, приводящей к образованию пленки твердой смазки на поверхностях инструмента, они препятствуют охрупчиванию сVN под воздействием нагрева режущей кромки в процессе резания и последующего охлаждения в жидкой среде или атмосфере. В качестве присадок используются сера и хлор.

Использование при обработке инструментом из сVN водорастворимых и водонерастворимых масляных эмульсий позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5–2 раза.

Применение в качестве СОТС газовых сред, препятствующих проникновению кислорода воздуха к контактным поверхностям инструмента, также способствует повышению его работоспособности.

Основные преимущества от применения инструментов из ПСТМ сводятся к повышению стойкости инструмента, увеличению периода между циклами замены, повышению точности и стабилизации шероховатости обработанных поверхностей, сокращению объема работы на последующих операциях (например, хонинговании), повышению производительности обработки. Особенно следует отметить перспективность применения фрез, оснащенных ПСТМ. Повышение производительности обработки торцовыми фрезами достигается за счет резкого увеличения скорости резания (в 10...20 раз в сравнении с инструментом из твердого сплава) при пониженных величинах подачи на зуб фрезы.

Существенное увеличение кинетической энергии, характеризующей способность фрезы выполнять работу резания, приводит к уменьшению инерционности системы крутильных колебаний, меньше становится значимость механического удара в процессе износа режущих кромок инструмента, уменьшается термоциклическое

воздействие на режущие кромки инструмента, меняется физическая картина контактных процессов в зоне деформации в сторону уменьшения работы деформации, что приводит к уменьшению силы резания и улучшению качества обработанной поверхности.

Применение фрез из ПСТМ на основе сBN при обработке плоскостей под головку блока цилиндров ДВС (чугун блокочный СЧ25) позволяет увеличить производительность обработки в 2–2,5 раза и снизить шероховатость обработанной поверхности до значений менее  $Ra$  2,5.

При фрезеровании силуминовых сплавов скорость резания увеличивается всего в 2–2,5 раза и основной эффект достигается за счет существенного повышения стойкости инструмента (до десятков раз) и уменьшения шероховатости обработанной поверхности.

Большинство деталей металлургического оборудования упрочняют электродуговой ручной или автоматической наплавкой порошковыми лентами или проволоками. При этом применяется электродуговая наплавка порошковыми проволоками ПП-Нп-35В9Х3СФ (46...52 HRC), ПП-Нп-25Х5ФМС (45...50 HRC), ПП-Нп-30Х4Г2М (52...58 HRC), спеченными лентами ЛС-70Х3НМ (54...56 HRC), ЛС-5Х4В3МФС (45...50 HRC), порошковой лентой ПЛ-АН 111 (48...55 HRC), плазменная наплавка порошками ПГ-СР3 (47...52 HRC), ПГ-СР4 (54...58 HRC), ПГ-СР5 (60...62 HRC), печная наплавка композиционным материалом релит-мельхиор. Исследования и промышленная проверка их результатов позволила заключить, что при точении указанных защитных покрытий наибольшую работоспособность имеют инструменты, оснащенные поликристаллами сBN.

## Глава 7

### АЛМАЗНО- И СВN-АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

#### 7.1. КОНСТРУКЦИИ АЛМАЗНО- И СВN-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Среди абразивного инструмента из сверхтвердых материалов (СТМ) наиболее широка номенклатура абразивных кругов (рис. 7.1) с разнообразными формами рабочей поверхности в виде алмаз- и cBN-содержащего слоя.

На рис. 7.2 приведена схематическая классификация кругов из СТМ, в которой последовательно представлены их составные элементы.

По виду выполняемых технологических операций круги подразделяют на следующие:

— шлифовальные — для обработки изделий с достижением шероховатости обработанной поверхности до  $Ra\ 0,08$ ;



Рис. 7.1. Круги шлифовальные алмазные

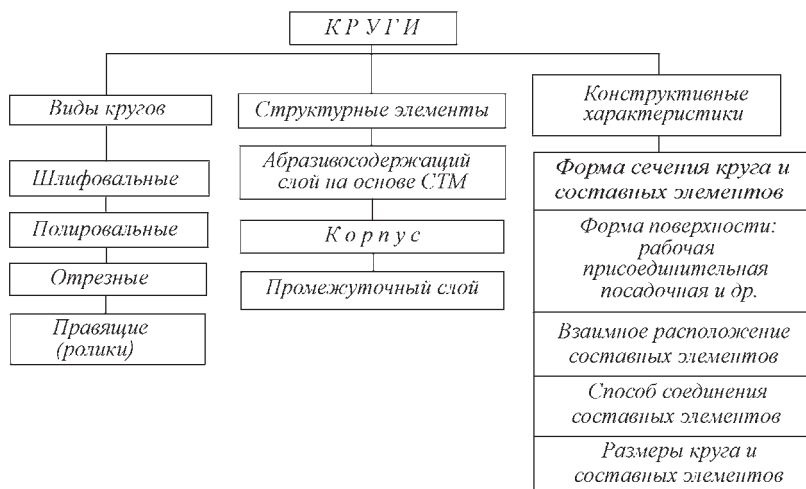


Рис. 7.2. Структура и конструктивные характеристики абразивных кругов из СТМ

— полировальные — для обработки изделий с достижением шероховатости обработанной поверхности до  $Rz\ 0,04...0,05$ ;

— отрезные — для резки различных материалов;

— правящие — для правки кругов из абразивных материалов (корунда, карборунда и др.).

Основными конструктивными элементами кругов являются: корпус, абразивосодержащий слой и промежуточный слой, который обеспечивает прочное соединение абразивосодержащего слоя с корпусом. Промежуточный слой служит также для уменьшения внутренних напряжений в случаях, когда температурные коэффициенты расширения корпуса и абразивосодержащего слоя существенно разнятся. Корпуса кругов изготавливаются из различных металлических и неметаллических материалов и имеют посадочные отверстия для закрепления кругов на шпинделе станка.

Конструкцию кругов определяет выбор: формы сечения круга; назначения поверхности (рабочая, присоединительная, посадочная); взаимного расположения составных элементов и способов их соединения; размеров круга и составных элементов. На выбор конструкции существенное влияние оказывают характеристики, определяющие эффективность работы кругов; материалы составных

элементов, их физико-механические свойства; жесткость круга и составных элементов; возможная неуравновешенность; геометрическая точность формы, допуски на размеры; надежность соединения отдельных элементов; износостойкость; долговечность; энергоемкость; производительность.

Изготовлению кругов предшествует их конструирование и расчет основных параметров, определение связей структурных элементов. К ним следует отнести выбор вида инструмента, исходя из его назначения; определение количества рабочих конструктивных



Рис. 7.3. Конструктивные и функциональные характеристики абразивосодержащего слоя кругов

элементов; выбор формы сечения корпуса, формы рабочей, присоединительной, посадочной и вспомогательных поверхностей, а также взаимного расположения структурных элементов и способа их соединения; характеристики абразивосодержащего слоя.

На рис. 7.3 представлена структура абразивосодержащего слоя различных кругов. На рис. 7.4 приведены типовые формы сечений абразивосодержащего слоя, в табл. 7.1 представлены обозначения форм и сечений кругов по классификации, предлагаемой Европейским стандартом FEPA. Шлифовальные круги характеризуются наружным диаметром  $D$ , шириной  $W$  и толщиной  $T$  абразивосодержащего слоя, диаметром посадочного отверстия  $H$ , параметром прерывистости и рядом других основных размеров ( $\nu$  — угол при вершине для кругов 1EE1 и др.).

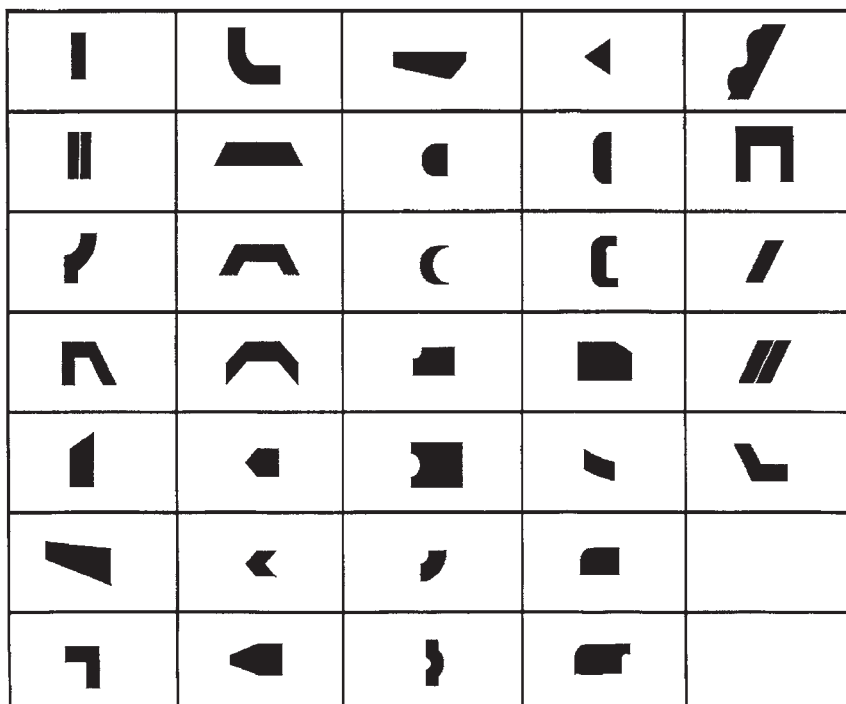
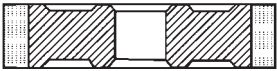
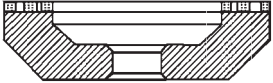
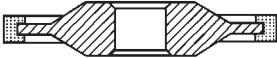
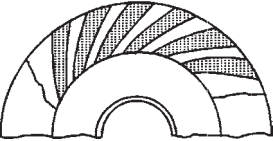
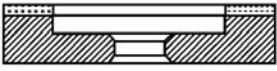
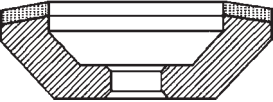

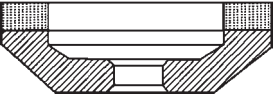
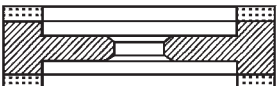
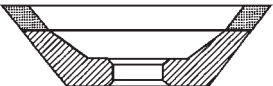

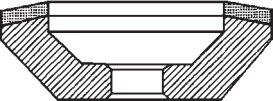

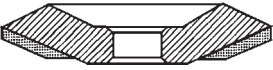
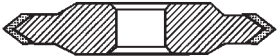
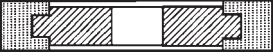
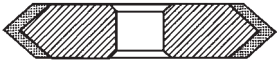
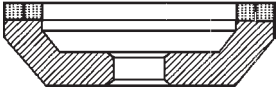
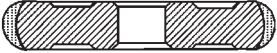
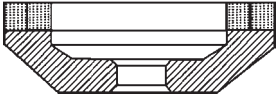
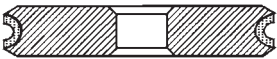
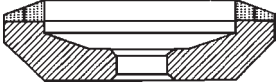


Рис. 7.4. Формы сечения абразивосодержащего слоя шлифовальных кругов из СТМ

## 7.1. Обозначение форм и сечения кругов

Форма круга	Формы сечения	Форма круга	Формы сечения
1A1		12A2-45SS/C1	
14U1			
6A2		12V5-45°	
6A2 C		12A2-20°	
9A3		12R4	
12A2-45°		12V5-20°	
11V9-70°		12D9	
14EE1		1A1R	

Окончание табл. 7.1

Форма круга	Формы сечения	Форма круга	Формы сечения
1EEI		12A2-45°	
1FFI		12A2-20°	
1FF6V		12M2-45°	

В алмазно- и cBN-абразивном инструменте рабочая часть состоит из зерен порошка сверхтвердого материала, которые распределены и прочно закреплены в сплошной или пористой матрице (связке). Для изготовления такого инструмента используют в основном шлиф- и микропорошки синтетического алмаза и cBN. Алмазосносный и cBN-слой прочно соединен с корпусом инструмента склейкой, пайкой, сваркой. В отличие от инструмента из обычных абразивов ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), наличие корпуса позволяет использовать алмазосносный и cBN-слой до полного износа.

Алмазосносный и cBN-слой инструмента представляет собой композиционный материал с матричной структурой, в которой один из компонентов является непрерывной фазой (связка), другой (зерна алмаза или cBN) равномерно распределен в ней в виде включений. Основной проблемой при разработке таких материалов является обеспечение прочного закрепления частиц твердой фазы в матрице и, в то же время, максимальное сохранение ее химической индивидуальности в условиях эксплуатации. При разработке абразивных композиций из СТМ стремятся к тому, чтобы инструмент, изготовленный на их основе, работал в режиме самозатачивания. При этом по мере износа и притупления алмазных зерен изнашивается связка и обнажаются новые алмазные зерна. Если связка изна-



шивается медленнее абразивных зерен — инструмент теряет режущие свойства (засаливается), если быстрее — происходит интенсивный износ алмазонасного слоя.

С использованием алмазно- и cBN-содержащих композиционных материалов выпускается широкая гамма инструментов разных форм и размеров, на различных связках.

Связкой называется материал, служащий для закрепления абразивных зерен в рабочем слое. Компонентом связки является наполнитель, который повышает стойкость, улучшает режущие свойства абразивного инструмента, определяет физико-механические, теплофизические и другие свойства алмазно- и cBN-носного слоя. В качестве наполнителей используют абразивные и металлические порошки, органические вещества. Вид и структура связки, наряду с концентрацией, маркой и зернистостью алмазного и cBN-порошков, являются основными характеристиками, определяющими работоспособность и эффективность и алмазно- и cBN-абразивных инструментов. Поэтому связка должна:

- обладать хорошей смачиваемостью по отношению к алмазу и cBN;
- прочно удерживать абразивные зерна;
- обеспечивать самозатачивание, т. е. по мере затупления абразивных зерен должна изнашиваться, способствуя выпадению затупившихся зерен и вскрытию режущих граней новых зерен;
- обладать достаточной термостойкостью и иметь хорошую теплопроводность;
- в паре с обрабатываемым материалом иметь минимальный коэффициент трения;
- иметь температурный коэффициент линейного расширения, приближающийся к температурному коэффициенту линейного расширения алмаза или cBN;
- не вступать в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и охлаждающей жидкостью.

Основные виды абразивных инструментов из СТМ выпускаются на органических, металлических и керамических связках (рис. 7.5).

Один и тот же вид инструмента можно выпускать на различных связках. Например, хонинговальные бруски выпускаются на поли-

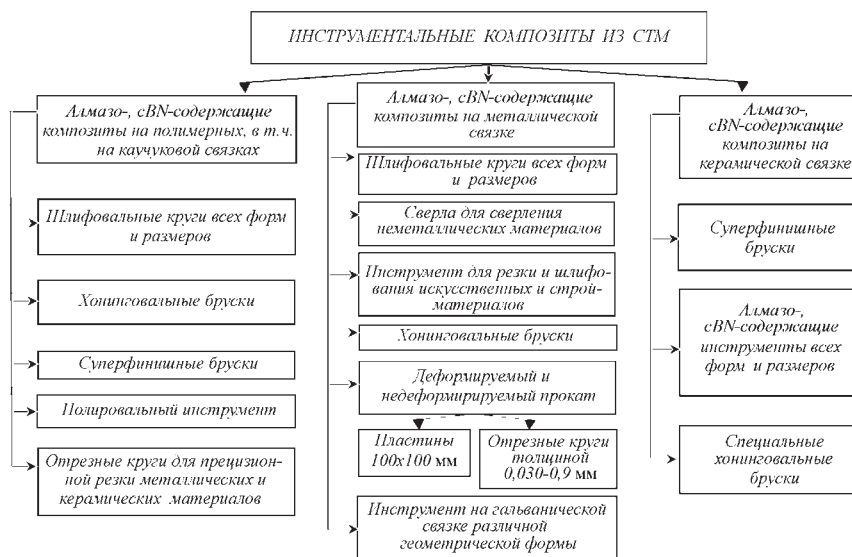


Рис. 7.5. Основные виды абразивных инструментов из СТМ

мерной, металлической и керамической связках. Такое разнообразие брусков связано со свойствами различных обрабатываемых материалов (чугуна, стали и др.), а также с производительностью обработки и необходимым качеством обрабатываемых изделий. Это в равной степени относится и к другим видам инструмента из алмаза и cBN.

В табл. 7.2 приведены рекомендации по выбору марки и зернистости порошков алмаза и cBN (марки кубонит) для изготавливаемого инструмента на различных связках.

По требованию заказчика марка и зернистость алмазного и cBN-порошка может быть изменена.

Возможно также изготовление шлифовального инструмента из порошков природного алмаза (400...600 мкм), однако, как правило, работоспособность такого инструмента в 2–5 раз ниже, чем аналогичного инструмента из синтетического алмаза. Крупные кристаллы природного алмаза (более 0,8...1,0 мм) преимущественно используют для изготовления правящих инструментов, карандашей, алмазных игл, алмазных роликов и т.п.

## 7.2. Рекомендации по выбору марки алмаза и сBN в зависимости от материала связки

Связка	Марка алмаза, сBN	Зернистость алмаза, кубонита
Органическая жесткая	Микропорошки АСМ, АСН, шлифпорошки АС2, АС4, АС6, АС15, АС2МА, АС2М, АС4М, АС4МА, АС6М, АС6МА, АС15М, АС15МА с металлическим покрытием; КО, КР, КОС, КРС, КОМ — со стеклопокрытием и металлическим покрытием	Микропорошки 1/0 и крупнее; шлифпорошки 50/40 и крупнее; шлифпорошки сBN 50/40 и крупнее
Органическая каучуксодержащая	Микропорошки АСМ; шлифпорошки АС2, АС4	Микропорошки 1/0 и крупнее; шлифпорошки 50/40 и крупнее
Керамическая	Микропорошки АСМ, АСН, КМ; шлифпорошки КО, КР, АС4...АС15	Микропорошки 3/2 и крупнее; шлифпорошки 50/40 и крупнее
Металлическая	Микропорошки АСМ, АСН; шлифпорошки АС6... АС200	Микропорошки 14/10 и крупнее; шлифпорошки 50/40 и крупнее
Металлическая, изготавливаемая методами электрохимии	Микропорошки АСМ, АСН; шлифпорошки АС15...АС50	Микропорошки 28/20 и крупнее; шлифпорошки 50/40 и крупнее

### 7.1.1. Композиты на металлической связке

Составы металлических связок для алмазно- и сBN-абразивного инструмента выбирают в основном в системах Cu–Sn; Cu–Al–Zn; Co–Fe–Ni; Co–Fe; Co; Ni–Fe–Cu.

Медно-оловянистые композиции, наполненные порошками СТМ, широко используются для изготовления инструмента, применяемого в первую очередь для обработки неметаллических и

металлических материалов (шлифовальные и отрезные круги, сверла и др.)

Для улучшения режущей способности инструментов в связку вводятся наполнители различного функционального назначения. Так, сульфиды, графит и фториды выполняют роль твердых смазок. Наличие в режущем слое таких веществ способствует уменьшению коэффициента трения в зоне контакта, а следовательно, и снижению теплонапряженности кругов. Для снижения пластичности в матрицу на основе медь—олово вводится некоторое количество хрупких и твердых добавок — диборидов, оксидов и других соединений. Объемная доля наполнителя в зависимости от материала связующего составляет 3...20 %. Распределение наполнителя в рабочем слое инструмента стохастическое.

Связки на основе медь—алюминий отличаются более низкой температурой плавления, чем связки на основе медь—олово. Инструменты, изготовленные на основе  $Cu-Al$ , используют для обработки, как твердых сплавов, так и неметаллических материалов. В основу связки вводят различные наполнители, повышающие антифрикционные свойства, прочность, антикоррозионные свойства.

Алмазо-металлические композиции на основе железа, никеля, кобальта многокомпонентны и, как правило, включают в себя один или два металла триады железа. Инструмент на связках на основе металлов триады железа, как правило, изготавливается для обработки природных и искусственных строительных материалов, отличающихся высокой твердостью и абразивной способностью. Поэтому для таких инструментов применяют высокопрочный алмаз марок AC65...AC200 зернистостью 250/200...500/400.

Для изготовления металлических связок используются металлические порошки с размером зерен основной фракции меньше 100 мкм. Порошки должны быть не окисленные и иметь развитую поверхность.

Для изготовления инструмента на медно-оловянистых связках используют алмазные порошки марок AC6...AC65 зернистостью 50/40...630/500. Кроме того, по заказам предприятий-потребителей изготавливается инструмент и из микропорошков алмаза (АСМ 2/1...АСМ 60/40).

При изготовлении инструмента на связках, выбранных в системе  $Cu-Al-Zn$ , применяют порошки тех же марок и зернистостей, что и для связок на медно-оловянистой основе.

Металлические связки обозначаются индексом «М» и цифрами: первая характеризует группу связки, вторая — порядковый номер состава в данной группе. К первой группе относят связки преимущественно на основе алюминия, например М1-01; ко второй — универсальные связки широкого назначения на основе медь—олово, например М2-09; к третьей группе — связки, используемые для изготовления инструмента методом проката и вакуумной технологии. Четвертая группа включает в себя связки, изготавливаемые методом гальваностегии с однослойным расположением зерен алмаза. В пятую группу включены связки для хонингования, притирки, доводки, суперфиниширования, в шестую — связки для инструмента для обработки камня, строительных материалов, горных пород.

Алмазные и cBN-частицы в металлической связке можно закреплять различными методами, но промышленное значение имеют два метода: порошковой металлургии и электрохимического осаждения, причем в общем объеме выпуска преобладает инструмент, изготовленный методами порошковой металлургии.

Суть метода порошковой металлургии заключается в том, что смесь металлических порошков с другими компонентами подвергают уплотнению и последующей термической обработке (спеканию) при температуре ниже температуры плавления хотя бы одного из компонентов. В результате процессов диффузии, расплавления легкоплавких компонентов с образованием растворов спрессованное тело после термической обработки и последующего постепенного охлаждения приобретает высокую прочность, электропроводность и другие уникальные физико-механические свойства. Использование металлических порошков в качестве исходных позволяет получать с помощью пресс-формы заготовки абразивного слоя точные по форме и размерам, что сводит к минимуму объем механической обработки труднообрабатываемых СТМ-содержащих композитов. При использовании металлических порошков в качестве компонентов шихты связки легко обеспечить равномерное распределение зерен cBN и алмаза по всему объему формируемого слоя.

Преимущества метода порошковой металлургии в крупномасштабном производстве обуславливают широкое применение его на многих промышленных предприятиях. Однако в ряде случаев, например, при производстве тонких (менее 0,2 мм) отрезных кругов,

сложно-фасонных и мелких инструментов, метод порошковой металлургии не может быть использован из-за технологических трудностей. Для закрепления зерен алмаза в металлической связке при выпуске таких инструментов используют методы электрохимического производства.

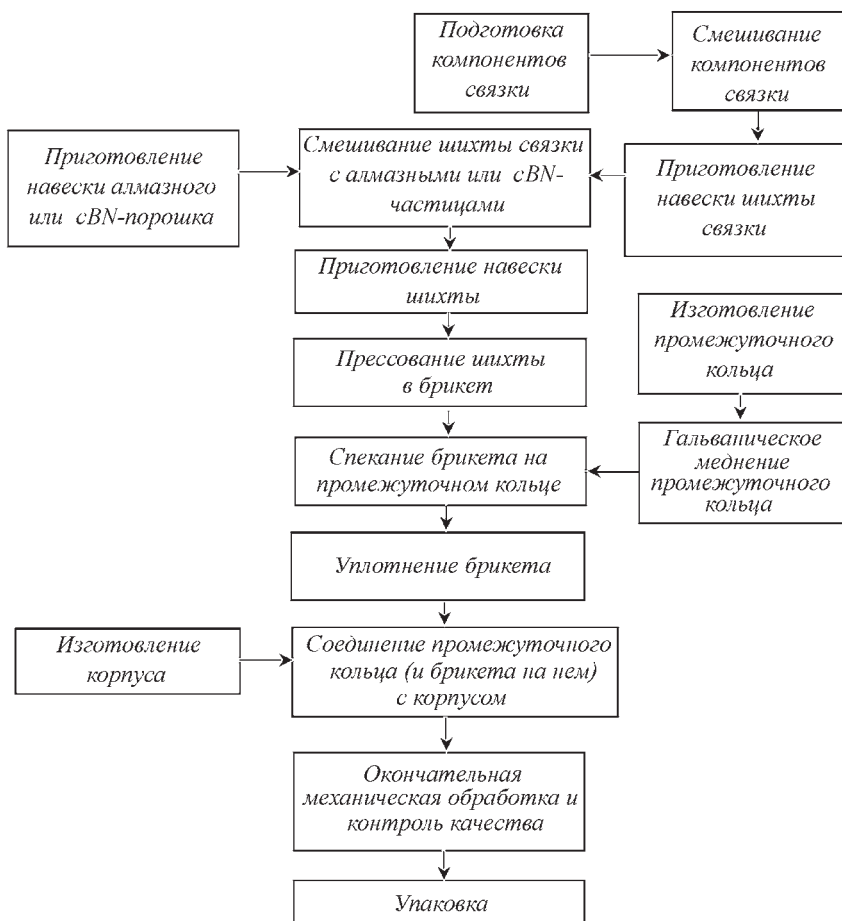
Технология изготовления алмазного инструмента на металлической связке методом порошковой металлургии включает в себя следующие основные операции: смешивание шихты, прессование, спекание и горячую допрессовку композиции в пресс-форме (рис. 7.6). Между рабочим слоем и корпусом инструмента находится промежуточное кольцо, имеющее слой гальванической меди. Наличие меди на поверхностях кольца обеспечивает более прочное закрепление на нем брикета шихты рабочего слоя инструмента и более прочное соединение с корпусом.

Для изготовления шихты проводят расчет массы частиц алмаза или cBN и связки по заданной концентрации наполнителя и объему брикета изделия. Для расчета содержания отдельных компонентов связки задаются процентным их соотношением. При изготовлении рабочей части инструмента с объемным распределением алмаза или cBN содержание их задают условной относительной концентрацией. При этом за условную относительную концентрацию 25 % принимают содержание в 1 см<sup>3</sup> шихты 4,4 карата СТМ. Условная относительная концентрация СТМ в абразивосодержащих материалах, используемых в инструментах, не превышает 200 %.

Для приготовления шихты связок применяют готовые порошки, выпускаемые промышленностью. Порошки меди, как правило, восстанавливают в среде водорода. Порошки металлов и наполнителей перед смешиванием просеивают через металлические проволочные сита (ГОСТ 6613–86). Для просеивания используют механические (вибросита) и пневматические установки.

Шихту смешивают в барабанных и скоростных смесителях. Наиболее распространен процесс смешивания в медленно вращающихся (3...40 мин<sup>-1</sup>) наклонных барабанах в течение 24...28 ч. В установке в неподвижной герметично закрытой емкости вращается вал с поперечно расположенными элементами. При вращении вала частицы связки интенсивно перемешиваются в течение 2...4 мин.

Качество приготовленной связки контролируется.



**Рис. 7.6. Технологическая схема изготовления инструмента из СТМ на металлической связке методом порошковой металлургии**

Смешивание связки с алмазным или cBN-порошком является важной операцией. Ввиду того что удельные объемы порошков алмаза и металлов резко отличаются, важным является обеспечить равномерное распределение зерен алмаза по всему объему композиции. Для предотвращения расслаивания композиции, последние перед смешиванием увлажняют 20 %-ным раствором глицерина в спирте.

Частицы порошков металлов обволакивают зерна алмаза и при высушивании образуют вязкую пленку на частицах. Глицерин в процессе спекания улетучивается, практически не загрязняя шихту.

При брикетировании наиболее часто используют пресс-формы из инструментальных сталей, закаленных до твердости 48...54 HRC. После засыпки шихты в полость пресс-формы устанавливают пуансон и затем на гидравлическом прессе производят прессование с заданным давлением. Для связок на основе Cu—Sn оно составляет 200...300 МПа. При таком давлении обеспечивается прочность брикета, необходимая для укладки его в пресс-форму для спекания и уплотнения. Температура спекания составляет  $0,8T_{пл}$  основного компонента.

В результате спекания смеси из медного и оловянистого порошков при температуре 1023 К с выдержкой 0,5...1 ч и последующей допрессовки при 100 МПа в композиции происходят сложные структурные изменения. Олово растворяется в меди, происходит гомогенизация сплава и он благодаря горячей допрессовке получает беспористую структуру. При этом, как показали исследования, в композиции образуются высокопрочная и пластичная  $\alpha$ -фаза, более хрупкая  $\delta$ -фаза и включения эвтектоида. Высокотемпературные наполнители, введенные в композиции, практически не изменяют структуру и находятся в связке в виде включений. Низкотемпературные наполнители (стекло и др.) располагаются по границам зерен.

Связки на основе медь—алюминий отличаются низкой температурой плавления. Температура спекания этих связок ниже, чем связок на основе медь—олово на 200...250 К. При спекании происходит интенсивное взаимодействие алюминия с медью с образованием интерметаллидов следующего состава:  $Cu_9Al_4$ ,  $CuAl_2$ ,  $CuAl$ .

Спекание брикетов на металлической связке протекает с участием жидкой фазы, которое, как известно, контролируется размером частиц, смачиваемостью твердой фазы жидкой, вязкостью и поверхностным натяжением жидкой фазы.

В широком интервале температур алмаз смачивают карбидообразующие (алюминий, кремний, бор) и переходные металлы (титан, хром, марганец, ванадий, ниобий, молибден, вольфрам, железо, кобальт, никель, палладий, платина), т.е. металлы, которые химически взаимодействуют с углеродом с образованием на межфазной границе соответствующего карбида. Это в равной степени



относится и к смачиванию cBN, т.е. на границе контакта образуются соответствующие бориды и нитриды.

Металлы, смачивающие поверхность алмаза и cBN, называют адгезионно-активными к углероду и нитриду бора.

На практике для повышения адгезии связки к режущим зернам алмаза и cBN в ее состав вводят добавки адгезионно-активных металлов в виде гидридов, гидроксидов и т.д. Учитывая высокую адгезию сплавов, содержащих в своем составе адгезионно-активный к алмазу металл, разработана вакуумная технология изготовления алмазного инструмента. Сущность вакуумной технологии заключается в следующем.

Из алмазосодержащей шихты, включающей в себя адгезионно-активный металл, прессуют брикет заданных формы и размеров, затем проводят его спекание в вакууме в свободном состоянии. Температура спекания в зависимости от состава связки составляет 800...950 °С. После спекания проводят окончательную обработку и рабочего слоя инструмента.

Технологический процесс производства инструментов из алмазосодержащего проката включает в себя приготовление пластин или лент, термообработку проката, уплотнение и окончательную механическую обработку.

Формирование пластин и лент алмазосодержащего проката проводят на горизонтально расположенных валках с гравитационной подачей порошка из навесного бункера. Такая схема наилучшим образом соответствует условиям прокатки небольшого количества шихты, содержащей в себе твердые частицы алмаза. Для прокатки лент на валках диаметром 100 мм и более используют несимметричные бункеры с небольшой щелью между передней стенкой и валком для выхода воздуха, вытесняемого из прокатываемой смеси.

Прокатывается небольшое количество (0,05...5 кг) шихты на разных связках с алмазом зернистостью 3/2...630/500 с относительной концентрацией 25...150 (объемная доля — 6,25...37,5 %). Прокатанную заготовку спекают и уплотняют до беспористого состояния.

Для изготовления тонких пластин (отношение толщины сечения к его ширине меньше 0,003) алмазосодержащую шихту прокатывают, затем спекают в свободном состоянии и уплотняют между

валками. Для того чтобы снять наклеп, проводят рекристаллизационный отжиг, затем заготовку повторно уплотняют.

Количество отжигов и уплотнений выбирают так, чтобы получить мелкозернистую беспористую структуру связки с равномерно распределенными по всему объему зернами алмаза.

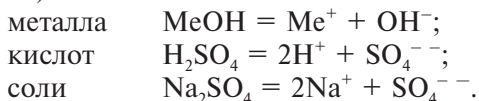
Шихту для прокатки приготавливают так же, как и для прессования. Установлено, что наилучшей формируемостью при прокатке обладают смеси на основе меди. Поэтому для изготовления пластин, лент из проката, как правило, используют связки, выбранные в системе Cu—Sn.

В зависимости от пластичности композиции алмазосодержащий прокат делится на недеформируемый и деформируемый. В отдельную группу выделены фольги толщиной 0,03...0,13 мм. Недеформируемый прокат выпускается в виде жестких пластин и лент, из которых вырезают заготовки или рабочие части инструментов на штампах или электроискровых станках. Деформируемый прокат — пластичный композит. Из него можно изготавливать рабочие части сверл, сменных покрытий притиров, износостойкие поверхности и т.д.

### 7.1.2. Композиты на гальванической связке

Вещества, проводящие в водном растворе электрический ток, называются электролитами. К таким веществам относят соли, основания, кислоты. Изучение кинетики и механизма ионизации электролитов получило название теории электролитической диссоциации.

При диссоциации оснований образуются анионы гидроксила ( $\text{OH}^-$ ) и катионы:



Если в цепь постоянного электрического тока включить сосуд с раствором какого-либо электролита, например HCl, то произойдет явление, называемое электролизом. Вследствие работы источника тока электроны с одного электрода (анода) будут выкачиваться, а на другой (катод) — накачиваться. Поэтому на аноде создается недостаток электронов, а на катоде — их избыток. Поэтому находящиеся в растворе ионы  $\text{Cl}^-$  будут притягиваться к аноду, а ионы  $\text{H}^+$  к като-

ду. С подошедших к аноду ионов  $\text{Cl}^-$  отнимается по одному электрону, и они превращаются в нейтральные атомы. Два таких атома соединяются затем в молекулу и выделяются в виде газообразного хлора. Аналогичная картина имеет место на катоде, но с ионом водорода.

Если вместо  $\text{HCl}$  ввести в электролит  $\text{NiSO}_4$ , то на катоде будет выделяться металлический никель. Рассчитав необходимые электрохимические параметры и выбрав необходимый состав электролита, можно нанести никелевое покрытие на любую металлическую поверхность, используемую в качестве катода.

Разработаны композиционные электрохимические покрытия, которые представляют собой гетерофазную систему, состоящую из электрохимически осажденного металла (сплава) и частиц дисперсной фазы.

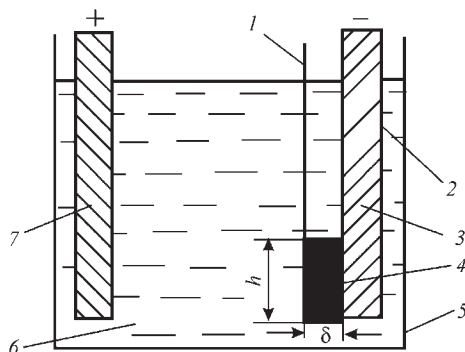
Алмазно-гальваническое покрытие (АГП) образуется в процессе электрохимического осаждения металла с одновременным включением в осадок находящихся в соприкосновении с катодом алмазных зерен. Контакт алмазного порошка с поверхностью катода осуществляют несколькими способами. Например, алмазный порошок находится в ванне в специальном приспособлении, препятствующем распространению его по всему объему электролита, а изготавливаемая деталь помещается в толщу алмазного порошка, алмазный порошок находится на дне ванны и взмучивается после погружения детали в электролит, при этом оседающий алмазный порошок покрывает поверхность катода. Существуют и другие способы соприкосновения алмазного порошка с поверхностью катода. Процесс образования электросодержащего слоя состоит из двух основных этапов: прикрепление и окончательное закрепление алмазного порошка.

Основным технологическим параметром при нанесении АГП является плотность тока. Оптимальная плотность тока на катоде  $D_k$  зависит от состава электролита, концентрации компонентов, кислотности электролита, температуры и других факторов и, как правило, при нанесении шлифпорошков алмаза она составляет 1,1...2,2 А/дм<sup>2</sup>, хотя в некоторых случаях, особенно на порошках мелких фракций, плотность тока снижается до 0,2...0,3 А/дм<sup>2</sup>.

На рис. 7.7 схематически представлено получение алмазосодержащих покрытий в условиях прикрепления зерен к катоду. Изго-

**Рис. 7.7. Схема получения алмазно-содержащих гальванических покрытий:**

*1* — пористая перегородка; *2* — слой изоляции; *3* — катод; *4* — алмазный порошок; *5* — ванна; *6* — электролит; *7* — анод



тавливаемая деталь (катод) *3* любой геометрической формы помещается в гальваническую ванну *5*. Алмазный порошок *4* в околокатодном пространстве удерживается при помощи специального приспособления *1*, которое, с одной стороны, не позволяет алмазному порошку распространяться по всему объему ванны, а с другой — не препятствует проникновению электролита в околокатодное пространство. В качестве прикрепляющего металла, как правило, используют никель. Источником никеля являются различные электролиты, которые состояются на основе сульфата никеля и отличаются друг от друга количественным содержанием входящих в их состав веществ. Концентрация основного компонента достигает  $350 \text{ кг/м}^3$  за счет как серноокислого, так и хлористого никеля, который входит в состав большинства электролитов в качестве добавки, дающей хлорид — ион (депассиватор анода).

Наиболее оптимален электролит следующего состава,  $\text{кг/м}^3$ :

- никель серноокислый — 250...300;
- никель хлористый — 30...40;
- натрий хлористый — 15...25;
- кислота борная — 30...40.

Этот электролит надежен в эксплуатации, позволяет получать мелкокристаллические никелевые осадки и качественные алмазно-гальванические покрытия.

Метод закрепления алмазных зерен электролитически осаждаемым металлом позволяет изготавливать алмазные инструменты практически любого профиля и размеров. В различных областях промышленности широко применяются шлифовальные головки серийного производства, отрезные круги с наружной и внутренней

режущими кромками, сверла, правящие ролики и блоки, машинные и ручные притиры, напильники и надфили. Не менее важное значение имеют специальные виды инструментов: ленточные пилы, стоматологический инструмент, хирургические иглодержатели и щипцы, режущий и шлифующий инструмент проволочного типа, барабаны, гильзы и многие другие виды инструментов оригинальных конструкций. Кроме того, во многих случаях возникает необходимость в разработке новых нестандартизированных видов инструмента, которые наиболее оперативно и с меньшими затратами могут быть изготовлены гальваническим методом.

В технической литературе содержится много предложений о создании оригинальных конструкций инструмента с АГП и их применении. Разработан алмазный инструмент для снятия заусенцев, представляющий собой крацевальную щетку, на торцах проволок которой электролитическим никелем закреплены зерна алмазов. Предложен шлифовальный круг, состоящий из тонкой металлической сетки, на которой зерна алмаза или cBN закреплены никелем или другим электролитическим металлом. Оригинальность решения заключается в том, что металлическая сетка с зернами алмаза служит арматурой для полимерного связующего. Это дает возможность получить эластичный инструмент с хорошими режущими свойствами. Для шлифования сферических поверхностей предложен инструмент, состоящий из пластмассового корпуса, в который запрессованы в определенном порядке алмазоносные трубчатые элементы, полученные методом гальванопластики. Притирку внутренних поверхностей резбовых плашек предлагается проводить алмазными резбовыми притирами. Обработка сложных деталей гидроаппаратуры может быть осуществлена при помощи специальных комбинированных притиров, цилиндрических отверстий — при помощи алмазных разверток вместо прецизионного хонингования.

### 7.1.3. Композиты на органической связке

Алмазный инструмент на полимерном связующем находит широкое применение в промышленности (до 70 % от общего потребления алмазного инструмента) при обработке различных материалов, в основном металлов и сплавов, используемых в машиностроении.

В качестве связующих полимерных связок применяют мономеры и олигомеры, отличающиеся между собой физико-механическими и физико-химическими свойствами, температурами стеклования и деструкции. Широкое применение для изготовления алмазных инструментов нашли следующие полимеры: новолачный фенолформальдегидный олигомер СФ-012, фенольное связующее СФП-012А (смесь олигомера СФ-012 с отверждающим агентом — гексаметилентетраамином), резольная безаммиачная анилин-фенолформальдегидная смола СФ-342А. Синтезированы, исследованы и используются для изготовления алмазного инструмента сополимер-1 на основе эпоксидианового олигомера и смолы СФ-342А и сополимер-2 на основе этого же эпоксиолигомера и фенольного связующего СФП-012А. Для изготовления хонинговального алмазного инструмента и инструмента для чистовой обработки различных материалов в качестве связующего применяют политетрафторэтилен (фторопласт-4) и другие неполярные высокомолекулярные фторсодержащие карбоцепные полимеры. Как правило, приведенные олигомеры и полимеры в промышленности выпускают в виде порошков с различным размером зерен.

Для регулирования свойств алмазонасного слоя инструмента в полимерное связующее вводят наполнители различного функционального назначения.

Для повышения износостойкости инструмента в рабочий слой вводят высокомодульные порошковые наполнители — карбиды бора, кремния, бориды и т.д., а для повышения теплопроводности — порошки металлов (медь, олово, висмут, железо и др.). Широко используют в качестве наполнителей вещества, выполняющие роль твердых смазок — графит, гексагональный нитрид бора, тальк и др.

Соотношение количества алмаза, наполнителя и связующего в рабочем слое инструмента для различных полимерных связок приведено в табл. 7.3.

В алмазосодержащие композиты на полимерной связке вводят также химически активные компоненты (наполнители) для создания коррозионно-активной технологической среды в зоне обработки. Такая среда активизирует разупрочнение и уменьшает энергию разрушения и работу диспергирования микроповерхностного слоя и, следовательно, ослабляет механические и термические нагрузки на алмазное зерно и связку инструмента, что облегчает обработку, например, титановых и железоуглеродистых сплавов.

### 7.3. Содержание количества алмаза, наполнителя и связующего в алмазоносном слое инструмента

Относительная концентрация алмаза	Объемная доля компонентов рабочего слоя*, %	
	Алмаза	Наполнителя
50	12,5	37,5
100	25,0	25,0
150	37,5	12,5
200	50	—

\* Объемная доля связующего — 50 %.

Исследовано влияние различных веществ на коррозионное разрушение под напряжением титановых сплавов и высокопрочного серого чугуна. По отношению к титановым сплавам ряд химических веществ по активности располагается примерно в такой последовательности:  $\text{NaF} > \text{Na}_2(\text{SiF}_6) > \text{NaCl} > \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . Активность выбранных компонентов по отношению к чугуну падает в таком порядке:  $\text{NH}_4(\text{BF}_4) > \text{KClO}_3 > \text{Al}(\text{CH}_3\text{COO})_3 > \text{KIO}_3 > \text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ . Критериями выбора данных веществ является их растворимость в воде и температура разложения, которая находится за порогом значений температур прессования и термообработки инструмента, изготовленного из алмазосодержащих композитов, в шихту которых их вводят в качестве наполнителей.

Алмазно-абразивные композиты на основе полиамидных связующих представляют собой термореактивные олигомеры, способные при нагреве отверждаться с образованием сетчатых полимеров. Такие инструментальные композиты отличаются высокой деформационной теплостойкостью (верхний предел рабочей температуры составляет 350...400 °С), что особенно важно в условиях зоны абразивного резания. Полиамиды сочетают высокую механическую прочность с хорошими антифрикционными свойствами. Коэффициент трения отвержденного связующего с массовой долей графита 15 %, по стали ШХ 15 составляет 0,06...0,08. Существенным преимуществом новых связующих является также повышенная адгезия к поверхности алмаза, кубического нитрида

бора и наполнителей, перечисленных выше, применяемых для изготовления инструмента.

Помимо полиамидов в качестве перспективных связующих для алмазно-абразивных композиций выступают ароматические полиамиды, полиакрилаты, политриазины, алициклические эпоксидные смолы. Высококачественные полировальные композиты могут быть получены на основе полиуретанов, для которых степень эластичности может надежно регулироваться путем изменения соотношения исходных компонентов.

Значительные возможности совершенствования полимераабразивных композиционных материалов связаны с использованием систем, способных формировать в зоне резания активные газовые технологические среды. Этим достигается значительное снижение температуры в рабочей зоне, уменьшение сил резания и повышение качества обработанных поверхностей.

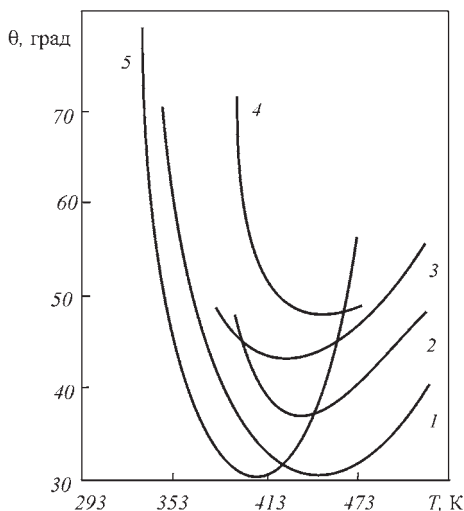
Выбор полимерных связующих базируется, прежде всего, на изучении физико-химических поверхностных явлений на границе раздела фаз связующее—алмаз (cBN). В этом аспекте важно исследовать способность полимерных смол к смачиванию поверхности СТМ, определяющую условия для полного контакта и проявления сил адгезионного взаимодействия фаз, от которых зависят физико-механические и эксплуатационные характеристики алмазосодержащего композита, особенно прочность удержания, а, следовательно, степень использования потенциальных режущих свойств зерен СТМ в инструменте. Априори можно утверждать, что жидкости с низким поверхностным натяжением должны смачивать поверхность твердых тел с высоким поверхностным натяжением. Это следует из анализа уравнения Юнга

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{тг}} - \sigma_{\text{тж}}}{\sigma_{\text{тж}}},$$

где  $\sigma_{\text{тг}}$  — поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело—газ;  $\sigma_{\text{тж}}$  — поверхностное натяжение на границе раздела твердое тело—жидкость.

Алмаз и cBN имеют высокие значения  $\sigma_{\text{тг}}$ , а расплавы полимерной смолы, как правило, имеют низкие значения  $\sigma_{\text{тж}}$ . Исходя из этого, следует ожидать, что поверхности алмаза и cBN должны смачиваться расплавами смол ( $\theta < 90^\circ$ ).





**Рис. 7.8.** Зависимость краевого угла смачивания алмаза расплавами олигомеров Э-41 (1), Э-49 (4), смолы СФ-012 (5), СФ-342А (3), сополимера-1 (2) от температуры

Данные, приведенные на рис. 7.8, показывают, что поверхность алмаза смачивается расплавами олигомеров и полимеров, однако степень смачивания зависит от строения и свойств расплава.

Некоторое увеличение контактных углов смачивания после нагрева до температур выше 453 К вызвано термоокислительной деструкцией полимера.

Однако несмотря на высокую адгезию олигомеров и полимеров к порошкам СТМ в ряде случаев наблюдается повышенный износ инструмента. При работе инструмента в зоне резания развиваются достаточно высокие температуры ( $\sim 700$  °С), а так как кристаллы алмаза и cBN обладают высокой теплопроводностью, то потоки тепла через объем СТМ воздействуют на слой связующего, прилегающего к поверхности кристалла. В результате происходит деструкция связующего и прочность удержания алмазного или cBN-зерна в матрице круга резко падает, т.е. зерно, не выполнив полезную работу, выпадает с поверхности инструмента.

На поверхность порошков наносят покрытия, теплопроводность которых в десятки раз ниже, чем теплопроводность алмаза и cBN, поэтому покрытие служит тепловым барьером, резко уменьшающим воздействие тепловых потоков на полимерное связующее.



Рис. 7.9. Технологическая схема изготовления кругов на органической связке

Разработаны технологические процессы нанесения стеклопокрытий и металлопокрытий на порошки СТМ. Эти процессы отличаются простотой исполнения и не требуют сложного аппаратного оформления.

В настоящее время выпускается множество СТМ-инструментов на различных полимерных связках, отличающихся между собой связующим, наполнителем, соотношением компонентов и т.д. Это вызвано тем, что изготавливаются инструменты различных форм и размеров, которые предназначены для обработки материалов с разными физико-механическими свойствами. Поэтому для каждого обрабатываемого материала и вида обработки выбирают инструмент, изготовленный из алмазо- и cBN-содержащего композиционного материала на полимерной связке оптимального состава.

На рис. 7.9 приведена технологическая схема изготовления инструмента на органической связке.

Наиболее ответственной технологической операцией является горячее прессование алмазо- и cBN-носного слоя, которое осуществляют на гидравлических прессах с подогревными плитами. Технологические режимы прессования — давление, температура нагрева и время экзотермической выдержки — устанавливают в зависимости от химического состава полимерсодержащего СТМ-композиата. Например, если изготавливают инструмент на фенолформальдегидном связующем, то давление прессования —  $5000 \text{ Н/см}^2$ , температура нагрева —  $(180 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ , время выдержки — 20 мин.

Алмазо- и cBN-носный слой инструмента прессуют в пресс-формах закрытого типа.

Инструменты из СТМ на полимерных связках широко используют в машино-, станко-, судо- и авиастроении, деревообрабатывающей, бумажной, металлургической и других отраслях промышленности. Они позволили решить ряд важных задач при высокопроизводительном шлифовании, резке и полировании труднообрабатываемых материалов (табл. 7.4).

#### 7.4. Назначение инструментов из СТМ на полимерных связках с эффектом самосмазывания

Марка связки	Марка СТМ	Форма инструмента	Назначение
БГ	АС2, АС4, КР, ЛО, АСМ, КМ	Круги форм 1А1, 6А2, 12А2, 9А3, 12V5, А8, 11V9, 12R4	Чистовое и доводочное шлифование твердых сплавов, сталей, керамики и других хрупких материалов

Продолжение табл. 7.4

Марка связки	Марка СТМ	Форма инструмента	Назначение
B2-08 B2-07	Гексанит А, АС4МА, АС6МА, КРС, ЛОС	Круги форм 1А1, 14А1	Шлифование зубчатых колес из цементированных и закаленных сталей, заточка лезвийного инструмента из быстрорежущих сталей, твердых сплавов и СТМ, обработка титановых сплавов
B1-11П	АС6МА		Предварительное шлифование валов прокатных станов, бумаго- и картоноделательных машин. Чистовое шлифование камней и природного алмаза
B11-Л	АСМ, КМ	Круги форм 12V5, 12A2, 14U1, 1A1, 6A2, 9A3, 12D9, 11V9	Шлифование, заточка и доводка твердосплавных сверл и режущей части инструмента из СТМ и быстрорежущей стали
BC11 BC11M	АСМ, АСН	Круги форм 6A2Т, 12A2-45, 1A1	Прорезание пазов, доводка и полирование ферритов, обработка природного и поделочного камней, стекла
B1-13 B1-13П	АС6МА, АС15МА, АС6М	Круги форм 12A2, 1A1, 6A2, А8, 11V9, 12R4, 9A3, 12V5, 14U1, 12D9, 14EE1, 1EE1, 1FF1X, 12A2SS, 6A2SS	Шлифование и заточка металло- и дереворежущего инструмента из твердых сплавов на режимах повышенной производительности. Чистовое шлифование валов прокатных станов, бумаго- и картоноделательных машин. Обработка камней
B1-13С	КР, КРС, ЛО, ЛП, КМ	Круги форм 12A2, 6A2, 1A1, 12R4, 11V9, 1EE1, 1FF1X	Заточка и доводка лезвийного инструмента из быстрорежущих сталей. Шлифование сталей и сплавов с применением СОТС и без них

Окончание табл. 7.4

Марка связки	Марка СТМ	Форма инструмента	Назначение
BC-Э	AC6, AC15, KP	12A2-45°, 6A2	Электрохимическая обработка твердых сплавов и сталей
МП	AC15, KP	1A1R, 1EE1, 14EE1	Резка и профильное шлифование твердых сплавов, сталей, керамики без применения СОТС
B3-08	АСМ, КМ, микропорошки карбида титана	Бруски, 6A2Т	Суперпроводка колец приборных подшипников и сушильных барабанов бумагоделательных машин
B2-04Г	АСМ, АСН, AC6	Бруски, 6A2Т	Суперфиниширование штоков и пальцев. Шлифование и доводка металло- и минералографических шлифов
BC13	AC15, AC20	14EE1, 1EE1, 1FF1	Прецизионное профильное шлифование твердых сплавов с охлаждением или без него
B3-01-1	AC2, AC4, АСМ, КМ	12A2, 6A2, 1A1	Торцевое доводочное шлифование и полирование валов и доводка инструмента из СТМ, твердых сплавов, сталей и чугунов

### 7.1.3.1. Композиты на каучукоподобной связке

Создан и широко используется в промышленности эластичный инструмент из СТМ на основе вулканизированного каучука.

Для изготовления каучукодержащей связки используют смеси синтетического бутадиеннитрильного каучука, совмещенного с поливинилхлоридной смолой, с добавками вулканизирующих аген-

тов (серы), наполнителей, ускорителей вулканизации и мягчителей. Особенностью эластичных связок, в отличие от известных вулканитовых, является применение каучука, совмещенного с поливинилхлоридной смолой, например, бакелитом, и фенолоформальдегидным связующим.

Полученные на такой основе материалы превосходят чистый каучук по прочности, сопротивлению изнашиванию.

Физико-механические свойства и эластичность материалов во многом зависят от содержания серы. Для получения гибких инструментов содержание серы по отношению к массе каучука не должно превышать 10...15 %. В тех случаях, когда количество серы составляет 30...40 %, получают жесткие эбонитовые или полуэбонитовые связки. Технологическая схема изготовления инструмента на эластичной связке приведена на рис. 7.10.

Смешивание каучука с другими компонентами проводят на водоохлаждаемых валках, вращающихся с различной скоростью.

Приготовленную алмазосодержащую массу помещают в пресс-форму, соответствующую форме рабочей части инструмента и вулканизируют под прессом при температуре 170...175 °С и выдержке 20...25 мин.

Основные виды алмазного эластичного инструмента широко используемого в промышленности:

- алмазные полировальные ленты (АП) — для полирования стальных, чугунных деталей;
- алмазные эластичные диски (АЭД) — для приготовления самых разнообразных металло-минералографических шлифов, полирования камней — самоцветов, отделочного камня;
- алмазные хонинговальные блок-брусочки (АББХ) — для хонингования отверстий в стальных и чугунных деталях;
- алмазные термопластичные полировальные ленты (АТПЛ) — для полирования и виброполирования сложнопрофильных деталей из железоуглеродистых, титановых, жаропрочных сплавов и других материалов;
- алмазные шлифовальные прерывистые блоки (АБШЛ) — для обработки газотермических износостойких покрытий из оксида алюминия, твердого сплава, карбидов вольфрама, хрома, титана и других материалов, а также покрытий, в которые легирующими элементами являются кобальт, никель, хром, молибден.

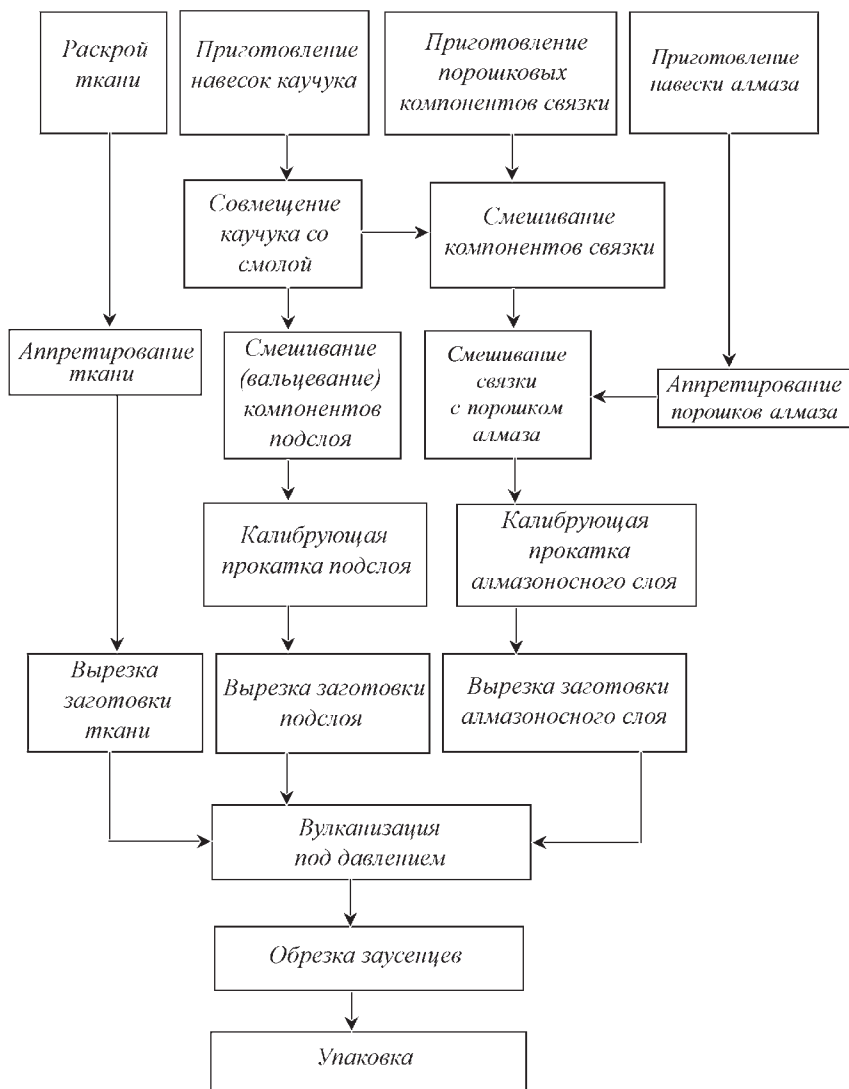


Рис. 7.10. Технологическая схема изготовления инструмента на эластичной связке

### 7.1.3.2. Композиты на силоксановой связке

Возможности нового высокотехнологичного оборудования требуют для своей реализации применения новых, адекватных им абразивных композитов и инструментов. Шлифование твердых, вязких, износостойких инструментальных и конструкционных материалов остается актуальной проблемой машиностроения. По совокупности рабочих характеристик — стойкости, производительности обработки, возможности обеспечения заданных параметров макро- и микрогеометрии обработанных поверхностей — наилучшим типом шлифовальных композитов, наполненных порошками синтетического алмаза или кубического нитрида бора, можно считать композиты, сочетающие свойства материалов на керамических и полимерных связках.

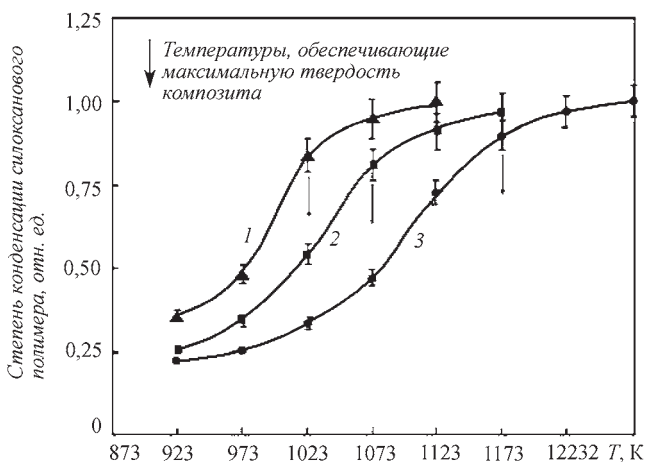
В качестве связующих в таких композитах выступают неорганические полимеры силоксанового строения. Эти связующие позволяют получить абразивные композиты, структура которых обеспечивает им сочетание преимуществ, свойственных шлифовальным кругам на керамических и полимерных связках.

Неорганические линейные полимеры с силоксановыми цепями ( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ ) получают путем конденсации эфиров кремниевой кислоты, главным образом из этилсиликата. Высокая гибкость молекул полимера способствует формированию совершенного адгезионного контакта связующего с поверхностью наполнителя, как за счет сил Ван-дер-Ваальса, так и за счет хемосорбции. При термообработке линейный силоксановый полимер переходит в сетчатую стеклообразную структуру с высокой механической прочностью и термостойкостью.

Варьируя давление и температуру термообработки в пресс-форме, температуру последующей термообработки вне пресс-формы, получают композиты для шлифовальных кругов из СТМ, обладающие широким диапазоном свойств (рис. 7.11).

Под степенью конденсации силоксанового полимера подразумевается доля исходных органических функциональных групп, удалившихся в ходе термообработки с образованием поперечных сшивок  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ . Умеренная степень конденсации при использовании специальных катализаторов позволяет получать композиты со свойствами, характерными для термостойких органических полимеров. Шлифовальные круги на их основе обладают высоким





**Рис. 7.11. Зависимость степени конденсации силоксанового олигомера от температуры термообработки:**

1 — силоксановый олигомер, модифицированный ионами  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ; 2 — силоксановый олигомер, модифицированный ионами  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ; 3 — силоксановый олигомер, модифицированный ионами  $\text{K}^+$ ,  $\text{Zr}^{4+}$

уровнем свойств, соответствующих технологической нише абразивных инструментов на полимерных связках. Это сочетание высокой стойкости с относительно низкой температурой в зоне резания, что обеспечивает благоприятное структурное состояние обработанных поверхностей и режущих кромок изделий из твердых сплавов.

Высокая стойкость и равномерность износа позволяет с успехом использовать подобные круги на современных высокоточных станках-автоматах. Повышенная температура термообработки композитов на основе линейных силоксановых олигомеров, модифицированных ионами  $\text{Li}^+$  и  $\text{Zr}^+$ , позволяет путем твердофазного спекания-конденсации получать кремнекислородные керамические композиты с высокой степенью конденсации силоксанового полимера, перспективные в качестве керамических связок для СТМ. Эта линия шлифовальных кругов на силоксановых связках позволяет, при работе с СОТС, сочетать большие съемы обрабатываемого материала с хорошей размерной стойкостью инструмента и высоким уровнем эксплуатационных свойств обработанных поверхностей.

При изготовлении шлифовальных кругов на основе силоксановых олигомеров изделие проводит в пресс-форме короткое время (до 15 мин для алмазных шлифовальных кругов диаметром до 150 мм), а дальнейшая термообработка проводится вне пресс-формы.

Для успешной реализации такого подхода ключевое значение имеет величина усадки, сопровождающей процессы структурообразования композитов, и связанные с ней деформации. Применение силоксанового связующего позволяет получить СТМ-содержащие композиты, отличающиеся малой усадкой при термообработке до 893 К. На рис. 7.12, 7.13 приведены данные по объемной усадке до 893 К, поскольку при дальнейшем росте температур спекания-конденсации изменения геометрии образцов минимальны. В целом величина объемной усадки составов: силоксановое связующие — 30 % об.; алмаз или cBN — 12,5...37,5 % об.; остальное — наполнитель (активный ультрадисперсный кремнезем), не превышает 1,5 %, некруглость образцов цилиндрической формы — 1,2 %.

Характеристики физико-механических свойств композитов на основе силоксановых связующих представлены в табл. 7.5.

Молекулы линейных силоксановых олигомеров способны к формированию совершенного адгезионного контакта с поверхностью алмаза и cBN, как за счет сил Ван-дер-Ваальса, так и путем хе-

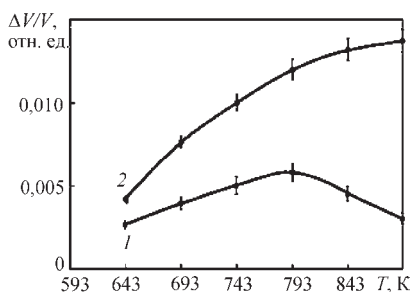


Рис. 7.12. Величина объемной усадки при спекании-конденсации композитов на силоксановом связующем, наполненных порошком алмаза АС20 100/80 (1) и АСМ 28/20 (2)

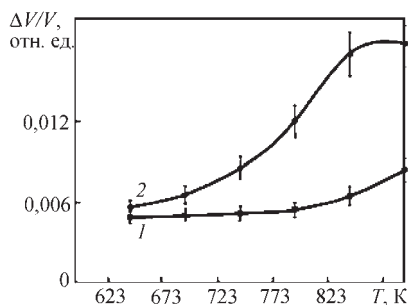


Рис. 7.13. Величина объемной усадки при спекании-конденсации композитов на силоксановом связующем, наполненных порошком алмаза КМ 28/20 (1) и КВ 100/80 (2)

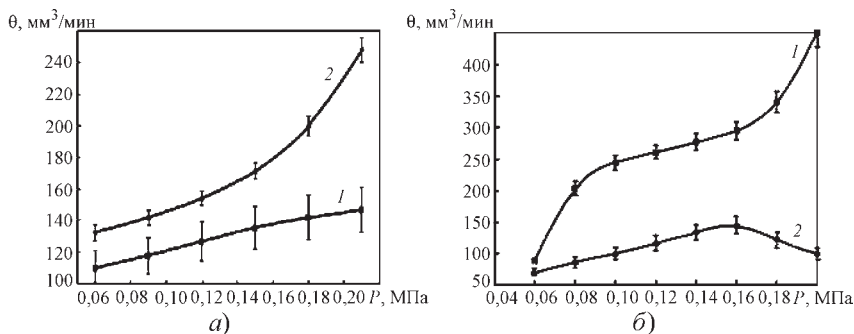
### 7.6. Физико-механические характеристики композитов на основе силиксанового связующего

Марка и зернистость абразива	Концентрация абразива	Предел прочности при сжатии, МПа	Твердость HRB	Удельная ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Модуль упругости, ГПа	Микротвердость, МПа
АСМ 40/28	12,5	122,5	89	0,29	39	1640
	25	131,1	96	0,33	41	1955
АС4 100/80	12,5	127,2	87	0,25	41	1570
	25	143,8	101	0,21	38	1910
КМ 40/28	12,5	123,3	84	0,31	42	1870
	25	135,0	93	0,35	44	2240
КМ 100/80	12,5	129,1	88	0,26	41	1770
	25	147,3	98	0,22	43	2080

мосорбции. При термообработке линейный силиксановый полимер постепенно теряет некоторое количество исходных органических функциональных групп, переходя в жесткую стеклоподобную структуру с высокой износостойкостью, теплостойкостью, а также с высокой сопротивляемостью агрессивному воздействию компонентов СОТС.

Разработанные СТМ-содержащие композиты на основе силиксановых полимеров по уровню физико-механических свойств находятся на уровне, характерном для наиболее прочных абразивных композитов на полимерных связках, и превосходят керамические абразивные композиты.

Результаты, представленные на рисунке рис. 7.14, иллюстрируют способность инструментов на силиксановых связках к удалению максимального (при данном давлении прижима) припуска обрабатываемого материала и стойкость к смазочно-охлаждающей среде. В обоих случаях композиты на основе силиксановых полимеров демонстрируют явное преимущество по отношению к серийно вы-



**Рис. 7.14.** Зависимости скорости съема стали ШХ15 от давления прижима инструмента с порошком KV 50/40 (а), скорости съема стали Р6М5 от давления прижима инструмента с порошком KV 63/50 в среде СОТС на масляной основе (б):

1 — композит на фенолоформальдегидной связке; 2 — композит на основе силоксанового полимера

пускаемому композиту, содержащему порошок cBN той же зернистости в равной концентрации.

Механизм, лежащий в основе превосходства инструментов из силоксановых композитов над аналогами на фенолоформальдегидной связке, обусловлен высокой адгезионной активностью связующего к поверхности cBN, а также высокой теплостойкостью и пониженной молекулярной подвижностью структуры, особенной для силоксановых материалов, подвергнутых твердофазному спеканию-конденсации.

Эти качества способны обеспечить такие условия, когда равновесное среднее выступание зерен абразива в рабочей зоне для нового композита оказывается больше, чем для стандартных аналогов. При этом зерна прочно удерживаются связкой и обеспечивают больший съем при менее интенсивном тепловом воздействии на обрабатываемую поверхность, чем это имеет место для серийных композитов.

Дополнительным фактором, способствующим проявлению большей режущей способности инструмента (например, определяемой как максимальная производительность шлифования, при которой не наблюдается резкий рост дефектности обработанной поверхности), выступает микроструктура полученных композитов. Начиная с температурной области вблизи верхнего предела собственно поли-

меризации, и при более высоких температурах, соответствующих процессу твердофазного спекания-конденсации, силоксановый полимер пронизан капиллярными порами с характерными сечениями порядка  $10^{-2}$  мкм. Это позволяет композиту аккумулировать в своем поверхностном слое низкомолекулярные компоненты СОТС и эффективно переносить их в зону непосредственного контакта с обрабатываемым материалом. Оптимальный технологический режим изготовления композитов позволяет существенно увеличить их способность к транспортированию компонентов СОТС в зону формирования стружки.

Высокая адгезионная активность силоксанового связующих к порошкам СТМ, в первую очередь, к поверхности cBN, позволяет полнее реализовать потенциал зерен сверхтвердых абразивов, чем это возможно в составе традиционных композитов на полимерных связках или на основе легкоплавких стекол (рис. 7.15). Для традиционных абразивных композитов на фенолоформальдегидной связке, как правило, существует оптимальная концентрация зерен СТМ, выше которой стойкость инструмента падает. Для композитов на основе

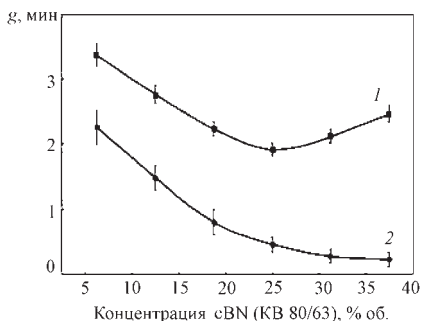


Рис. 7.15. Зависимость относительного расхода cBN марки КВ 80/63 от концентрации абразива в инструментальном композите при шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 (производительность —  $600 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ):

1 — композит на фенолоформальдегидном связующем; 2 — композит на основе силоксанового полимера

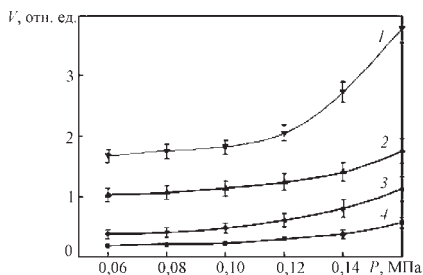


Рис. 7.16. Зависимость объема шлифовочных микротрещин в поверхностном слое стали Р6М5, подвергнутой шлифованию кругом из серийного композита (1, 3) и композита на основе силоксанового полимера (2, 4), от давления прижима инструмента:

1, 2 — после чернового шлифования; 3, 4 — после финишной обработки

силоксановых связующих повышение концентрации сBN ведет к увеличению стойкости шлифовального круга.

Последнее открывает возможность получения элитных шлифовальных кругов из сBN для особо ответственных условий применения, сочетающих чрезвычайно высокую размерную стойкость, близкую к стойкости кругов на металлических связках, с высокой режущей способностью инструмента из СТМ на полимерных и керамических связках.

Важнейшим показателем работы абразивного инструмента является дефектность сформированных им поверхностей (рис. 7.16). Кривые 1 и 2 соответствуют оценке дефектности поверхности стали Р6М5, сформированной серийным и экспериментальным кругами соответственно, кривые 3 и 4 – дефектности поверхностного слоя тех же образцов, после удаления небольшого припуска в мягких условиях (финишная обработка с целью уменьшения глубины дефектного слоя).

Шлифовальные круги из СТМ на гибридных силоксановых связках, сочетающих особенности полимерных и керамических абразивных композитов, предназначены для высокопроизводительного шлифования на шлифовально-заточных станках-автоматах с ЧПУ.

### *7.1.3.3. Композиты, адаптирующиеся к условиям нагружения*

Эффективность шлифования определяется производительностью, стойкостью инструмента и состоянием поверхностного слоя изделия, сформированным в процессе его обработки.

Потребность в больших скоростях удаления припуска означает необходимость быстрого ввода в поверхностный слой изделия больших количеств энергии. Последствия этого — рост уровня механических напряжений в контактной зоне, степени пластической деформации обрабатываемого материала, а также интенсивное выделение тепла. Уровень сил резания и температуры в зоне шлифования противоречит требованию высокой стойкости инструмента, поскольку оба упомянутых фактора интенсифицируют износ связки, разрушение и выпадение абразивных зерен. С другой стороны, использование более стойкого инструмента, что при традиционном подходе означает применение инструментальных композитов с большей твердостью и прочностью, при фиксированной произво-

длительности шлифования ведет к росту температуры и силы резания. В свою очередь, требование минимизации структурных изменений в материале изделия обуславливает, при неизменных свойствах инструмента, необходимость снижения скорости съема припуска. В противном случае рост температурных и силовых параметров обработки неизбежно приведет к появлению прижогов, нежелательным внутренним напряжениям в поверхностном слое и к ухудшению микрогеометрии поверхности изделия.

Качественное повышение эффективности обработки требует использования альтернативных подходов, один из которых состоит в разработке и применении адаптивных абразивных композитов. Адаптивное поведение состоит в самоподнастройке структуры, а соответственно, и свойств композита, включающего связку и зерна абразива, в первую очередь — алмаза или cBN, к переменным условиям в рабочей зоне. В отличие от традиционных абразивных композитов с положительной обратной связью между степенью деформации их материала и термомеханическими факторами резания, адаптивные композиты демонстрируют отрицательную обратную связь. Это означает, что в некотором диапазоне температур и сил резания инструментальный материал отвечает на их рост не увеличением, а уменьшением степени своей деформации. При таком типе адаптивного поведения в поверхностном слое инструмента определенной глубины при интенсификации внешнего воздействия происходит обратимое увеличение жесткости связки и прочности адгезионного взаимодействия связующего с зернами абразива. Этот процесс сопровождается с определенной скоростью и определенной амплитудой изменения физических параметров композита.

Ключевым положением в синтезе материалов, способных к структурной самоадаптации в зоне трения и абразивного резания, является возможность формирования элементов строения композита, которые обладали бы свойствами «молекулярного реле». Имеется в виду способность к обратимому переключению двух или нескольких структурных состояний под действием меняющихся внешних условий с соответствующим изменением микро- и макроскопических механических свойств материала. Такие структурные элементы могут быть реализованы в композитах на основе полимерных связок. При этом они будут представлять собой или участки полимерных сеток в объеме отвержденных связующих, или сег-

менты полимера, непосредственно связанные с поверхностью наполнителя.

Во втором случае элементы структуры композита со свойствами «молекулярного реле» (рис. 7.17) представляют собой участки поверхности частиц наполнителя (порошки металла, его карбида или нитрида с оксидированной поверхностью, или собственно оксида), модифицированной органическим реагентом, например нафтиламином. Эти участки являются местом химической прививки к поверхности наполнителя молекул полимерного связующего.

При получении композиционного материала горячим прессованием при обычных для полимерных связок давлениях (10...100 МПа) происходит химическое взаимодействие отверждающегося олигомера с молекулами модификатора. Последние при этом, по данным ИК-спектроскопии, находятся на поверхности частиц наполнителя в состоянии физической адсорбции (см. рис. 7.17, а). При высоких нагрузках, приложенных либо в статической (свыше 500 МПа для структуры на рис. 7.17, б; свыше 1000 МПа для структуры на рис. 7.17, в), либо в динамической (воздействие ультразвука) форме, происходит переключение «молекулярного реле». Макроскопические образцы материала в трех упомянутых состояниях могут быть стабилизированы закалкой и исследованы, например, акустическим методом.

Переключение из состояния, представленного на рис. 7.17, а, в состояние, представленное на рис. 7.17, б, сопровождается уста-

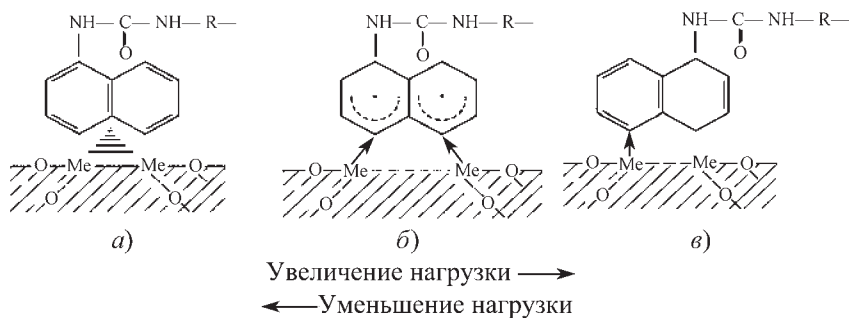



Рис. 7.17. Элемент структуры композита, обладающий свойствами «молекулярного реле»:

 — участок поверхности частицы наполнителя



новлением прочных химических связей полимерной составляющей композита с поверхностью наполнителя за счет переноса электронов от атомов металла на молекулу модификатора, что вызывает значительное увеличение жесткости структуры. В реальных условиях работы абразивного композита это может происходить на отдельных участках поверхностного слоя инструмента, с постепенным увеличением количества и площади таких участков по мере увеличения нагрузки, необходимой для большего съема обрабатываемого материала.

Жесткий материал со структурой, представленной на рис. 7.17, б, в котором значительная доля поверхности частиц наполнителя связана с полимерным связующим прочными химическими связями, формируется в поверхностном слое композита под действием импульсов температуры и сдвиговых напряжений в зоне резания. Структура, соответствующая рис. 7.17, в, формируется из структуры, показанной на рис. 7.17, б, в случае, если нагрузка продолжает возрастать и превышает некий критический уровень. При полной разгрузке последняя структура легко возвращается к исходной структуре. Свойственная последней структуре величина жесткости (или модуля упругости), измеренная акустическим методом, является наименьшей из трех достижимых состояний «молекулярного реле». При ее формировании зерна абразива легко выравниваются по высоте выступания над поверхностью связки. При этом нагрузка на единичное зерно резко падает. Величина сдвигового напряжения в поверхностном слое связки возвращается к уровню, при котором стабильна наиболее жесткая структура (рис. 7.17, б), обеспечивающая максимальную прочность удержания абразивных зерен.

В качестве технологических факторов, позволяющих управлять структурой и свойствами композитов, может быть использована, во-первых, величина удельной поверхности порошка наполнителя и, во-вторых, концентрация и энергетическая характеристика присутствующих на ней адсорбционно-активных центров. Величина удельной поверхности наполнителя определяет важнейшую характеристику строения композита, а именно — эффективную толщину прослоек отвержденного связующего. По экспериментальным данным, оптимальная эффективная толщина прослоек полимера между частицами наполнителя составляет 0,1...0,5 мкм. Это обеспечивает максимальную способность материала к самоадаптации в

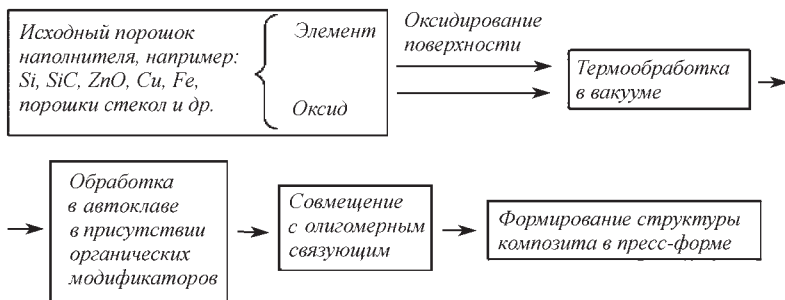
условиях контактной зоны, т. е. к обратимому изменению свойств при «переключении» элементов «молекулярного реле».

При этом композит сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства: предел прочности при изгибе — 50...150 МПа, удельную ударную вязкость — 10...25 кДж/м<sup>2</sup>. Универсальный подход к формированию на поверхности частиц наполнителя адсорбционно-активных центров с необходимым набором свойств обеспечивается при использовании мелкодисперсных порошков оксидов, а также поверхностно оксидированных металлов, карбидов, нитридов, силицидов. Под необходимым набором свойств в данном случае подразумеваются особенности электронного строения активных центров, которое должно обеспечивать возможность образования нескольких видов соединений с органическими модифицирующими агентами. При этом пространственное строение таких соединений и свойственные им энергии связи должны обеспечивать возможность многократной обратимой перестройки их структуры (переключение молекулярного реле) под действием внешних факторов.

Таковыми особенностями обладают характерные активные центры оксидных поверхностей — кислородные вакансии. Эти центры активно участвуют в процессах переноса электрона на адсорбированные органические молекулы, что позволяет, при соответствующем выборе последних, конструировать элементы «молекулярных реле» с необходимым набором состояний. Кислородные вакансии, например в пленках SiO<sub>2</sub> на окисленной поверхности порошков SiC, имеют строение  $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$ , причем их концентрация может быть определена по спектрам фотолюминесценции.

Общая технологическая схема получения композиционных материалов, способных к структурной самоадаптации в динамической контактной зоне, представлена на рис. 7.18.

Она включает стадии модифицирования поверхности наполнителя, совмещения наполнителя со связующим и формирования структуры композита. Давление, при котором производится полимеризация, представляет собой сильный фактор, влияющий на структуру и свойства композитов. Продвижение в область давлений, являющихся чрезвычайно высокими с точки зрения традиционных полимерных технологий (свыше 500 МПа), позволяет рассчитывать на получение самоадаптирующихся композитов с новыми свойствами.



**Рис. 7.18.** Технологическая схема изготовления композитов, способных к адаптивному поведению в зоне абразивного резания

Концентрация адсорбционно-активных центров поверхности представляет собой важный технологический параметр, подлежащий регулированию и оптимизации. Формированию на поверхности (и в объеме) оксидов значительных количеств кислородных вакансий способствуют облучение  $\gamma$ -лучами или электронами высоких энергий, термообработка в вакууме, используемая как сама по себе, так и в чередовании с засвечиванием в УФ-диапазоне. Второй способ более медленный, но он позволяет регулировать концентрацию вакансий на поверхности плавно и с высокой воспроизводимостью.

Оптимальная концентрация кислородных вакансий на поверхности наполнителя зависит от выбора органического модификатора, а также от особенностей связующего, которое предполагается использовать для получения композита. Концентрация кислородных вакансий на поверхности порошка наполнителя задает поверхностную плотность элементов «молекулярного реле», переключение которых при изменении внешних условий обеспечивает самоадаптацию абразивного композита в процессе его работы. Переключение этих элементов в состояние, соответствующее большей энергии взаимодействия отвержденного связующего с поверхностью наполнителя, приводит к увеличению жесткости композита. При этом нижней границей объема композиционного материала, на который гарантированно распространится такое повышение жесткости, будет характерная величина объема частицы наполнителя. Чем больше заданная величина поверхностной плотности переключаемых элементов, тем

больше будет пиковая величина прироста жесткости, достижимой для данного композита.

Вторая важнейшая характеристика композитов, определяющая их способность к самоадаптации, — время переключения элементов «молекулярного реле». Эта величина задается физико-химической природой адсорбционно-активного центра поверхности наполнителя и молекулы органического модификатора, а также особенностями строения прослоек полимерного связующего (рис. 7.19).

Динамические и силовые аспекты взаимодействия зерен, закрепленных в связке абразивного композита с обрабатываемой поверхностью, зависят от жесткости связки и от прочности удержания зерен связующим. Адаптивные композиты способны к самоподстройке этих параметров в ответ на изменения температуры, интенсивности вибраций и сдвиговых напряжений в зоне резания.

Общая схема адаптивного поведения совокупности абразивных зерен выглядит следующим образом. Зерна, вступающие в контакт с обрабатываемым материалом, углубляются в него и в то же время деформируют связку. Рассеяние энергии этой деформации в веществе адаптивной связки вызывает ее структурный переход в более жесткое состояние. Деформация быстро (в пределах цикла контактирования для данной группы зерен) замедляется. При этом для тех

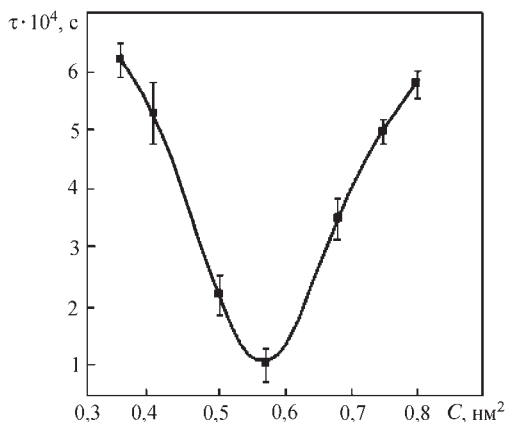


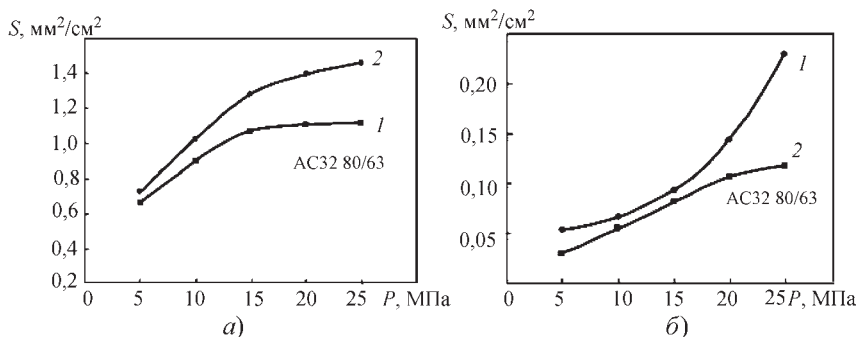
Рис. 7.19. Зависимость времени переключения элементов «молекулярного реле» от их плотности на поверхности раздела «наполнитель — связующее»

зерен, которые выступают из связки сильнее остальных, напряжение резко увеличивается, что инициирует переход окружающей связки в состояние с пониженной жесткостью. Более выступающие зерна будут погружаться в связку, пока энергия, рассеиваемая ими в прилегающем микрообъеме композита, не станет близкой этому показателю для других зерен. Основным последствием для режущего профиля абразивного композита будет выравнивание всех зерен, участвующих в данном цикле контактирования, по высоте их выступления над связкой. При этом если объемы связки, на которые распространяется процесс трансформации вокруг отдельных зерен, перекрываются, зерна абразива на рабочей поверхности становятся «осведомленными» о состоянии друг друга. В результате они образуют саморегулирующийся ансамбль, работающий как одно целое.

Как для традиционных, так и для адаптивных абразивных композитов количество энергии, передаваемой композитом в обрабатываемый поверхностный слой, увеличивается с повышением контактной нагрузки. Для неадаптивных композитов это происходит главным образом путем быстрого увеличения площади контакта с малым увеличением скорости передачи энергии через единицу площади. Для адаптивных композитов, напротив, площадь контакта увеличивается медленно, но скорость передачи энергии через единицу контактной площади высока. Принципиальное изменение морфологии контакта и скорости передачи энергии через единичное контактное сечение создает предпосылки для качественного изменения структуры, свойств и эксплуатационных показателей поверхностного слоя изделий, сформированных адаптивными абразивными композитами.

Зависимость площадей упругого контакта зерен (коррелирует с деформирующим действием инструмента) и пластического контакта зерен (коррелирует с режущей способностью инструмента) от давления показана на рис. 7.20.

Доля контактной поверхности, на которой наблюдается пластический контакт зерен с обрабатываемой поверхностью, т.е. в динамических условиях происходит отделение стружки, составляет 10...25 %. Для композита, не способного к адаптивному поведению, скорость увеличения площади как режущего, так и деформирующего контакта для зерен уменьшается с ростом давления. Для адаптивного композита скорость прироста деформирующего воздейст-



**Рис. 7.20.** Влияние контактного давления на площади упругого (*а*) и пластического (*б*) контакта зерен абразива с керамическим контртелом для адаптивного (*1*) и неадаптивного (*2*) композитов

вия (упругий контакт) его ансамбля зерен с ростом давления также уменьшается, но режущее воздействие (пластический контакт) увеличивается с ускорением. В обоих типах композитов в контактной зоне происходят обратимые и необратимые процессы переориентации части зерен.

В то время, как общие площади контакта для ансамблей абразивных зерен, принадлежащих обычным и адаптивным композитам, близки, структура контактных сечений для этих двух случаев имеет принципиальное различие. Как для обычного, так и для адаптивного композита зерна с чисто пластическим контактом с обрабатываемой поверхностью отсутствуют. Но для обычного композита зерна с чисто упругим типом контакта («деформирующие» зерна) составляют 50...80 % от общего количества зерен, тогда как для адаптивного композита этот показатель составляет не более 10...15 %. Следует учесть, что «деформирующие» зерна усиливают выделение тепла и повреждения обрабатываемой поверхности в процессе шлифования.

Процесс шлифования всегда связан с осцилляциями всех параметров контактирования режущих зерен с обрабатываемым слоем детали. Если зерна образуют единый связный ансамбль, эти осцилляции приобретают тенденцию к когерентности. Это может приводить к различным явлениям, подобным нелинейным эффектам в оптике. Такой эффект может проявляться как «самофокусировка»

сдвиговых напряжений на глубине, равной глубине внедрения ансамбля зерен в обрабатываемый материал. Однако если даже вершины зерен образуют режущий профиль с минимальным перепадом между вершинами (например, в прецизионном гальваническом инструменте), но при этом зерна «не чувствуют» друг друга, т.е. не образуют адаптивный ансамбль, самофокусировка не возникает из-за отсутствия когерентности.

Представленные выше результаты позволяют обобщить понятие адаптивности и сформулировать новый критерий поведения абразивных композитов на полимерных связках — адаптивную способность, которая выражена следующим образом:

$$\alpha = \frac{\Delta G}{\Delta \tau} \ln \frac{G_2}{G_1},$$

где  $\alpha$  — адаптивная способность композита на полимерной связке;  $G_1$ ,  $G_2$  — модули упругости для мягкого и жесткого состояния композита;  $\Delta G = G_2 - G_1$ ;  $\Delta \tau$  — продолжительность структурного перехода.

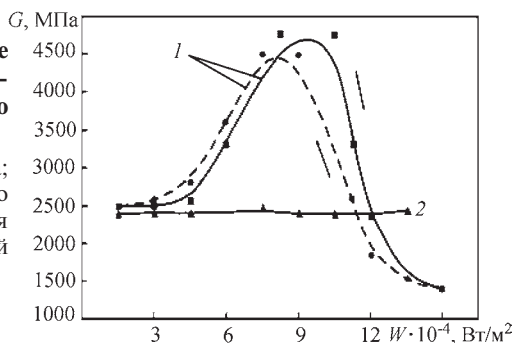
Характер изменения модуля упругости адаптивного и традиционного абразивного композита на полимерной связке в условиях динамического силового воздействия переменной мощности наложением ультразвука на исследуемые образцы представлен на рис. 7.21. Это изменение имеет аналогичный характер и при нагружении композита в зоне резания.

Резцы и фрезы из твердого сплава, заточенные шлифовальными кругами из адаптивных композитов, демонстрируют при обработке сталей и чугунов стойкость в 3–3,5 раза большую, чем заточенные неадаптивными аналогами при близком коэффициенте шлифования (рис. 7.22).

Адаптивное поведение абразивного композита оказывает значительное влияние на структуру поверхностного слоя изделий из закаленных сталей при их шлифовании кругами из cBN. Так, плотность дислокаций в поверхностном слое образцов из стали Р6М5, подвергнутых обработке инструментом с адаптивным композитом, в среднем в 2,5–3 раза ниже, чем при обработке традиционным композитом на полимерной связке при равной глубине резания. Такие структурные отличия поверхностного слоя приводят к значительному снижению скорости накопления усталостных дефектов в изделиях, предназначенных для длительной эксплуатации (валы, зубчатые

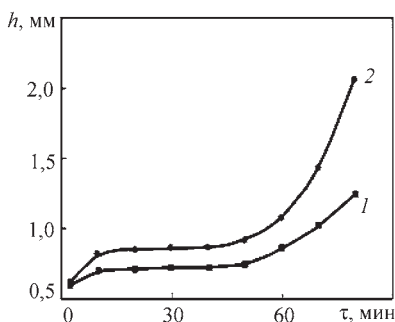
**Рис. 7.21. Обратимое изменение жесткости композитов при различной интенсивности внешнего воздействия:**

$G$  — модуль упругости композита;  
 $W$  — мощность воздействующего ультразвука;  $1$  — адаптирующийся композит;  $2$  — традиционный композит того же состава



**Рис. 7.22. Износ твердосплавного резца по задней поверхности при обработке стали:**

$1$  — резец заточен кругом из адаптирующегося композита;  $2$  — резец заточен кругом из традиционного композита



колеса, подшипники, детали пар трения, турбинные лопатки), что обуславливает увеличение средней долговечности изделий и снижает вероятность внезапного катастрофического разрушения.

Таким образом, применение инструментов с адаптивными композитами позволяет перейти от традиционной задачи шлифования — достижения заданного качества обработанной поверхности изделия при максимальной скорости удаления припуска и максимальном коэффициенте шлифования, к задаче программирования контактного поведения обработанных деталей при эксплуатации, с сохранением высоких стандартов производительности и стойкости инструмента.

#### 7.1.4. Композиты на керамической связке

Абразивный инструмент из порошков алмаза и cBN на керамических связках эффективно используется в промышленности на различных операциях обработки металлических и неметаллических изделий.



Шлифовальные инструменты на керамических связках легко правятся, имеется возможность регулирования их пористости. Круги характеризуются меньшими силами резания при равной производительности по сравнению с инструментом на других видах связок. Шлифование кругами на керамических связках приводит к меньшему нагреву обработанной поверхности, к возникновению в обработанной детали напряжений сжатия, тогда как при шлифовании, например корундовыми кругами, возникают растягивающие напряжения.

Благодаря ряду свойств (высокая износостойкость, низкий коэффициент трения, высокая теплостойкость и др.) керамические связки являются перспективными на ряде операций черновой и финишной обработки материалов. Основой большинства керамических связок являются стекла различного химического состава. От их свойств в значительной степени зависят свойства инструмента. Стеклооснова связки должна обладать высокой смачивающей способностью по отношению к СТМ и наполнителям. Адгезионная активность стекол к СТМ должна обеспечивать высокую прочность удержания их в матрице инструмента. Невысокая реакционная способность основы связки по отношению к наполнителям гарантирует их сохранность в процессе изготовления инструмента. Одним из основных условий является минимальное различие в температурных коэффициентах линейного расширения материалов, входящих в композит связки.

Режущий слой инструмента на керамических связках представляет собой композиционный материал, в состав которого входит СТМ, стекло и наполнители. Основная задача при разработке таких материалов — обеспечить прочное закрепление частиц абразива в матрице, создать условия максимально возможной физической и химической совместимости компонентов материала и, в то же время, сохранение свойств стеклоосновы, абразива и наполнителей в условиях изготовления и эксплуатации инструмента.

Управление межфазным взаимодействием может осуществляться различными путями: регулированием реакционной способности матрицы посредством изменения ее состава, а также изменением методов и режимов изготовления композита; за счет изменения типа поверхности раздела посредством создания специальных покрытий на наполнителях. При необходимости уменьшения взаимодействия

матрицы с наполнителем используют низкотемпературные и высокоскоростные технологии изготовления инструмента.

Инструмент на керамических связках из обычных абразивов получают спеканием при температурах 1000...1250 °С без защитной среды или вакуума. В качестве основы связок используют глины, полевые шпаты, перлиты с добавками талька, кварцевой муки и других кремнийсодержащих материалов. Такие температуры не могут быть применены для изготовления инструментов из алмазов и cBN, так как их теплостойкость значительно ниже и в зависимости от зернистости СТМ ее нижняя граница находится на уровне 700...800 °С.

В качестве связующего керамических связок алмазного инструмента наибольшее распространение получили стекла в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , модифицированные различными оксидами. Так, например, связка марки К1-01 содержит в своем составе стекло, выбранное в данной системе, шамот, карбид бора и алюминий. В состав связки марки К2-01 входят стекло и силикат циркония. На основе этого же стекла, силиката циркония, талька и цинка разработана связка марки СК-3. Связка СК-7 содержит стекло, оксид хрома и полирит. В составе связки К3-01 содержится стекло, тонкозернистый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и гексагональный нитрид бора. Беспористый материал композита образуется при взаимодействии натрийборосиликатного стекла с оксидами железа и алюминия. Таким образом, стеклокомпозиты на основе стекла системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  включают в себя как инертные, так и химически активные добавки. Инструмент на таких связках имеет пористость 20...40 % и изготавливается методом свободного спекания при температурах 700...800 °С.

Для инструмента из cBN разработаны композиционные материалы связок на основе боросиликатных стекол с литийсодержащими наполнителями. Так, например, связка марки С10 состоит из боросиликатного стекла, сподумена и криолита. В состав связок на основе такого стекла могут входить криолит и литий, сурик, бадделит и пиролюзит, а также тальк, бетта-сподумен и криолит. Инструмент на таких связках спекается при температурах 1050...1150 °С.

Нашли применение низкотемпературные связки для инструмента из алмаза и cBN на основе свинецсодержащих стекол в системах  $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{PbO}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ ,  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,

$PbO-B_2O_3$  и  $PbO-SiO_2$ . В зависимости от назначения связки в такие стекла вводят легкоплавкие металлы (олово, свинец, цинк, кадмий) с массовой долей 5...25 %; тугоплавкий нихром — от 8 до 50 %. В качестве неметаллических наполнителей используют полирит (5...60 %); гексагональный нитрид бора (20...35 %) и оксид кадмия (2...20 %); гексагональный нитрид бора (10...30 %) и оксид цинка (1...15 %); графит (12...30 %). Известно применение связок на основе смеси свинецсодержащего композита (59...82 %) и боросиликатного стекла (2...11 %) с графитом (11...31 %). В таких связках металлические наполнители позволяют увеличить теплопроводность, износостойкость и ударопрочность полученных на их основе алмазосодержащих композитов. Для снижения коэффициента трения таких связок по обрабатываемому материалу в их состав вводят твердые смазки (гексагональный нитрид бора, графит, дисульфид молибдена и др.).

Положительное влияние на физико-механические свойства связок на основе свинецсодержащих стекол оказывает их перевод в стеклокристаллическое состояние. При кристаллизации стекол повышается микротвердость, износостойкость и другие свойства. Свинецсодержащие стекла благодаря своей легкоплавкости и адгезионной активности смачивают СТМ и наполнители в зависимости от их химического состава, начиная с температур 400...500 °С. Расплавы таких стекол отличаются повышенными значениями работы адгезии к алмазу и cBN.

Максимальные усилия прочности удержания зерен СТМ в стеклах, содержащих оксид свинца, имеют стекла в системах  $PbO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$ ,  $PbO-ZnO-B_2O_3$  и  $PbO-B_2O_3$ .

Расплавы стекол в определенной степени предохраняют алмазы от окисления. Так, при температуре 600 °С для алмаза марки АС2 потери в расплаве свинцового стекла в 2–3 раза, а натрийборосиликатного стекла в 9–11 раз меньше, чем на воздухе.

В целом установлено, что расплавы стекол обеих систем защищают алмазные порошки от окисления. Потеря массы шлифпорошков снижается от 2 до 20 раз, а микропорошков — от 2 до 80 раз. Потери массы порошков cBN в расплавах стекол не превышают 1...3 %.

Механические свойства стеклоабразивных материалов определяются видом стекла, маркой абразива и его зернистостью. Износо-

стойкость стеклокомпозитов повышается с увеличением зернистости алмаза и сBN. Прочность на изгиб стеклоабразивных материалов для спекающихся и горячепрессованных композиций на основе натрийборосиликатного стекла повышается при введении шлифзерна сBN взамен алмазного, а также микропорошков алмаза и сBN. Такое же влияние оказывают алмаз и сBN на свинецсодержащий стекло-материал.

Теплопроводность  $\lambda$  натрийборосиликатного стекла равна 0,59 Вт/(м·К). Стекло с пористостью 25 %, спеченное при температуре 520...560 °С, имеет  $\lambda = 0,37...0,60$  Вт/(м·К). При спекании пористого стекла с алмазом АС4 160/125  $\lambda$  увеличилась в 1,65 раза. Микропорошок алмаза АСМ 10/7 увеличивает  $\lambda$  в 1,8 раза. Введение сBN КР 125/100 приводит к повышению  $\lambda$  в 2,1 раза.

Более высокой теплопроводностью обладают стеклоабразивные материалы того же состава, но полученные методом термопластического формования. Силикатное стекло с алмазом АС4 160/125 имеет  $\lambda = 1,6$  Вт/(м·К), с алмазом АСМ 10/7 — 1,13 и с сBN КР 125/100 — 0,95.

Теплопроводность свинцового стекла ниже, чем силикатного, и составляет 0,25 Вт/(м·К). При введении в стекло порошков СТМ  $\lambda$  повышается до 0,81 для алмаза АС4 160/125, до 0,86 для АСМ 10/7 и до 0,66 для сBN КР 125/100.

При изготовлении абразивного инструмента методом свободного спекания спекание порошков стекол натрийборосиликатной и свинцовоцинкборосиликатной систем протекает в три стадии: припекание, вязкое течение и диффузионное взаимодействие. Спекание стеклоабразивных композитов характеризуется теми же стадиями, происходит лишь перераспределение величины усадки в зависимости от стадии процесса. При спекании стеклокомпозиционных материалов введение в стекло наполнителей приводит к снижению усадки для металлов в 1,3–2,2 раза, для оксидов в 1,1–1,9 раза.

В зависимости от назначения инструмента из СТМ и требуемых свойств используются различные технологии его изготовления. Используется традиционная керамическая технология, заключающаяся в обжиге брикета рабочего слоя инструмента в свободном состоянии. Эта технология чувствительна к изменению параметров прессования и обжига. Она не исключает разброса свойств связки и нарушения размеров и формы инструмента.

Разработан метод термопластического формования, при котором брикетирование и спекание производятся в специальных пресс-формах. Преимущества этого метода — в возможности получения рабочего слоя инструмента точно заданных форм и размеров. Материал связки в момент горячей допрессовки обычно находится в вязкотекучем состоянии, что позволяет влиять на физико-механические свойства материала (повысить прочность, создать определенную пористость и т.д.). Используя этот метод, можно повысить смачивающую способность расплава по отношению к СТМ и наполнителя за счет эффекта «раздавливания» материала расплава на контактной границе при допрессовке. Свойства материала стабильны за счет создания благоприятных условий протекания процессов в объеме материала (более равномерный прогрев, отсутствие прямого излучения и др.). Эта технология позволяет отказаться от операции скрепления абразивного слоя временным связующим, что требует применения прессов с электрообогревом и увеличивает время изготовления изделий. Значительно сокращается время на операции термообработки. По сравнению с технологией обжига в свободном состоянии время изготовления изделий на операции спекания снижается до 10 раз, а весь цикл от загрузки до выгрузки изделия из печи до 20 раз.

С целью получения композиционных алмазосодержащих материалов с комплексом заданных свойств используют следующие методы. В широких пределах регулируют свойства композиционных материалов введением различных наполнителей. В зависимости от типа наполнителя регулируются прочность, твердость, износостойкость, фрикционные и другие свойства материала. Можно существенно менять свойства стекол за счет использования стеклоосновы, как путем применения стекол различного химического состава, так и модифицированием исходного стекла различными оксидами. Кроме этого, в качестве основы связки используют смеси стекол разного состава (табл. 7.6).

Одной из особенностей технологии изготовления инструмента на керамических связках является возможность применения относительно легкоплавких стекол различного химического состава. Температура термообработки связок на базе таких стекол намного ниже, чем связок, применяемых для обычных абразивов. Это благоприятно сказывается на свойствах СТМ, так как они

## 7.6. Свойства композитов

Марка связки	Основа материала	Предел прочности при изги- бе, МПа	Термиче- ский ко- эффици- ент линей- ного рас- ширения, $\alpha \cdot 10^7, \text{K}^{-1}$	Твердость, HRB <sub>100</sub>	Микро- твердость основы, МПа
K1-01 (K1)	Стекло системы Na <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и инертные наполни- тели	45	37	90...100*	7600
K2-01 (СК)	Стекло системы Na <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и абразив	75	64	110...115*	7600
СК3	Стекло системы Na <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> , аб- разив, твердая смазка	49	40	100...105*	7600
СК7	Стекло системы Na <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и абразивы	35	55	100...110*	7600
K17	Смесь стекол систем PbO-ZnO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и твердая смазка	20	11	65...70* (HR15T)	2900
K18	Стекло системы PbO-ZnO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и сплав металлов	32	10	100...105* *	2900
K19	Стекло системы PbO-ZnO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и твердая смазка	27	12	35...40* (HR15T)	2900
K20	Стекло системы PbO-ZnO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> и мелкодисперсный абразив	29	8	120...125**	3600

Окончание табл. 7.7

Марка связки	Основа материала	Предел прочности при изги- бе, МПа	Термиче- ский ко- эффици- ент линей- ного рас- ширения, $\alpha \cdot 10^7, \text{K}^{-1}$	Твердость, HRB <sub>100</sub>	Микро- твердость основы, МПа
K31	Стекло системы PbO–ZnO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> и легкоплавкие ме- таллы	31	9	125...130**	2900
K41	Стекло системы Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> и смесь металлов	140	59	110...115**	7600
K51	Стекло системы PbO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , абразив и твердая смазка	27	12	45...50* (HR15T)	1880

\* Шарик  $\varnothing$  5 мм; \*\* шарик  $\varnothing$  1,588 мм.

имеют сравнительно невысокую теплостойкость. Кроме этого, применение легкоплавких стекол обеспечивает более экономичный процесс термообработки изделий. Температуры термообработки конкретных керамических связок зависят от их состава и находятся у связок на основе стекол в интервале 550...650 °С, а для натрийборосиликатных стекол 700...800 °С. Типичные температурно-временные режимы термообработки рабочего слоя изделий приведены на рис. 7.23. Кривая 1 характеризует цикл термообработки изделия по термопластической технологии прессования. По кривой 2 производится обжиг изделий по технологии свободного спекания с несколькими ступенями выдержки и общим временем нахождения изделия в печи порядка 20...26 ч (спекание—охлаждение).

Качество инструмента зависит от целого ряда операций при его изготовлении: смешивания, засыпки и разравнивания, брикетирования, и должно обеспечиваться составом материала связки и

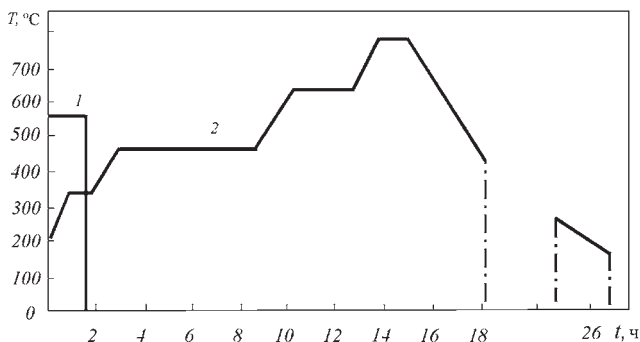


Рис. 7.23. Режимы спекания инструмента:

1 — технология термопластического формования; 2 — технология свободного спекания

технологией изготовления инструмента. Контроль изготовления рабочего слоя инструмента проводится путем замера его геометрических размеров и твердости. Твердость инструмента на керамических связках в зависимости от степени твердости стеклоабразивного композита замеряется на приборе типа ТП (Роквелл) по шкале В стальным шариком диаметром 1,588 или 5 мм при нагрузке 988 Н, или стальным шариком диаметром 1,588 мм при нагрузке 147 или 441 Н на приборе типа ТРС (супер-Роквелл).

Области применения такого инструмента разнообразны. Он может изготавливаться различных форм и размеров и находит применение, например, при шлифовании закаленных сталей с охлаждением и без него. На этих операциях обеспечивается производительность шлифования до  $600 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . Положительно зарекомендовали себя круги из cBN для внутреннего шлифования. Хонинговальные бруски из cBN обеспечивают высокое качество обработки стальных закаленных деталей с охлаждением. Алмазные инструменты зарекомендовали себя на финишных операциях обработки сталей и неметаллических материалов. Практически можно изготавливать инструменты любых форм и размеров с регулируемой пористостью 30...40 %. Коэффициент трения связки имеет значения, например, по стали Р6М5 в пределах 0,08...0,15. Относительный расход СТМ в зависимости от используемого режима обработки изделий составляет 1...5 мг/г.



### 7.1.5. Инструменты с упорядоченным расположением зерен СТМ

Основные преимущества и недостатки процесса шлифования связаны со спецификой инструмента — большим количеством абразивных частиц, которые случайным образом распределены в рабочем слое, причем при этом имеют произвольную ориентацию.

С одной стороны, за счет множества режущих вершин с микронными глубинами резания удается достичь высокого качества обработки. Но, в то же время, участие зерен в съеме припуска крайне неравномерно, отдельные зерна в процессе обработки испытывают нагрузки и снимают припуски в десятки раз выше, чем средние значения, а некоторые не только не принимают участия в обработке, но и оказывают отрицательное действие.

Одним из направлений повышения эффективности процесса шлифования является создание инструмента с упорядоченным и/или ориентированным расположением режущих зерен.

Широко распространено упорядоченное расположение зерен при изготовлении шкурки. Для геометрической ориентации зерен чаще всего используют технологию ориентации зерен в сильных электростатических полях непосредственно во время нанесения зерен на подложку. Реже используют поля для ориентирования в сильном электромагнитном поле металлизированных зерен алмаза. Для изготовления шкурки с толстым рабочим слоем иногда используют ориентирование зерен алмаза в вязком течении еще жидкой абразивной массы, в виде потока с большим градиентом скорости.

Упорядоченное расположение отдельных алмазных зерен при изготовлении шкурки применяют очень редко, в отличие от упорядоченного расположения больших групп зерен. Так, до 25 % общего количества шкурки открытого типа изготавливаются с программным расположением рабочего слоя. При этом массивы зерен алмаза чередуются определенным образом с безабразивными промежутками, предназначенными для подвода СОЖ, отвода продуктов обработки и износа, тепла, а также для повышения эластичности инструмента. Наибольшее распространение получило расположение рабочей массы слоями (рис. 7.24, а), отдельными скоплениями (рис. 7.24, б) и в виде слоя с локальными безабразивными зонами (рис. 7.24, в).

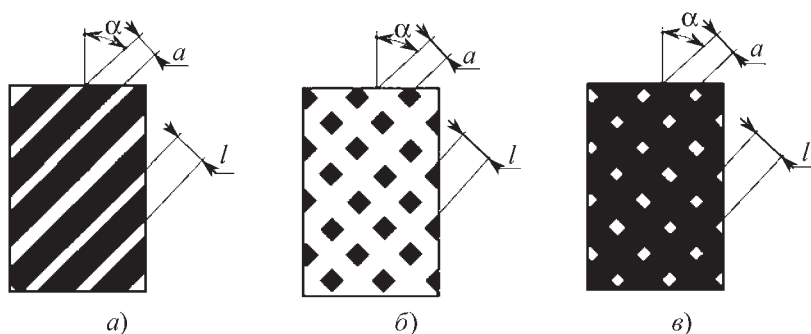


Рис. 7.24. Шкурки с программным расположением зерен алмаза

Такое расположение позволяет обеспечить необходимое число режущих зерен в пределах зоны контакта с определенным расстоянием между ними. Это обеспечивает оптимальные условия для работы каждого зерна, повышает производительность и стойкость инструмента, снижает его засаливание. Чаще всего такие шкурки применяют при машинной обработке, так как в этом случае гарантируются определенные технологические режимы обработки в контактной зоне, которые являются исходными для выбора конкретного вида рабочего рисунка.

Упорядоченное расположение зерен алмаза используется и при изготовлении отдельных видов алмазного инструмента на гальванической связке. Поскольку для изготовления гальванического инструмента наиболее часто используют порошок из высокопрочных зерен алмаза, имеющих коэффициент формы близкий к единице, то их ориентацию проводят в отдельных случаях.

Среди инструмента с гальваническим закреплением зерен упорядоченное расположение алмазов традиционно используется для изготовления алмазных буров, особенно малых диаметров (рис. 7.25, а). Учитывая сложные условия работы такого инструмента (низкие линейные скорости резания и высокие нагрузки), положительный эффект от специального расположения зерен очень существенен, так как значительно (до 30 %) уменьшается удельная мощность при сохранении производительности обработки и стойкость инструмента повышается до 40 %.

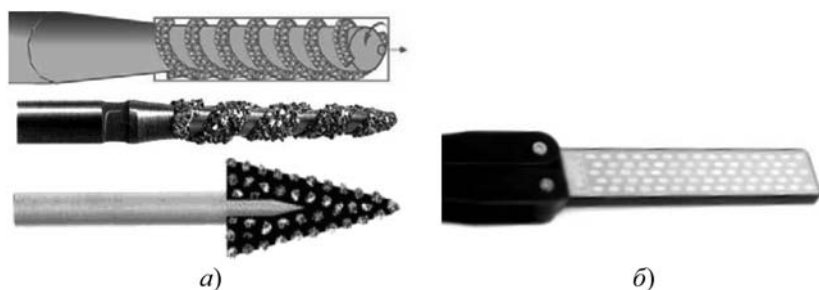


Рис. 7.25. Гальванический алмазный инструмент с упорядоченным расположением режущих зерен

При изготовлении правящих брусков гальваническим способом также используют разные способы упорядочения алмазов, преимущественно это способы, аналогичные используемым при производстве шкур (ориентация в сильных электростатических полях).

Иногда используют укладку зерен алмаза через специальные трафареты (рис. 7.25, б). Несмотря на высокую стойкость такого инструмента, его использование может быть оправдано, прежде всего, за счет повышенной способности сохранять высокую точность рабочей поверхности инструмента.

Применительно к традиционным шлифовальным кругам, также много работ было посвящено вопросам повышения эффективности инструмента путем ориентации зерен различными способами (в магнитном или электростатическом поле, переносом в конденсаторах, ориентирование в нестационарно движущемся потоке жидкости и др.). Однако эти методы характеризуются сравнительно невысокой степенью ориентированности зерен и не позволяют эффективно управлять их пространственным положением. К тому же они не применимы для изготовления инструмента на основе спеченного металлического композита, а именно для такого инструмента упорядоченность зерен может дать наибольший эффект.

Круги на основе спеченного металлического композита с упорядоченным расположением зерен алмаза кардинально изменяют процесс шлифования. Фактически обработка таким инструментом приближается к процессу множественного микрофрезерования. Упорядоченное расположение позволяет максимально выровнять

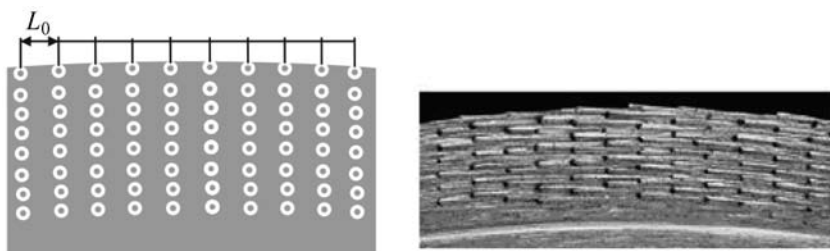


Рис. 7.26. Схема расположения зерен алмаза и внешний вид рабочей поверхности шлифовального круга, изготовленного по технологии ARIX

и управлять в широком диапазоне условиями работы отдельных зерен алмаза. Представляется перспективным изготавливать такой инструмент на основе многослойных связок, поскольку расположение зерен алмаза фактически многослойно детерминировано.

Наиболее известна технология изготовления инструмента с упорядоченным расположением зерен алмаза ARIX (рис. 7.26). Эта технология основана на размещении зерен в объеме связки посредством специальных сепараторов. При обработке достаточно вязких материалов такие шлифовальные круги позволяют повысить производительность обработки при неизменном качестве до 30 %, при этом удельный расход алмаза на 10...20 % меньше, чем при использовании обычных шлифовальных кругов.

Основное отличие в работе такого инструмента состоит в том, что инструмент с послойным расположением зерен алмаза показывает нестабильные результаты работы во время смены соседних слоев режущих элементов. Одним из способов уменьшения этого эффекта является размещение слоев с перекрытием (рис. 7.27, а) или под углом к плоскости резания (рис. 7.27, б).

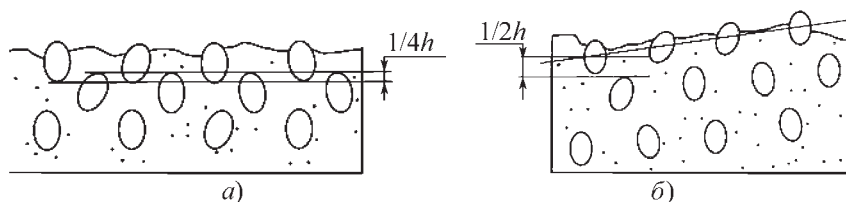
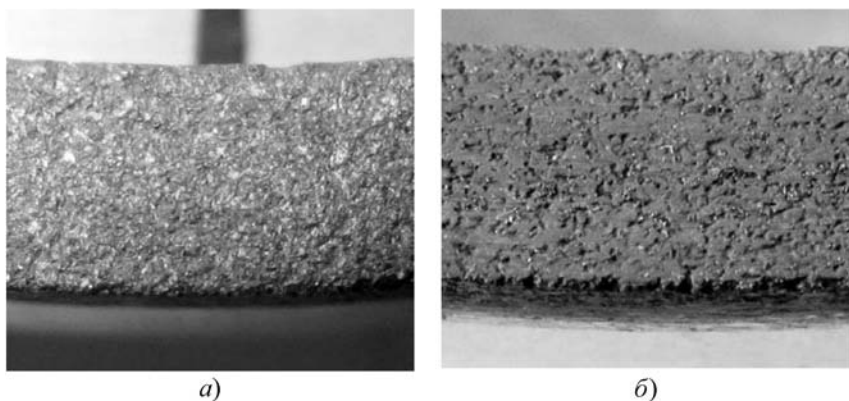


Рис. 7.27. Схемы расположения алмазноносных слоев

Сдерживающим фактором использования такого инструмента являются технологические сложности его изготовления и, соответственно, высокая цена. Одно из решений в этом направлении состоит в изготовлении инструмента с подобными характеристиками путем модификации стандартной связки шлифовального инструмента, добавлением в его связку опорных элементов. В отличие от широко используемых добавок и присадок в абразивном слое, опорные элементы влияют не на отдельные характеристики рабочего слоя, а комплексно. Изменяются как характеристики связки необходимым образом, так и, за счет дистанцирования пространственного положения режущих вершин, условия резания единичным зерном. Во многом такой рабочий слой аналогичен мелкодискретному (прядок дискретизации соизмерим с размерами абразивных зерен) абразивному слою. Для структуризации рабочего слоя алмазного и cBN-инструмента в качестве структурирующей добавки хорошо показали себя зерна дробленого ПСТМ на основе cBN киборит.

Эффект от структурирования рабочего слоя дробленным ПСТМ проявляется при производительности обработки более  $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . При производительности обработки менее  $100 \text{ мм}^3/\text{мин}$  наличие



**Рис. 7.28.** Поверхность рабочего слоя инструмента из cBN (КВ 125/100 50 %), структурированного дробленным ПСТМ на основе cBN киборит (КД 500/400 50 %), при производительности:

а —  $100 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ; б —  $400 \text{ мм}^3/\text{мин}$

опорных элементов в связке не оказывает влияния на показатели процесса шлифования и состояние рабочей поверхности инструмента (рис. 7.28).

По мере увеличения производительности обработки (от 200 до 500 мм<sup>3</sup>/мин), увеличиваются контактные нагрузки в зоне обработки, и зерна дробленого ПСТМ начинают функционировать как структурообразующая добавка.

Опорные элементы снижают интенсивность износа связки, но сами в результате контакта со шламом постепенно разрушаются, образуя при этом кратеры в инструментальном композите. Последние фактически делают рабочий слой прерывистым, в результате чего улучшаются условия отвода шлама и условия резания отдельными режущими зернами. С этим связано уменьшение тепловыделения, снижение удельной мощности шлифования и относительного расхода СТМ.

## **7.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНО-И cBN-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Синтетический алмаз практически с начала создания стал основным видом алмаза, применяемого в промышленности, и с тех пор стабильно занимает 80...90 % общего объема использования алмаза в технике. Из порошков синтетического алмаза изготавливают почти 90 % алмазно-абразивного инструмента со связанным абразивом и паст, практически весь алмазно-абразивный инструмент на органической и керамической связках, все шкурки и ленты, 95 % инструмента на гальванической и почти 90 % на металлической связках.

Высокая конкурентоспособность и эффективность абразивных инструментов из СТМ предполагает их реализацию в высоких технологиях механической обработки. За последнее время разработан ряд технологий, которые нашли широкое распространение в машино- и приборостроении. Среди них следует отметить:

— высокопроизводительную алмазно-абразивную обработку режущих инструментов из твердых сплавов, инструментальных сталей и керамик;

— получение износостойких поверхностей деталей машин путем алмазного хонингования с одновременным легированием обрабатываемой поверхности;

- алмазную обработку плоских и асферических деталей оптики;
- прецизионную алмазно-абразивную обработку деталей типа «шар» из конструкционных керамик;
- резку композиционных материалов дисковым алмазным инструментом со структурно-ориентированным рабочим слоем;
- формообразование и профилирование алмазно-абразивного инструмента электрофизическими методами.

Созданы технологические устройства для глубинного, вибрационного, электрохимического и электроимпульсного шлифования, подачи технологической жидкости в зону обработки, специализированное оборудование для этих процессов.

Опыт использования таких технологий показал, что алмазно-абразивные инструменты, которые используются в них, позволяют:

- осуществлять групповую обработку;
- достигать стабилизации определенных задаваемых параметров обработки, как-то: температуры на поверхности детали; шероховатости, точности размеров, производительности, стойкости;
- в одном инструменте можно комбинировать функциональные возможности нескольких инструментов для согласованных операций.

Использование абразивных инструментов из СТМ позволяет:

- вести обработку независимо от структурного и фазового состояния обрабатываемых материалов, т.е. «твердые» и «мягкие» материалы одинаково эффективно поддаются обработке;
- исключить термическое воздействие на структуру обрабатываемых материалов за счет реализации процессов с температурой менее 600 °С;
- увеличить производительность обработки в два-три раза на получистовых и финишных операциях;
- увеличить стойкость инструмента не менее чем в два раза;
- применять шлифовальные инструменты из СТМ: крупногабаритные форм 1A1 и 6A2 диаметром от 400 до 900 мм (рис. 7.29); мелкоразмерные форм 1A1, 1V1, 12R4 диаметром от 30 до 100 мм; с прерывистым и двухслойным рабочим слоем (рис. 7.30 и 7.31).

Новые абразивные инструменты из СТМ отличаются высокими производительностью, износостойкостью и надежностью, а также особыми тепло- и электрофизическими свойствами. Их применение в значительной мере определяет качество изготовления и высо-

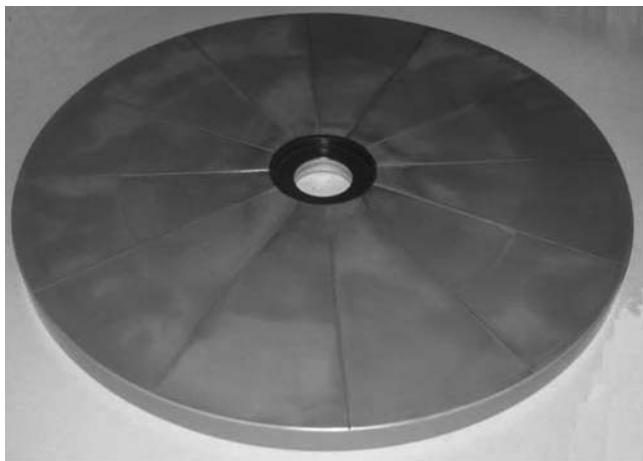


Рис. 7.29. Круг шлифовальный алмазный формы 1А1 диаметром 600 мм на органической связке

кие технические параметры ответственных деталей многих машин и приборов, изделий электроники, повышает производительность бурения скважин на нефть и газ, обеспечивает обработку строительных изделий. Использование абразивных инструментов из СТМ способствует техническому прогрессу при формообразовании деталей на основе новых материалов и использовании энерго-сберегающих технологических автоматизированных процессов машино- и приборостроения.

Наиболее эффективно применение абразивного инструмента из сверхтвердых материалов при обработке режущих инструментов и деталей машин, в том числе с наплавленными, напыленными износостойкими покрытиями, а также стекла, керамики, корунда, кремния, древесных материалов, пластиков и резины, строительных материалов, при бурении горных пород и правке абразивного инструмента.

Физико-механическое взаимодействие режущих зерен СТМ с обрабатываемым материалом в процессе абразивной обработки определяет характер стружкообразования и особенности формирования поверхностного слоя изделий. При обработке инструментом из обычных абразивов (ЭБ, КЗ и др.) вследствие их недостаточной твердости и





**Рис. 7.30.** Круг шлифовальный алмазный формы 12A2-45° с прерывистой рабочей поверхностью на органической связке



**Рис. 7.31.** Круги отрезные алмазные формы 1A1R на металлической связке

прочности, низких теплофизических характеристик, а также нерациональных геометрических параметров зерен возникают большие силы резания, удаление материала зернами абразива сопровождается высокой температурой в контактной зоне резания. В результате теплового и механического воздействия ухудшаются состояние и свойства поверхностного слоя обрабатываемой детали. В его материале возможны фазовые и структурные изменения. В большинстве случаев образуются остаточные напряжения растяжения — источники развития микро- и макротрещин. Все это вместе взятое приводит к снижению износостойкости и долговечности изделий.

Большие резервы заложены в использовании возможностей СТМ как в самом абразивном инструменте, так и в процессах обработки. Одним из основных резервов является обеспечение оптимальной устойчивости и прочности закрепления зерна СТМ в рабочем слое в зависимости от характеристики инструментов и условий обработки. Особенно важное значение имеют состав и свойства связки инструмента, являющейся не только средством удержания зерен СТМ, но и самостоятельным фактором взаимодействия с обрабатываемым материалом, существенно влияющим на процесс резания.

Не менее важным для использования потенциальных возможностей СТМ является совершенствование геометрии рабочего слоя и конструкции инструмента. Закономерности образования рабочей

поверхности инструмента из СТМ и расчет параметров геометрии и толщины рабочего слоя показывают, что возможно создание не изменяющегося в процессе работы профиля режущей поверхности абразивного инструмента из СТМ, если каждый участок рабочей поверхности таких инструментов производит одинаковый съем обрабатываемого материал.

Для устранения ударных нагрузок и вибраций применяют прерывистые круги, обеспечивающие практически постоянную (квазипостоянную) площадь контакта рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемого изделия. Применение таких инструментов позволяет резко снизить тепловую и динамическую напряженность процесса абразивной обработки, исключить брак изделий, повысить производительность обработки и износостойкость обрабатываемых изделий. Изменяя конструктивные элементы инструмента с прерывистой и эксцентрично расположенной режущей поверхностью, можно управлять термическим режимом шлифования, снизить среднюю контактную температуру в зоне резания. Можно поддерживать в заранее заданных пределах силу резания, что особенно важно при работе кругами на металлической связке, для которых характерен рост работы трения в контакте изделия с межзеренной поверхностью абразивного слоя. Применение многослойных и сборных кругов расширяет технологические возможности инструмента, позволяет совместить процессы предварительного и окончательного шлифования в одну операцию, повысить производительность, достигнуть роста износостойкости абразивных кругов, снизить шероховатость обработанной поверхности.

К перспективным методам шлифования относятся глубинный, прерывистый, врезной, электрохимический и электроэрозионный, охватывающий, комбинированный, с наложением низко- и высокочастотных колебаний (ультразвуковой), со стабилизацией скорости и силы резания, скоростной и сверхскоростной, которые дают возможность во много раз увеличить производительность и работоспособность кругов из СТМ и полностью исключить применение инструментов из обычных абразивов при шлифовании различных металлов и сплавов.

Работоспособность инструментов из СТМ, производительность и качество обработанной поверхности деталей повышают эффек-

тивные составы и способы подвода смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), а также методы профилирования и правки кругов из СТМ, которые позволяют управлять микро- и макрорельефом шлифовальных кругов путем направленного, избирательного воздействия и получать развитый рельеф; не разрушают и активизируют работу; увеличивают число режущих зерен и выступание их над уровнем связки; повышают режущую способность инструмента.

Применяются эффективные абразивные инструменты из СТМ также для обработки труднообрабатываемых материалов и крупногабаритных деталей; формирования поверхностей гильз цилиндров, поршней и других деталей с заданными эксплуатационными характеристиками; врезном шлифовании деталей сложного профиля (лопаток турбин, подшипников и т.п.); измельчении органических материалов для производства бумаги, древесноволокнистых и стружечных плит, бездефектного шлифования деталей летательных аппаратов на основе рационального применения технологических сред; обработки различных деталей электронной техники из полупроводниковых и других монокристаллических материалов с учетом анизотропии их свойств; обработки высокотвердых неметаллических материалов; скоростной финишной обработки очковых линз и деталей оптических устройств.

При обработке оптических деталей и деталей электронной техники, ювелирных изделий перспективны инструменты со связанными полимерными и металлическими связками абразивом и алмазом. Также инструменты эффективны в процессе оптического и декоративного полирования оптических и светотехнических деталей из стекла, а также бриллиантов.

Для полного использования алмазов в камнеобработке разработаны способы стабилизации дисковых пил, а также способы обеспечения предварительного напряженного состояния корпусов инструментов методами вальцевания или прокатки. Реализация таких направлений открывает реальные перспективы для многоступенчатой поточно-механизированной алмазно-дисковой распиловки изделий из природного камня, которая позволяет более чем в пять раз интенсифицировать процессы обработки. Важное значение имеет решение проблемы создания эффективных исполнительных органов для карьерной добычи камня с использованием композицион-

ных СТМ. Разработка технологии полного цикла конвейерного алмазного шлифования и полирования облицовочных изделий из твердых пород природного камня, совершенствование и создание механизированных агрегатов для алмазной обработки сложнопрофильных архитектурно-строительных изделий из мрамора и гранита позволяют увеличить производительность в 5–10 раз и резко поднять культуру производства.

## Глава 8

### ПРАВЯЩИЕ АЛМАЗНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Применение в практике машиностроения прогрессивных шлифовальных инструментов, оснащенных новыми абразивными материалами, в том числе и сверхтвердыми высокопрочными связками, и имеющих во многих случаях сложный высокоточный профиль, требует постоянного совершенствования технологии их правки [10].

Класс современных высокоточных алмазных инструментов сложного профиля (рис. 8.1) обеспечивает реализацию высокоэффективного процесса фасонного врезного шлифования при изготовлении наиболее сложных и трудоемких деталей: замков лопаток газотурбинных двигателей, подшипников, автомобильных клапанов, шаровых пальцев, шестерен, винтовых и шаровинтовых соединений, лопастей, деталей штампов и пресс-форм и других ответственных деталей в условиях крупносерийного и массового производства с высокими точностью (в несколько микрометров) и производительностью.



Рис. 8.1. Правящие алмазные инструменты

В процессе шлифования абразивные инструменты изнашиваются под действием сил резания и нагрева до высоких температур, а также динамического, контактного и химического взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки.

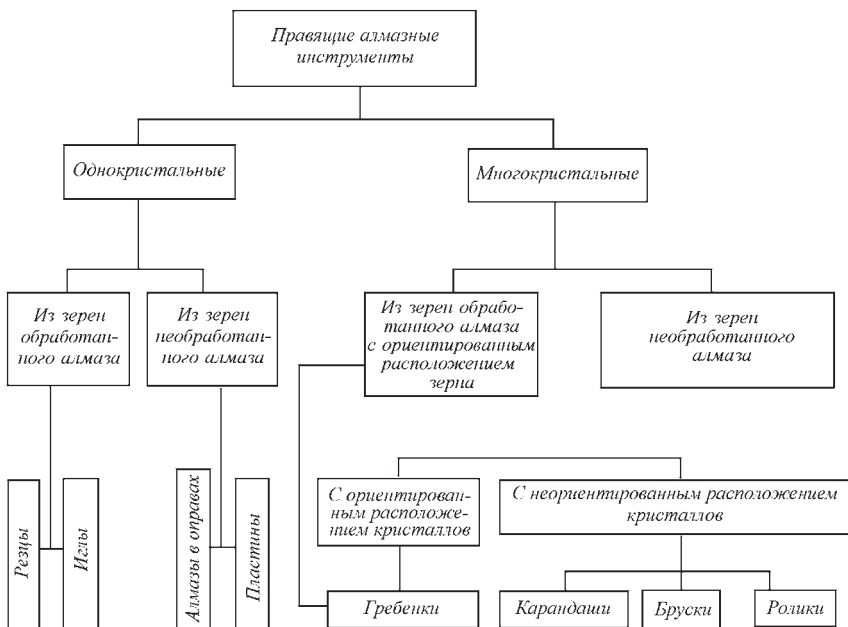
Износ рабочей поверхности круга (РПК) в зависимости от технологических условий шлифования проявляется в виде притупления и расшатывания в связке режущих зерен, поверхностного и объемного их выкрашивания, выкалывания из связки целых зерен, выламывания с РПК блоков, содержащих зерна (или их осколки) и частицы связки, забивания пор и межзернового пространства металлической стружкой и шламом, налипания металла на абразивные зерна, а также искажения геометрической формы круга. В связи с этим через некоторый период времени, определяемый технологическими условиями шлифования, абразивный круг настолько теряет режущую способность либо изменяет геометрическую форму, что требуется применить специальные меры, позволяющие восстановить способность инструмента проводить обработку заготовок с заданными показателями. Такими мерами является правка РПК, осуществляемая разнообразными правящими инструментами.

На рис. 8.2 представлена классификация современных правящих инструментов. Промышленность производит правящие инструменты, различающиеся технологическим назначением, материалом режущих элементов, конструкцией, типажом, габаритами, способом крепления в правящем приспособлении, методом и кинематическими особенностями правки, точностью. Характеристики этих правящих инструментов приведены в табл. 8.1, 8.2.

Однокристалльные алмазные правящие инструменты оснащают зернами природного алмаза. Обработанные кристаллы алмаза используют для изготовления правящих резцов, игл, а также алмаза в оправе и специальных пластин (см. табл. 8.1). Два последних инструмента оснащаются и необработанными зернами природного алмаза.

Алмазные правящие резцы (см. табл. 8.2) применяют для профилирования червячных абразивных кругов. Модуль профилируемого червячного круга может изменяться от 0,4 до 8,0 мм. Для изготовления резцов используют природные технические алмазы массой 0,61...1,10 карата.

Из-за сложной технологии изготовления алмазные резцы отличаются сравнительно высокой стоимостью, но их эксплуатация, особенно в условиях серийного и массового производства, эконо-



**Рис. 8.2.** Классификация правящих инструментов

мически оправдана в связи с высокими производительностью и точностью профильного шлифования деталей кругами, правленными этими инструментами.

Алмазные иглы (см. табл. 8.1) предназначены для правки однониточных резбошлифовальных кругов. Они могут использоваться также и для профилирования абразивных кругов по копиру. Для изготовления игл применяют кристаллы природного алмаза формы октаэдра, октаэдроида, ромбододекаэдра, ромбододекаэдроида с небольшим искажением, а также пиленные и колотые кристаллы.

Рабочая часть алмаза гранится по форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине 60 и 90°. Для оснащения игл используют алмаз массой 0,10...0,25 карата.

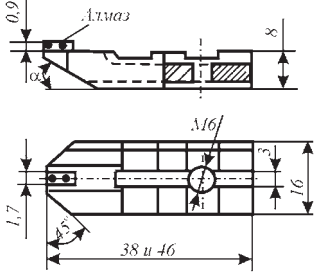
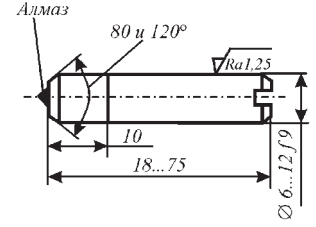
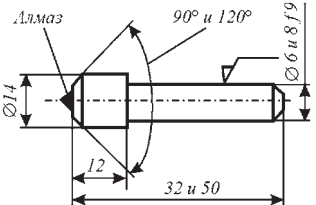
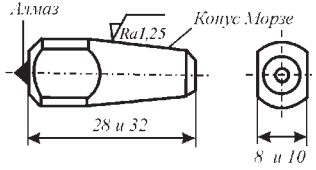
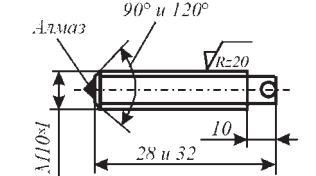
Алмазы в оправках (АО) (см. табл. 8.1) являются универсальными правящими инструментами и предназначены для правки кругов прямого и фасонного профиля. Они изготавливаются четырех типов и оснащаются зернами природного алмаза XII группы, подгруппы «а» (1-, 2-, и 3-го качества) и подгруппы «б», а также XXXI группы,

8.1. Характеристики прявящих инструментов

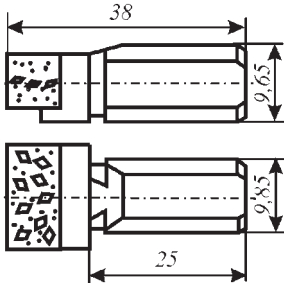
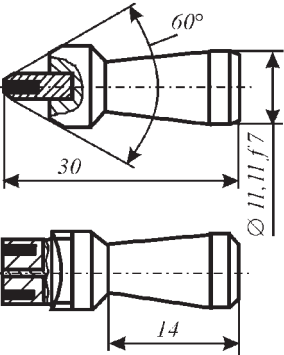
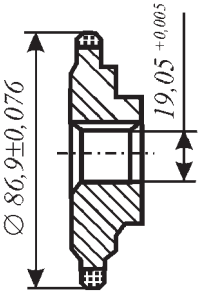
Наименование	Конструкция	Тип	Обозначение	Масса алмаза, карат
Алмазные карандаши ГОСТ 607–80		01	3908-0051– 3908-0055	0,03...0,50
		04	3908-0056– 3908-0069	–
		01	3908-0070– 3908-0073	0,05...0,50
		02	3908-0074– 3908-0077	0,05...0,20
		04	3908-0078– 3908-0080	–
		02	3908-0081– 3908-0088	0,017...0,200
		03	3908-0089– 3908-0090	0,05...0,20
		04	3908-0091– 3908-0093	–
Алмазные иглы ГОСТ 17564–85			2	3908-0031– 3908-0050
	1		0,21...0,40	



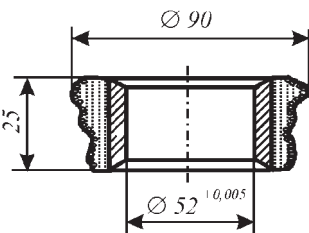
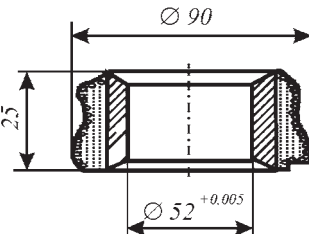
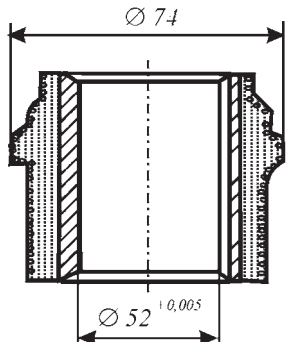
Окончание табл. 8.1

Наименование	Конструкция	Тип	Обозначение	Масса алмаза, карат
Алмазные резцы для профилирования червячных абразивных кругов ГОСТ 17368-79			3908-0011- 3908-0020	0,61...1,10
Алмазы в оправках ГОСТ 22908-91		1	3908-0101- 3908-0194	0,02...2,10
		2	3908-0195- 3908-0234	0,21...0,85
		3	3908-0235- 3908-0254	0,86...0,10
		4	3908-0255- 3908-0284	0,31...1,60

8.2. Характеристики правящих инструментов и алмазного сырья

Наименование	Конструкция	Алмазное сырье
Алмазные гребенки		<p>Зерна природного алмаза, 40...60 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества, 72 алмаза расположены в трех слоях. Общая масса алмаза 1,2...1,8 карата</p>
Алмазные гребенки		<p>Зерна природного алмаза, 0,05...0,10 карата, XXXIII группы, подгруппы «б». Толщина алмаза 0,75...1,25 мм, отклонение по толщине не более 0,1 мм. Вершины зерен расположены в одной плоскости</p>
Алмазные ролики		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. Масса алмаза в ролике не менее 7 карат. Дисбаланс не менее 0,3 г·см</p>

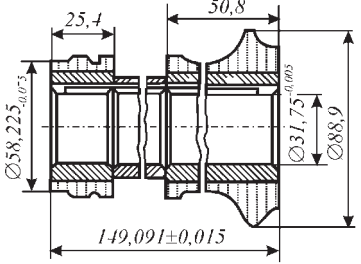
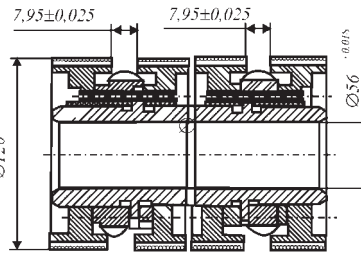
Продолжение табл. 8.2

Наименование	Конструкция	Алмазное сырье
		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. Масса алмаза в ролике не менее 23 карат. Дисбаланс не более 0,3 г·см</p>
Алмазные ролики фасонного профиля		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. Масса алмаза в ролике не менее 24 карат. Дисбаланс не более 0,3 г·см</p>
		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. Масса алмаза в ролике не менее 45 карат. Дисбаланс не более 0,4 г·см</p>

Продолжение табл. 8.2

Наименование	Конструкция	Алмазное сырье
Алмазные ролики резьбовые		<p>Алмазный шлифпорошок А 250/200. Масса алмаза в ролике не менее 35 карат. Относительная концентрация 100...120</p>
		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. Дисбаланс не более 0,3 г·см</p>
Блок алмазных роликов		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. По окружности 112 мм на торце равномерно уложены 23 кристалла алмаза 0,04...0,07 карата, XIV группы, подгруппы «а», в интервалах уложены по 2—3 алмаза XV, «а», 1-го качества, 90...120 шт. на карат. Масса алмаза в блоке не менее 38 карат. Дисбаланс не более 0,2 г·см</p>

Окончание табл. 8.2

Наименование	Конструкция	Алмазное сырье
		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. Масса алмаза в блоке не менее 59 карат. Дисбаланс не более 0,3 г·см</p>
Блок алмазных роликов		<p>Зерна природного алмаза, 90...120 шт. на карат, XV группы, подгруппы «а», 1-го качества. На торцах ролика 120 мм по окружности уложены 25 кристаллов XIV группы, подгруппы «а», 1-го качества в интервалах — по 2–3 алмаза XV группы, размером 120–90 шт. на карат. Дисбаланс не более 0,2 г·см</p>

подгруппы «а» (1- и 2-го качества). Допускается применение алмазов с металлическими и неметаллическими покрытиями. Для всех типов АО используют алмазы массой 0,02...2,10 каратов. АО изготавливают с углами державки 90° (для правки кругов фасонного профиля) и 120° (для правки кругов прямого профиля).

Стойкость и эффективность эксплуатации однокристалльных правящих инструментов могут увеличиваться, если площадка контакта алмаза с шлифовальным кругом в процессе правки будет оставаться неизменной или изменяться незначительно. Данное условие выполнимо в том случае, если алмазу будет придана форма пластины постоянного сечения, которая вырезается из октаэдрического кристалла и закрепляется в инструменте так, чтобы ее износ развивался

в кристалле в твердом направлении. Алмазные пластины не перетачиваются и не переустанавливаются, работают до полного износа.

Многокристалльные алмазные правящие инструменты изготавливаются из обработанных кристаллов природного алмаза с ориентированным расположением кристаллов, а также из необработанных природных и синтетических алмазов.

Алмазные гребенки (см. табл. 8.2) изготавливают из обработанных и необработанных зерен алмаза с ориентированным расположением кристаллов. Они применяются для правки по копиру профильных шлифовальных кругов. Рабочая часть гребенок состоит из алмазных столбиков, которые расположены в металлической вставке параллельно оси инструмента. Во многих случаях гребенками успешно заменяют дорогие однокристалльные правящие инструменты из обработанного алмаза.

Алмазные карандаши (см. табл. 8.1) относятся к числу правящих инструментов, находящих наибольшее практическое применение. Они изготавливаются из зерен природного и синтетического алмаза с ориентированным и неориентированным расположением. Алмазные карандаши выпускают следующих типов: 01 — с зернами алмаза, расположенными цепочкой по оси карандаша; 02 — с зернами алмаза, расположенными слоями; 03 — с зернами алмаза, расположенными на сферической поверхности; 04 — с неориентированным расположением зерен алмаза (табл. 8.3).

### 8.3. Основные характеристики алмазного карандаша

Форма корпуса	Обозначение	Выпускаемый тип	Зернистость алмаза, мкм	Масса алмаза, карат
Цилиндрическая	A	0,1 0,4	63/50...1000/800	0,31...2,0
Коническая	B	0,1 0,2 0,4	500/400...800/630	
Цилиндрическая ступенчатая	C	0,1 0,3	1000/800...2000/1600	1,0...2,5

Алмазные ролики (см. табл. 8.2) по сравнению с другими правящими инструментами обладают рядом важных технико-экономических преимуществ, которые особенно ярко проявляются в условиях серийного и массового производства.

Алмазные ролики изготавливаются из тех же алмазов, что карандаши и бруски. В зависимости от геометрической формы образующей алмазные ролики могут быть с прямым и фасонным профилем. Правка абразивных кругов проводится методом врезания, на проход или по копиру при рабочей окружной скорости круга.

Ролику сообщается принудительное вращение (встречное или попутное) обычно с окружными скоростями 5...20 м/с.

Многокристалльные алмазные правящие инструменты изготавливают на различных связках: на медной основе, твердосплавных, никелевых, а также металлических адгезионно-активных. При спекании последних в результате химического взаимодействия металлической связки с алмазными зернами образуется металлоалмазный адгезионный сплав (МААС), обеспечивающий надежное удержание зерен в алмазоносном слое с помощью химических связей и дополнительного механического закрепления.

Безалмазные правящие инструменты в современном машиностроении применяют значительно реже и в меньших объемах, чем алмазные. Основное их назначение — это правка кругов, проводящих грубое шлифование заготовок, предварительное затачивание относительно простых режущих инструментов, шлифование деталей в условиях индивидуального и мелкосерийного производства, когда применение алмазных инструментов неэкономично, а также для правки и профилирования шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов.

Безалмазные правящие инструменты используют для правки кругов методами шлифования, обкатывания и накатывания. В зависимости от конструктивного или технологического исполнения, это могут быть абразивные круги (обычно из карбида кремния), абразивные бруски, металлические диски (шаржированные свободным абразивом, гладкие и гофрированные) и стержни, накатные ролики (стальные и твердосплавные), порошки и щетки (см. рис. 8.1, 8.2).

## 8.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ СТМ ДЛЯ ПРАВКИ И ПРОФИЛИРОВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Наряду с инструментами, изготавливаемыми с помощью традиционных технологий (см. табл. 8.1, 8.2), в том числе с ручной укладкой зерен алмаза и спеканием в пресс-формах на твердосплавных связках с пропиткой медью, разработан ряд новых технологий прецизионного формообразования сложнопрофильного алмазно-абразивного правящего и шлифовального инструмента, конкурирующего по технико-экономическим показателям с лучшими зарубежными аналогами.

К традиционным технологиям относятся также методы электрогальваники, используемые, в основном, для закрепления зерен алмаза в рабочем слое однослойных инструментов, в том числе и профильных алмазных кругов. Электрогальваника включает в себя метод гальваностегии и метод гальванопластики. При прямом осаждении металла (гальваностегия) алмазные зерна закрепляются на поверхности будущего инструмента по периферии корпуса.

При осаждении металла и закреплении зерен алмаза на матрице, представляющей собой копиформу (гальванопластика), будущий профиль является зеркальным отображением, воспроизводимым на внутренней части графитового кольца, после удаления которого, образуется искомый рабочий профиль будущего инструмента.

Современные технологии изготовления правящих роликов обеспечивают получение размеров с точностью 10...15 мкм при использовании метода гальваностегии и 3...5 мкм — гальванопластики. При этом достигается максимальная стойкость инструмента за счет ориентации зерен алмаза в наиболее плотной кристаллографической плоскости  $\langle 111 \rangle$ .

Указанные показатели точности по сравнению с традиционными методами гальваностегии и гальванопластики, обеспечивающими точность 20...25 и 8...15 мкм соответственно, достигаются благодаря уменьшению флуктуаций в процессе формообразования профиля, которые возникают в технологических звеньях при выполнении отдельных операций; путем подбора частот вынужденных колебаний каждого звена для избежания арифметического сложения амплитуд всех колебаний и существенного снижения суммарной погрешности, а также оптимизацией условий процесса



электрогальваники и других факторов, в конечном итоге оказывающих влияние на точность изготовления инструмента [10].

Эти технологии относятся к разряду энерго- и ресурсосберегающих, так как для ведения процесса формообразования рабочего слоя инструмента требуется на два порядка меньше энергоресурсов по сравнению с методами вакуумного и обычного спекания инструмента в пресс-формах.

С использованием гальванопластики и гальваностегии изготавливают алмазные правящие ролики, бруски, гребенки самых различных форм и алмазные круги, в том числе сложнопрофильные. Ролики и круги, изготавливаемые гальваностегией, обладают более высокой режущей способностью по сравнению с гальванопластикой, однако последние обладают повышенной стойкостью и точностью, как упоминалось выше, за счет ориентации зерен.

При формообразовании алмазно-абразивного инструмента электрофизическими методами используется вращающийся графитовый электрод-ролик, профиль которого непрерывно обновляется с помощью прецизионного фасонного мастер-резца. Этим обеспечивается высокопроизводительное формирование рабочего профиля алмазных и других кругов из сверхтвердых материалов любой сложности с точностью 5...20 мкм по линейным и 5...10' по угловым размерам.

Стойкость профиля кругов между правками в зависимости от условий обработки шлифуемого материала может составлять десятки и тысячи изготавливаемых изделий.

В зависимости от условий работы кругов предусматривается два подхода к профилированию и правке кругов:

— по месту работы круга (контактно-эрозионный метод, при котором электроэрозия возникает в результате контакта вращающегося круга с электродом-инструментом, где требуемый профиль формируется за счет профиля электрода-инструмента или кинематики его движения);

— на специальном оборудовании (электроэрозионный метод, при котором электроэрозия между электродом-инструментом и профилируемым кругом, которые находятся в диэлектрической жидкости, обеспечивается импульсным генератором).

В табл. 8.4 приведен перечень стандартного оборудования, необходимого для изготовления прецизионного фасонного правящего инструмента и профильных шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов.

**8.4. Оборудование для изготовления прецизионного фасонного правящего инструмента и профильных шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов**

Оборудование	Тип, модель
Станок настольно-сверлильный	2М 112
Станок токарно-винторезный	16Б05Аф10, 1К62, 16Д20П
Станок плоскошлифовальный	3Е711АФ1
Станок круглошлифовальный	3У131ВМ, 3Б151
Станок оптико-профилешлифовальный	395МФ10
Станок внутришлифовальный	3А227В72
Гальваническая ванна для гальванопластики	—
Гальваническая ванна для гальваностегии	—
Измерительный прибор	ДИП-6
Инструментальный микроскоп	УИМ-21
Станок электроискровой прошивочный модернизированный	ЛК3-185
Компьютер	—
Графопостроитель	Hewlett Packard
Весы аналитические	АДВ-200

**8.2. МЕТОДЫ, УСЛОВИЯ И РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРАВЯЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ПРОФИЛЬНЫХ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

Технологические методы правки абразивных кругов правящими инструментами различных конструкций и типов делятся на механические и специальные (рис. 8.3). Механические методы правки кругов включают в себя точение и шлифование и могут проводить-



Рис. 8.3. Технологические методы правки абразивных кругов

ся с продольной, поперечной и тангенциальной подачами. К шлифованию относится и правка кругов с применением свободного абразива. Механические методы включают в себя также правку, основанную на поверхностном деформировании рабочей поверхности круга (накатывание или обкатывание), в результате с РПК удаляется затупленный и засаленный слой абразива.

**Правку методом точения** выполняют однокристалльными (резцы, иглы, алмазы в оправках, пластины) или многокристалльными (гребенки, карандаши, бруски) инструментами. Главное движение совершает шлифовальный круг, подвергаемый правке, а движение подачи — правящий инструмент либо круг (в зависимости от кинематических особенностей станка). Правка точением заключается в том, что правящий инструмент с относительно высокой скоростью проводит разрушение и удаление с РПК затупленных и металлизированных абразивных зерен, связки, а также металлической стружки и шлама, накопленных в порах и межзеренном пространстве круга.

Режимы правки методом точения алмазными резцами, карандашами, гребенками и алмазом в оправке при их работе в автоматиче-

ском и неавтоматическом цикле приведены в табл. 8.5. Как видно, увеличение подач при правке для всех рассмотренных видов шлифования повышает шероховатость обработанных поверхностей.

### 8.5. Режимы правки абразивных кругов алмазными резцами, карандашами, гребенками и алмазами в оправках

Вид шлифования	Параметр шероховатости обработанной поверхности <i>Ra</i> , мкм	Режим правки	
		Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв. ход
<i>Автоматический цикл</i>			
Круглое наружное врезное	0,8	0,20...0,30	0,02...0,03
	0,4	0,10...0,15	0,02...0,03
	0,2	0,05...0,08	0,01...0,02
Бесцентровое на проход	0,4	0,10...0,15	0,02...0,03
	0,2	0,08...0,10	0,02...0,03
	0,1	0,05...0,08	0,01...0,02
Бесцентровое врезное	0,4	0,07...0,15	0,02...0,03
	0,2	0,05...0,08	0,01...0,02
Внутреннее	0,8	2,00...3,00	0,02...0,03
	0,4	1,00...2,00	0,02...0,03
Плоское торцом круга	0,4	0,15...0,20	0,02...0,03
Резьбошлифование	0,8	0,08...0,15	0,01...0,02
	0,4	0,05...0,08	0,01...0,02
Шлицешлифование	0,8	0,50...0,70	0,02...0,03
	0,4	0,30...0,50	0,02...0,03
Профильное	0,8	0,20...0,30	0,02...0,03
	0,4	0,10...0,15	0,01...0,02
	0,2	0,08...0,10	0,01...0,02

Окончание табл. 8.5

Вид шлифования	Параметр шероховатости обработанной поверхности $R_a$ , мкм	Режим правки	
		Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв. ход
<i>Неавтоматический цикл</i>			
Круглое наружное на проход	0,8	0,30...0,40	0,010
	0,4	0,40...0,30	0,010
	0,2	0,10...0,20	0,010
	0,1	0,05...0,10	0,005
Круглое наружное врезное	0,8	0,15...0,25	0,010
	0,4	0,08...0,15	0,010
	0,2	0,05...0,08	0,005
Внутреннее	0,8	2,00...3,00	0,100
	0,4	1,00...2,00	0,005
Плоское	0,8	0,60...0,80	0,010
	0,4	0,40...0,60	0,010
	0,2	0,20...0,40	0,005

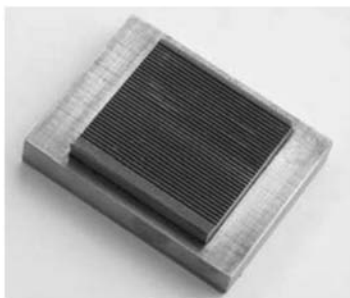
Примечание. При неавтоматическом цикле правки поперечная подача указана для тонкой правки, для грубой правки она составляет 0,02...0,03 мм/дв.ход.

Правка алмазными правящими брусками осуществляется обычно на плоскошлифовальных станках. Брусок с профилем, который соответствует профилю шлифуемой детали, закрепляется на столе станка или в специальном приспособлении. Шлифовальный круг при каждом продольном ходе стола и подаче на глубину входит в контакт с бруском, который за счет тангенциальной подачи постоянно восстанавливает рабочий профиль и режущие свойства абразивного инструмента. Такой метод правки, исключая потери времени на выполнение данной операции, способствует существенному повышению производительности обработки.

Более того, применение правящих брусков позволяет повысить производительность правки в 3–4 раза по сравнению с алмазными карандашами. При этом существенно повышается точность правки профиля, не хуже 1 мкм.

Разработаны правящие бруски фасонного профиля, изготовленные методом гальванопластики, предназначенные для применения, например, в мелкосерийном производстве деревообрабатывающих твердосплавных фрез (рис. 8.4, *а*). Эта ресурсосберегающая альтернатива алмазным роликам выглядит особенно перспективной для таких отраслей промышленности, как турбино-, двигателе- и авиастроение (рис. 8.4, *б*).

Экономичность использования брусков обусловлена значительно меньшей их стоимостью и отсутствием необходимости использования специальных дорогостоящих станков для глубинного шлифования. Технологические причины состоят в том, что, при обеспечении того же качества и производительности обработки, для операций правки правящими брусками можно применять плоско- и круглошлифовальные станки. Схема правки допускает значительные вариации и исключает сообщение дополнительного вращения инструменту, как в случае с алмазными роликами, и, как следствие, дополнительного биения инструмента, вызываемого как эксцентриситетом шпинделя, так и, пусть и достаточно точной (по классу точности G1 или ISO 1940/1), но неидеальной балансировкой правящего приспособления.

*а)**б)*

**Рис. 8.4. Алмазные фасонные правящие бруски:**

*а* — мелкого профиля; *б* — глубокого профиля для процессов шлифования замковых частей лопаток турбин «Z-образный профиль»

Для правки сегментных кругов разработаны алмазные бруски, оснащенные крупными кристаллами алмаза массой 0,05...0,10 карата. Рекомендуется следующий режим правки такими брусками: поперечная подача 0,04 мм/ход, продольная — 0,75 м/мин.

Отмеченные условия обработки обеспечивают получение шероховатости шлифованной детали  $Ra < 0,63$ , а точность обработки — 0,015...0,020 мм.

**Правка методом шлифования** заключается в том, что удаление с рабочей поверхности круга дефектного слоя проводится за счет срезания, дробления и скалывания затупленных абразивных зерен правящим инструментом, которому сообщается принудительное вращение с окружной скоростью, меньшей, чем окружная скорость круга, подвергаемого правке. Направления вращения правящего и абразивного инструмента могут совпадать или быть встречными. В первом случае ниже удельный расход алмазов, во втором — конечная шероховатость шлифованной поверхности изделия. В качестве правящего инструмента для правки методом шлифования используются алмазные ролики и круги из карбида кремния зернистостью 50...160, твердостью Т...ЧТ, диаметром 60...150 мм.

Теоретические исследования указывают на существование новой эффективной области режимов правки АР (попутное резание с отношением окружных скоростей заправляемого круга и ролика  $q = 0,6$ ), обеспечивающей существенное (до 60 %) снижение удельного расхода алмаза при повышении производительности обработки. В этом случае должно быть обеспечено принудительное вращение алмазного ролика со скоростью, большей, чем окружная скорость обрабатываемого круга.

В современном крупносерийном и массовом производстве особенно широко используют алмазные ролики, с помощью которых реализуют следующие кинематические способы правки шлифованием:

— правка кругов прямого профиля роликом, который также имеет прямой профиль — оси круга и ролика параллельны;

— продольная правка круга по копиру роликом прямого профиля — оси круга ролика расположены в разных плоскостях и перпендикулярны друг другу;

— профильная правка круга по копиру фасонным роликом — оси круга и ролика лежат в одной плоскости и могут быть параллельны или располагаться под углом (в зависимости от геометрической формы обрабатываемой детали);

- профильная правка круга методом врезания — оси круга и ролика лежат в одной плоскости и параллельны друг другу;
- профильная правка круга методом врезания — оси круга и ролика лежат в одной плоскости под углом друг к другу;
- профильная правка круга методом врезания — оси круга и ролика лежат в одной плоскости, параллельны друг другу, но расположены под углом к оси шлифуемой детали;
- профильная правка круга блоком роликов — оси круга и роликов лежат в одной плоскости и параллельны друг другу;
- профильная правка круга роликом с тангенциальной подачей по дуге окружности — оси круга и ролика лежат в одной мгновенной плоскости и параллельны друг другу;
- профильная правка круга роликом с тангенциальной подачей, направленной по касательной к периферии круга, — оси круга и ролика лежат в одной мгновенной плоскости и параллельны друг другу;
- профильная правка круга роликом с тангенциальной подачей — оси круга и ролика лежат в перпендикулярных плоскостях.

На рис. 8.5, а–в схематично представлены три основные кинематические схемы правки ролик–круг–деталь, применяемые на практике.

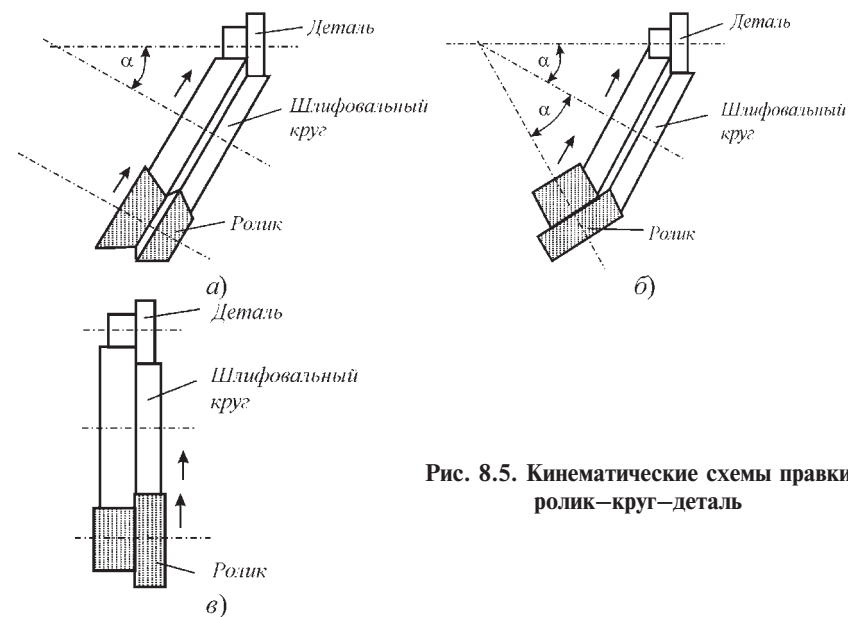


Рис. 8.5. Кинематические схемы правки ролик–круг–деталь



Как это видно из рисунка, форма ролика изменяется лишь для схемы на рис. 8.5, *а*, в то время как для двух остальных схем у него одна и та же форма, соответствующая форме обрабатываемой детали. При использовании схем, представленных на рис. 8.5, *а* и *б*, шлифовальный круг работает лучше на торцах детали, избегая при этом прижогов, которые появляются, если применяется схема на рис. 8.5, *в*. Угол  $\alpha$  для схемы на рис. 8.5, *а* может изменяться в определенных пределах и, как следствие, изменять форму ролика.

В случае, представленном на рис. 8.5, *б*, углы должны быть равны между собой; величина  $26^{\circ}34'$  встречается довольно часто, поскольку тангенс этого угла равен 0,5. Как это можно заметить, направление перемещения ролик—круг происходит всегда по вектору, перпендикулярному оси вращения круга.

**Правка методом обкатывания** представляет собой процесс дробления и скалывания абразивных зерен на РПК правящим инструментом, получающим вращение от контакта со шлифовальным кругом. В качестве правящих инструментов применяются круги из карбида кремния с характеристикой 54С80-ПВТ-ЧТ7К5, твердосплавные монолитные ролики, а также крупнозернистые ролики на металлической связке. Этим методом правка может проводиться, когда оси круга и правящего инструмента лежат в одной плоскости либо располагаются в пересекающихся плоскостях. Метод с применением безалмазных правящих инструментов используется для выполнения предварительной правки крупногабаритных недостаточно сбалансированных кругов, когда существует необходимость снимать с рабочей поверхности круга относительно большой слой абразивного материала.

**Правка методом накатывания** представляет собой процесс дробления абразивных зерен и связки при медленном вращении круга и правящего инструмента, в качестве которого применяются накатные стальные ролики. Этот метод используется только для правки профильных шлифовальных кругов. Накатывание выполняется при окружной скорости 0,5...1,5 м/с с поперечной подачей 0,01...0,05 мм/мин. Вращение сообщается кругу или ролику (в зависимости от конструкции шлифовального станка). Профилирование накатными роликами характеризуется высокой режущей способностью выправленного круга и простотой оснастки. Для изготовления накатных роликов применяются стали марок 45 и 40Х

(30...32 HRC), а также У8А, У10А, ХГ (60...64 HRC). Диаметр ролика  $d_p$  выбирается из соотношения  $d_p = (0,2...0,25)D$ , где  $D$  — диаметр шлифовального круга.

**Метод пластического деформирования** применяется для образования рабочего профиля на алмазных червячных и многониточных кругах, используемых для резьбо- и зубошлифования, и заключается в том, что профиль круга накатывается — деформируется накатным роликом, представляющим собой кольцевую рейку. Осуществление метода возможно в том случае, когда для алмазных кругов применяется высокопластичная связка, выдерживающая без разрушения осадку при сжатии до 40...60 %. Исследования показали, что метод пластического деформирования профиля алмазных кругов перспективен при обработке твердосплавных резьбообразующих и мелко модульных зубообрабатывающих инструментов.

Важную технологическую и экономическую задачу представляет собой установление минимального припуска, снимаемого с круга при правке, поскольку на правку расходуется от 40 до 80 % (а в некоторых случаях до 90...95 %) полезного объема шлифовального инструмента.

Стойкость правленых кругов зависит от величины снятого при правке слоя абразива. Зависимость эта не монотонна — с увеличением толщины снятого слоя до определенного предела стойкость кругов возрастает. Это свидетельствует о том, что происходит интенсивное восстановление режущих свойств инструмента. При дальнейшем возрастании толщины снятого слоя стойкость кругов не изменяется. Так, например, для восстановления режущих свойств электрокорундового круга зернистостью 40 достаточно снять слой толщиной 0,05...0,07 мм, а круга зернистостью 16 — 0,03...0,04 мм. Удаление слоя большей толщины приводит к неоправданным затратам времени и средств.

Стойкость профиля инструмента между правками в зависимости от условий обработки и шлифуемого материала может составлять десятки и тысячи изготавливаемых изделий.

Использование в процессе шлифования профильных инструментов из СТМ (алмазных кругов, правящих роликов, гребенок, брусков и др.) обеспечивает высокопроизводительное изготовление в массовом производстве наиболее трудоемких и точных деталей, например, замков лопаток турбин, шариковых винтовых пар,

шестерен, деталей подшипников, шаровых пальцев, плунжеров, клапанов, валов-роторов электродвигателей, распределительных и коленчатых валов и других трудоемких деталей машин.

Обработка сложнопрофильных поверхностей с прецизионной точностью осуществляется на стандартном шлифовальном оборудовании путем перемещения фасонного инструмента в радиальном направлении, что обеспечивает стабильность размеров и качество обработанных изделий. Шлифование деталей осуществляется одновременно по всему контуру, возможна одновременная обработка координатно-связанных между собой поверхностей при использовании блоков кругов, при этом производительность возрастает в 8–10 раз.

### **8.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ АЛМАЗНЫХ ПРАВЯЩИХ РОЛИКОВ**

Характеристики и способы изготовления правящих роликов существенно влияют на их работоспособность. Работоспособность роликов определяется многими факторами, к основным из которых относятся:

- износостойкость, характеризуемая относительным расходом СТМ к количеству сошлифованного материала, в миллиграммах на килограмм;
- режущая способность, характеризуемая количеством сошлифованного материала в единицу времени;
- кромкостойкость, характеризуемая количеством циклов правки, в течение которых сохраняется заданный рабочий профиль ролика;
- качество правки, влияющее на выходные параметры обработанной поверхности.

Для изготовления правящих роликов используют наиболее твердые связки, самая распространенная — никель-гальваническая. Алмазный порошок требуется особо прочный, с разрушающей нагрузкой на сжатие в пределах от 100 до 400 Н.

Зернистость находится в пределах 250/200...1000/800. Мелкие порошки предназначены для изготовления мелких профилей,

крупные — для пологих профилей без острых кромок. Естественно, чем крупнее порошок, тем выше стойкость ролика.

Для достижения высокой точности профиля в пределах 3...5 мкм требуется дополнительный рассев шлифпорошка алмаза с целью добиться наличия смежных фракций не более 5 % по верхнему и нижнему пределу.

После изготовления правящий ролик требует, как правило, окончательной доводки профиля с целью устранения выступания отдельных режущих зерен в рабочем профиле. После изготовления, кроме протокола замеров, к ролику прилагается репер (профильная пластина, на которой зафиксирован рабочий профиль ролика). На торцевых поверхностях базовых фланцев не допускаются надписи и маркировка, которые могут нарушить точность установки ролика на рабочей оправке.

Ролики на никель-гальванической основе — однослойные; предназначены для прецизионного профилирования абразивных кругов (в том числе и блок-кругов) на операции шлифования высокоточных деталей сложного профиля типа замков лопаток турбин, деталей подшипников, деталей с координатно-связанными между собой поверхностями и других сложных изделий. Ролики обеспечивают отклонение линейных размеров профиля  $\pm 5$ , и шероховатость обработанной поверхности  $Ra 0,02...0,80$  при высоком качестве поверхностного слоя деталей. Они могут быть изготовлены практически любых размеров по чертежам заказчика.

При изготовлении ролика методом гальваностегии на заранее подготовленный профиль наносится в электрогальванической ванне алмазный порошок в один слой с закреплением никелем. При изготовлении ролика методом гальванопластики на графитовую подложку, имеющую профиль, обратный требуемому, высаживается алмазный порошок и после этого графитовая основа удаляется.

Методом гальваностегии достигается точность формы 5...10 мкм. Гальванопластика позволяет получить точность профиля 3...5 мкм.

Стойкость роликов колеблется в зависимости от вида операции правки: 10...90 тыс. правок. Это позволяет применять ролики в крупносерийном и массовом производстве, несмотря на значительную себестоимость (от 100 до 1500 долл. США за один ролик).

## Глава 9

### ЗАТОЧКА ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СТМ

#### 9.1. ОСОБЕННОСТИ ЗАТОЧКИ ИНСТРУМЕНТОВ КРУГАМИ ИЗ СТМ

В сравнении с заточкой абразивными кругами, алмазная обработка режущих инструментов из минералокерамики, вольфрамосодержащих и безвольфрамовых твердых сплавов, инструментальных сталей обеспечивает увеличение производительности обработки в 1,3–3 раза, снижение расхода кругов в 1,5–3 раза, исключает брак обработки инструментов, повышая их стойкость в 1,5 раза и более [7].

Эффективность обработки инструментами из СТМ основана на использовании механического резания и электро-физико-химического, вибрационного и других видов направленного воздействия сверхтвердыми материалами (синтетическими алмазами или кубическим нитридом бора) на обрабатываемые инструментальные материалы.

Наибольшее распространение в инструментальном производстве получили технологические процессы обработки режущего инструмента, включающие в себя его заточку абразивными кругами из карбида кремния зеленого (КЗ) и электрокорунда белого (ЭБ) и доводку кругами из СТМ. Более прогрессивными и эффективными являются технологические процессы полной алмазной заточки и шлифования твердосплавного режущего инструмента и полной обработки кругами из cBN быстрорежущего инструмента без применения обычных абразивов. Применение алмазных, кубонитовых и эльборовых кругов позволяет в большинстве случаев совместить операции заточки и доводки для многих видов режущего инструмента в одной операции. При этом требуемое качество обработки достигается выбором соответствующих характеристик кругов из сверхтвердых материалов или выхаживанием при заточке. Доводка рабочих поверхностей инструмента выполняется при повышенных

требованиях к точности размеров и шероховатости обрабатываемых поверхностей, а также прецизионного инструмента.

Конструктивные элементы и геометрические параметры режущих частей инструмента, оснащенного пластинами из твердого сплава, необходимо изменять в соответствии с отраслевыми нормативами так, чтобы уменьшить или полностью исключить контакт алмазных кругов с державкой инструмента. Это позволяет повысить работоспособность алмазных кругов и увеличить экономическую эффективность алмазной обработки. Операции обработки стальной державки нового инструмента, а также по мере износа самого инструмента через каждые 3–4 переточки выполняются кругами из ЭБ или КЗ и фрезерованием. Алмазные круги на связках марок КМ1, М1-04, М1-01, М2-12 Э и других при алмазной и алмазно-электролитической обработке позволяют затачивать твердосплавный инструмент совместно с его стальной державкой, но и в этом случае эффективность работы алмазных кругов повышается с уменьшением поверхности обрабатываемой стальной державки.

Для уменьшения припусков, снимаемых при переточке как твердосплавного, так и быстрорежущего инструмента, необходимо обеспечить его нормальную эксплуатацию и нормативную переточку. Твердосплавные инструменты, поступающие на переточку, по степени износа и разрушения режущей части разделяются на две группы: с допустимым износом, небольшими выкрашиваниями и мелкими сколами режущей части и со значительным износом, большими выкрашиваниями и сколами режущей части. Инструменты первой группы перетачиваются только алмазными кругами, инструменты второй группы — алмазными кругами электролитическим или глубинным способами. Предварительная заточка инструмента кругами из КЗ снижает его режущие возможности и срок службы. То же относится и к инструменту из быстрорежущих и других инструментальных сталей при предварительной заточке его кругами из ЭБ.

Высокая эффективность обработки режущего инструмента кругами из СТМ достигается только тогда, когда круги используются в оптимальных условиях, т.е. в тех областях и при таких режимах обработки, которые соответствуют эксплуатационным свойствам шлифовального инструмента. При этом высокая эффективность применения кругов обеспечивается при условии правильного вы-

бора их по форме и размерам (ширине  $b$  и толщине  $S$  рабочего слоя), материалу связки, марке, зернистости и относительной концентрации сверхтвердого материала. Неправильный выбор характеристики круга может в 3–5 раз и более снизить эффективность использования сверхтвердых материалов.

Форма и размеры кругов выбираются в зависимости от конструкции, размеров и числа обрабатываемых инструментов, характера выполняемой операции и применяемого оборудования.

Исходя из технологических возможностей, наружный диаметр круга  $D$ , ширину  $b$  и толщину  $S$  рабочего слоя выбирают наибольшими, что позволяет повысить производительность и улучшить качество обработки, уменьшить расход СТМ, а также снизить его относительную стоимость в шлифовальном круге. При выполнении только некоторых операций (заточка передних поверхностей зубьев протяжек и круглых плашек, внутреннее шлифование и т.п.) применяются круги определенных размеров.

**Марки сверхтвердых материалов.** Основным показателем, определяющим возможность использования алмаза и сВN (кубонит, эльбор и др.) в той или иной области, является их прочность. Чем больше циклические ударные нагрузки, действующие на зерно при частоте вращения инструмента, и истирающее действие обрабатываемого материала и шлама, тем большей должна быть прочность сверхтвердого материала. Широкий диапазон свойств СТМ, в первую очередь по прочности, позволяет выбрать марку, наиболее полно отвечающую конкретным условиям обработки. При этом значительно повышаются их эксплуатационные свойства, увеличивается эффективность и расширяются области применения, включая использование при предварительной обработке инструмента, глубинном и врезном шлифовании и заточке, шлифовании больших поверхностей и съеме значительных припусков.

Выбор конкретной марки СТМ зависит от обрабатываемого материала; выполняемой операции его абразивной обработки; связок инструментов из СТМ.

**Зернистость СТМ в кругах.** Выбирается в соответствии с требуемым качеством обработки инструмента, необходимой производительностью обработки, а также из условия обеспечения наименьшего расхода алмаза и сВN. С уменьшением зернистости СТМ снижается шероховатость поверхности, уменьшается радиус округ-

ления режущей кромки и ее зазубренность, но при этом снижаются производительность обработки и износостойкость кругов. При электролитическом шлифовании уменьшение зернистости до 100/80 повышает производительность обработки.

При выборе кругов по зернистости следует также учитывать, что металлизация абразивного СТМ практически не влияет на шероховатость обработанной поверхности.

**Относительная концентрация СТМ.** Определяет режущие свойства и износостойкость, продолжительность работы между правками и производительность, а также стоимость и качество обработки инструмента. Зависит относительная концентрация СТМ от характера выполняемой операции; зернистости и марки сверхтвердого материала; материала связки; способа и схемы шлифования; обрабатываемого материала; площади контакта круга с изделием. В табл. 9.1 приведены рекомендации по выбору зернистости и относительной концентрации СТМ.

Для шлифования и заточки инструмента в большинстве случаев используют круги из алмаза и сBN на органической, металлической и керамической связках с относительной концентрацией 100. При ручной заточке инструмента, шлифовании резьбы односторонними кругами на связке марки М2-01, шлифовании стружколомающих элементов и вышлифовке стружечных канавок мелкоразмерного цельного и напайного инструментов, профильном и глубинном шлифовании применяются в основном круги из СТМ с относительной концентрацией 150. Это снижает расход СТМ и существенно увеличивает режущую способность и время работы круга между правками.

Многониточные круги из алмаза и сBN на металлической связке изготавливаются с относительной концентрацией 75. Резьбошлифовальные круги из эльбора на керамической связке, как одно-, так и многониточные, изготавливаются с относительной концентрацией 100.

**Связка.** Состав связки кругов из алмаза и сBN выбирается в зависимости от обрабатываемого твердосплавного материала и выполняемой операции, от вида, метода и схемы шлифования, наличия или отсутствия СОТС. Каждой марке сверхтвердого абразивного материала должны соответствовать определенные компоненты связки, при которых свойства сверхтвердых материалов проявляются наибо-



## 9.1. Рекомендации по выбору зернистости и относительной концентрации СТМ

Разработчик	Характеристика СТМ	Обрабатываемый материал				Быстрорежущая сталь	
		Твердый сплав с охлаждением	Керамика с охлаждением	Безвольфрамовый твердый сплав с охлаждением	Без охлаждения	С охлаждением	
ИСМ (Украина)	Зернистость	80/63...160/125	63/50...100/80	80/63...125/100	63/50...100/80	80/63...160/125	
	Относительная концентрация	100	75...100	100...125	100	100	
Agathon* (Швейцария)	Зернистость	76...151	64...126	76...126	—	76...151	
	Относительная концентрация	75...100	75	75...100	—	75	
Winter* (Германия)	Зернистость	76...151	—	—	64...91	76...151	
	Относительная концентрация	75	—	—	50	75	

\* Зернистость кругов фирм Agathon и Winter указана по стандарту FERA. Для алмазных порошков перед зернистостью ставится значек D, для порошков нитрида бора — В.

лее полно. Связка является важнейшей характеристикой шлифовального инструмента. От качества связки зависит коэффициент использования потенциальных возможностей сверхтвердого материала, работоспособность шлифовального инструмента, производительность, экономическая эффективность и качество шлифования. При этом необходимо обеспечить оптимальное сочетание морфологических и физико-механических свойств алмаза с основными видами связок кругов, применяемых для шлифования и заточки твердосплавного инструмента.

Высококачественную и производительную обработку инструмента при минимальной ее стоимости можно обеспечить только при выборе кругов, имеющих оптимальные характеристики, наиболее выгодное соотношение параметров режимов заточки. Последние выбирают в зависимости от выполняемой операции, вида и способа шлифования и заточки, характеристики шлифовального круга, обрабатываемого материала и требований, предъявляемых к качеству обработки.

Режимы алмазной и алмазно-электролитической обработки твердосплавного инструмента, а также кубонитовой и эльборовской обработки инструмента из быстрорежущих и других инструментальных сталей должны быть экономичными — обеспечивать наименьшую стоимость при высоком качестве шлифования и заточки инструмента.

В табл. 9.2 приведены рекомендуемые характеристики алмазных кругов и режимы заточки твердосплавного инструмента, в табл. 9.3 — то же, для кругов из кубонита для обработки стального инструмента.

Правильно выбранные составы и рациональные способы использования СОТС по сравнению с обработкой без охлаждения значительно снижают силы резания и трения, выделение теплоты и температуру в зоне контакта. Тем самым уменьшается износ, затупление и засаливание кругов из сверхтвердых материалов, повышается их работоспособность, существенно увеличивается производительность, улучшаются качество и стойкость затачиваемого инструмента, а также санитарно-гигиенические условия труда рабочих.

На рис. 9.1–9.6 приведены схемы заточки рабочих поверхностей основных видов режущих инструментов.

## 9.2. Характеристики алмазных кругов и режимы заточки твердосплавного инструмента

Вид обработки	Характеристика круга					Режим заточки		
	Марка алмаза	Зернистость	Связка	Относительная концентрация	Скорость резания, м/с	Поперечная подача, мм/дв.ход	Продольная подача, м/мин	
Заточка твердосплавной части при жестком креплении инструмента	АС6; АС6М	80/63... 160/125	В1-11П; В2-01-1	100	15...20	0,05...0,06	2,0...3,0	
					15...20			
Заточка твердосплавной части с касанием по стальной державке при: жестком креплении инструмента;	АС6; АС6М	100/80... 125/100	М1-04; М1-05	100	15...20	0,05...0,08	2,0...3,0	
					15...20			
ручной заточке		80/63... 125/100	МС6	150	25...30	Ручная		
Заточка твердосплавной части вместе со стальной державкой при жестком креплении инструмента	АС6	125/100... 250/200	КМ1; М1-04	100	25...	0,03...0,05	1,5...2,0	
					40			

Окончание табл. 9.2

Вид обработки	Характеристика круга				Режим заточки		
	Марка алмаза	Зернистость	Связка	Относительная концентрация	Скорость резания, м/с	Поперечная подача, мм/дв.ход	Продольная подача, м/мин
Шлифование стружколомающих канавок при жестком креплении инструмента:	АС6; АС6М	100/80... 125/100	M1-04; МС6	100; 150	15...20	*	0,2...0,1
		100/80... 125/100			15...20		
с вертикальной подачей круга	АС6; АС6М	100/80... 125/100	M1-04	100, 150	15...20	*	0,2...0,3
Глубинная заточка твердосплавной части с касанием по стальной державке при жестком креплении инструмента	АС6; АС6М	63/50... 80/63	МС6	150	15...20	Вертикальная подача 2 мм/мин	

\*  $t = 0,5...1,0$  мм.

### 9.3. Характеристики кругов из кубонита и режимы заточки инструмента из быстрорежущих и других инструментальных сталей

Характеристика круга			Режим заточки					
Связка	Марка кубонита	Зернистость кубонита	Относительная концентрация	Скорость круга, м/с	Поперечная подача, мм/дв.ход	Глубина шлифования, мм	Продольная подача, м/мин	Скорость изделия, м/мин
<i>Доводка без охлаждения</i>								
B2-01, B2-01-1	KP	63/50...100/80	100, 150	20...25	0,01	—	1	—
<i>Заточка без охлаждения (припуск до 0,3 мм)</i>								
B2-01, B1-1П	KP	80/63...125/100	100	20...25	0,02...0,06	—	1,0...2,0	—
		125/100...160/125		15...25				
<i>Заточка с охлаждением (припуск до 0,3 мм)</i>								
B2-01-1	KP, KPM	80/63...125/100	100, 150	20...25	0,03...0,05	—	—	—
<i>Заточка с охлаждением (припуск до 0,5 мм)</i>								
M1-04	KP, KPM	80/63...125/100	100, 150	25...35	0,04...0,06	—	2,0...3,0	—

Окончание табл. 9.3

Характеристика круга				Режим заточки				
Связка	Марка кубонита	Зернистость кубонита	Относительная концентрация	Скорость круга, м/с	Поперечная подача, мм/дв.ход	Глубина шлифования, мм	Продольная подача, м/мин	Скорость изделия, м/мин
<i>Глубинная заточка с охлаждением (припуск до 0,7 мм)</i>								
M1-04	КР, КРМ	80/63...125/100	100, 150	25...35	0,3...0,5	—	0,5...0,7	—
<i>Шлифование резцы чистовое</i>								
M2-01	КР, КРМ	63/50...100/80	150	40...45	—	0,10...0,20	—	0,8...1,0
<i>Шлифование резцы по целому (s ≤ 1,5 мм)</i>								
		50/40...63/50	150	40...45	—	≤ 0,75	—	0,2...0,4
<i>Кругое наружное шлифование и затылование метчиков</i>								
M1-04	КР, КРМ	50/40...125/100	100	25...35	—	0,05...0,15	—	25,0...30,0
<i>Профильное шлифование стружечных канавок</i>								
M2-01	КР, КРМ	80/63...125/100	100, 150	25...35	0,2...0,8	—	0,5...0,7	—



Рис. 9.1. Обработка радиуса при вершине расточного реза

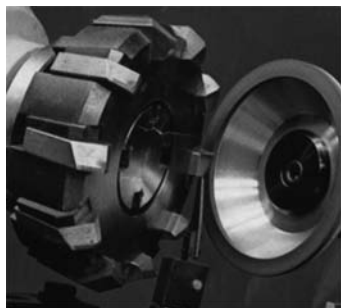


Рис. 9.2. Заточка ножа фрезерной головки по вспомогательной задней поверхности



Рис. 9.3. Заточка концевой фрезы по задней поверхности



Рис. 9.4. Заточка дисковой фрезы по боковой поверхности

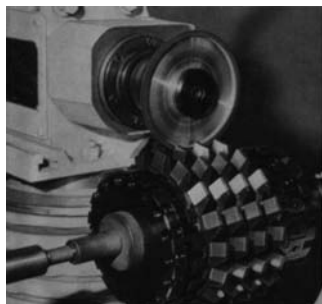


Рис. 9.5. Заточка червячной фрезы по передней поверхности



Рис. 9.6. Заточка проходного твердосплавного реза по задней поверхности

## 9.2. СПОСОБЫ ЗАТОЧКИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Режущие свойства инструментов из СТМ определяют абразивное зерно, причем физико-механические свойства, геометрические параметры, форма и условия взаимодействия зерна с обрабатываемыми материалами оказывают доминирующее влияние на процесс шлифования, определяя производительность, качество обработки и износостойкость абразивного инструмента.

Теоретический анализ физико-механических свойств синтетического (АС2, АС4, АС6) и природного (А) алмаза и непосредственное изучение закономерностей их работы и износа позволили установить особенности взаимодействия этих абразивных материалов с твердым сплавом, сталью и твердым сплавом совместно со сталью. Доминирующим видом разрушения при алмазной обработке твердого сплава и сталей является срез.

Величина предельной толщины слоя металла, снимаемого отдельным зерном, в большой мере зависит от марки алмазного зерна. Увеличение прочности алмаза способствует повышению допустимой величины среза, при которой зерно максимально используется. Основным видом износа алмазов марок АС2 и АС4 является интенсивное поверхностное микровыкрашивание с образованием большого количества режущих субмикрокромки, в то время как порошки алмаза марки АС6 имеют достаточно высокую размерную стойкость и их износ характеризуется образованием на контактных поверхностях кристаллов соответствующих площадок. Такой механизм разрушения и износа частиц алмаза различных марок в сочетании с наивысшей твердостью и жесткостью и рациональными геометрическими параметрами режущих кромок предопределяет характер воздействия их на обрабатываемые материалы и обуславливает протекание процесса деформации и стружкообразования в целом.

При шлифовании твердых сплавов образуется мелкодисперсная стружка скола, а при шлифовании стали появляются стружки, характерные для работы лезвийного инструмента. При обработке сталей в результате адгезионных явлений может иметь место образование налипков и наростов на контактных поверхностях алмазных зерен, возникновение которых в большой мере определяется влиянием температурно-силового фактора, а также действием СОТС. При резании алмазным зерном как твердых сплавов, так и сталей, часть работы резания затрачивается на пластическое деформирова-



ние материала. Объем выдавленного металла зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, марки алмаза и режимов резания. Все это требует создания определенной структуры и соответствующей твердости рабочего слоя шлифовальных кругов из СТМ при обработке инструментальных материалов.

Важную роль играет и связка шлифовального инструмента, т.е. непосредственно абразивсодержащий композит, составом которого можно регулировать обрабатываемость материалов. С точки зрения обрабатываемости инструментальных материалов связка шлифовального инструмента должна обладать сочетанием важных свойств: высокой режущей способностью, безадгезионным взаимодействием с обрабатываемым материалом, хорошими антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью и низким коэффициентом трения. Этим требованиям отвечают связки, износостойкость которых обеспечивается наличием сравнительно прочных адгезионных связей к сверхтвердым материалам, что дает возможность достижения оптимального соотношения и регулирования структуры и твердости рабочей поверхности шлифовальных кругов в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемых материалов. Разработана гамма полимерных (марки В1-13, В1-11П, В2-01-1, В2-01-2, В3-01-1, М02), металлических (М1-04, МХ3, МХ5) и керамических (КМ1, СК-6) абразивсодержащих композитов, отвечающих условиям обработки инструментальных материалов.

Глубинное шлифование является одним из самых высокопроизводительных и универсальных способов обработки инструментальных материалов, особенно в связи с использованием абразивных инструментов из порошков синтетического алмаза и кубического нитрида бора. Его реализация связана с необходимостью создания шлифовальных кругов с определенными геометрическими параметрами, которые обуславливают эффективность процесса шлифования:

Производительность шлифования

$S_{\text{поп}} S_{\text{пр}}$ , мм/дв.ход×м/мин . . . . . 0,50...1,00

Удельный расход сверхтвердых

материалов, мг/см<sup>3</sup> . . . . . 10,0...15,0

Коэффициент снижения энергоемкости

шлифования  $K_{\text{э}}$  . . . . . 1,25...1,40

Коэффициент стойкости обрабатываемого

инструмента  $K_{\text{ст}}$  . . . . . 1,30...3,00

Параметр шероховатости обработанной поверхности

$Ra$ , мкм . . . . . 0,15...0,20

Глубинное электроимпульсное шлифование инструментальных материалов, в том числе безвольфрамовых твердых сплавов и инструментальных сталей, осуществляется кругами из СТМ на токопроводных металлических и металлополимерных связках. Способ обеспечивает производительность обработки до  $4000 \text{ мм}^3/\text{мин}$ , улучшение качества обработанной поверхности при сравнительно низком относительном расходе СТМ. Для достижения данных показателей применяют оптимальные режимы шлифования и характеристики кругов из СТМ:

Производительность шлифования, $\text{мм}^3/\text{мин}$ . . . . .	2000...4000
Относительный расход СТМ, мг/г . . . . .	1,0...2,0
Коэффициент стойкости обрабатываемого инструмента $K_{ст}$ . . . . .	1,3...2,2
Параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra$ , мкм . . . . .	0,32...0,64

Высокопроизводительная заточка инструмента из быстрорежущих сталей без охлаждения осуществляется при обработке по задним, передним и торцовым поверхностям, радиусам и упрочняющим фаскам кругами форм 12A2-45°, 12A2-20°, 12R4, 1A1, 11V9-70° и др. из кубического нитрида бора (эльбора, кубонита) на керамических (К17, КМ1) и полимерных (В2-01-1, В1-11П, В1-13) связках. Производительность шлифования быстрорежущих сталей, например легированных ванадием, кобальтом, молибденом, без применения смазочно-охлаждающей технологической среды составляет  $500...750 \text{ мм}^3/\text{мин}$ , относительный расход cBN —  $1...4 \text{ мг/г}$ , при этом структурных изменений в материале не происходит. По сравнению с обработкой кругами из электрокорунда данная технология за счет более качественного образования режущих элементов обрабатываемого инструмента позволяет повысить его коэффициент стойкости в 1,3–2,2 раза.

При алмазной обработке инструментальной керамики используют алмазные круги формы 6A2 диаметром 250, 350 и 500 мм на полимерных связках. Шлифуются боковые и опорные поверхности режущих сменных многогранных пластин из керамики оксидного и оксидно-карбидного типа. При двухстороннем алмазном шлифовании пластин из керамики достигается непараллельность плоскостей  $0,01...0,02 \text{ мм}$ ; шероховатость обработанной поверхности пластин  $Ra$   $0,16...0,32$ , при обработке пластин из твердого сплава

$Ra$  0,04...0,17; производительность двустороннего шлифования — 5000...8000 мм<sup>3</sup>/мин.

Формообразование зубьев твердосплавных борфрез реализуется в условиях глубинного алмазно-электрохимического шлифования с применением алмазных угловых кругов IVI формы диаметром 80...200 мм на металлической связке. Обработка зубьев осуществляется по целому за один проход. Количество обработанных борфрез между правками шлифовального круга составляет 25 шт., а относительный расход алмазов — 0,5...1,5 мг/г.

Заточка мелкогабаритного твердосплавного концевой инструмента (сверл, концевых фрез) диаметром 0,75...2 мм производится кругами формы 12A2-45° диаметром 80...150 мм на специальной полимерной связке марки В2-01-1. Достигается шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$  0,1...0,2. Одним кругом до его полного износа можно заточить не менее 800...1500 шт. сверл.

Технология шлифования инструментов крупногабаритными алмазными кругами формы 1A1 диаметром 400, 500 и 600 мм на полимерной связке марки В1-11П обеспечивает снижение на 20 % себестоимости шлифования и увеличение стойкости обрабатываемого инструмента. Кроме того, шлифовальные круги формы 1A1 диаметром 500...600 мм на полимерных связках применяются для шлифования деталей типа «вал» с износостойкими покрытиями. Производительность обработки возрастает в 4–5 раз. Шероховатость обработанной поверхности после предварительного шлифования  $Ra$  0,25, а после чистовой обработки — 0,10 мкм.

В технологиях инструментального производства применяются также следующие шлифовальные инструменты из сверхтвердых материалов:

- шлифовальные круги для обработки поликристаллических сверхтвердых материалов;
- инструменты-катоды из поликристаллических сверхтвердых материалов для электролитической обработки волок, фильер и др. инструментов;
- многопрофильные резьбо- и зубошлифовальные круги;
- эластичные зубчатые хоны;
- однослойные инструменты, в том числе со специальным износостойким покрытием;

- шлифовальные круги для обработки нержавеющей стали инструментального назначения;
- шлифовальные круги для обработки горно-бурового инструмента;
- шлифовальные круги из алмазосодержащего проката.

### 9.3. ТЕХНОЛОГИИ ЗАТОЧКИ ИНСТРУМЕНТОВ КРУГАМИ ИЗ СТМ

Шлифовальные круги из СТМ на металлических, керамических, органических и других связках применяют для выполнения технологических операций шлифования и заточки инструментов, перечень которых представлен в табл. 9.4. Рассматривается обработка следующих инструментов: резцов, в том числе фасонных, плоских ножей, штампов, протяжек, сверл, фрез, сменных многогранных пластин и других инструментов.

#### 9.4. Применение шлифовальных кругов из СТМ

Форма шлифовальных кругов из СТМ	Технологические операции шлифования и заточки инструментов
<i>Круги на металлических связках</i>	
A8	Вышлифовка зубьев мелкоразмерного инструмента
1EE1	Заточка дереворежущих ножовок
1V1	Шлифование стружколомающих элементов режущих сменных многогранных пластин из твердых сплавов Вышлифовка стружечных канавок зубьев борфрез из твердых сплавов и быстрорежущих сталей
6A2	Алмазная электрохимическая заточка твердосплавных резцов Упругое и врезное шлифование многогранных пластин из твердых сплавов и режущей керамики Глубинное шлифование многогранных пластин по опорным поверхностям

Продолжение табл. 9.4

Форма шлифовальных кругов из СТМ	Технологические операции шлифования и заточки инструментов
6A2	Шлифование боковых поверхностей граней и радиусов многогранных пластин Шлифование (заточка) бумагорезательных ножей
12A2B-25	Шлифование фасок на многогранных пластинах из твердых сплавов
12A2-45°	Заточка твердосплавной части инструмента, в том числе совместно со стальной державкой Глубинное электрохимическое шлифование инструментальных материалов
12A2-45°	Глубинное шлифование инструментальных материалов
12A2B-45°	Электрошлифование инструментальных материалов Шлифование фасок на многогранных пластинах из твердых сплавов
12D9-SS/C1	Электрохимическая заточка червячных фрез по передней поверхности
12D9	
12V5	Заточка отрезных резцов из твердых сплавов
<i>Круги на органических связках</i>	
1A1	Шлифование деталей, крупногабаритных штампов и пресс-форм Шлифование деталей и инструментов Заточка режущей части мелкогабаритных сверл Обработка деталей и инструментов малой жесткости
1EE1	Профильное шлифование твердосплавного инструмента

Продолжение табл. 9.4

Форма шлифовальных кругов из СТМ	Технологические операции шлифования и заточки инструментов
1FF1V	Заточка ножей из инструментальных сталей
1V1	Профильное глубинное шлифование инструментов и деталей из инструментальных сталей
4A9	Глубинное шлифование стружколомающих элементов мелкоразмерного инструмента
4Q5	Шлифование режущих инструментов из быстрорежущих сталей
6A2	<p>Заточка режущей части мелкоразмерного инструмента</p> <p>Заточка режущей части мелкоразмерных твердосплавных сверл</p> <p>Шлифование боковых граней многогранных пластин из твердых сплавов и режущей керамики</p> <p>Шлифование инструментальных материалов, в том числе электрохимическое и электроимпульсное</p> <p>Плоское глубинное шлифование инструментальных материалов</p> <p>Глубинное шлифование, в том числе электрохимическое, многогранных пластин из твердых сплавов</p> <p>Плоское торцовое шлифование РСМП из твердых сплавов по опорным поверхностям</p> <p>Шлифование граней и радиусов многогранных пластин из твердых сплавов и режущей керамики</p> <p>Шлифование многогранных неперетачиваемых пластин по боковым поверхностям</p> <p>Шлифование опорных поверхностей пластин из твердых сплавов и режущей керамики</p> <p>Двустороннее шлифование опорных поверхностей многогранных пластин</p> <p>Двустороннее шлифование многогранных пластин из твердых сплавов и режущей керамики</p>
11V9-70°	Заточка многолезвийного инструмента

Продолжение табл. 9.4

Форма шлифовальных кругов из СТМ	Технологические операции шлифования и заточки инструментов
12A2-20°	Заточка режущего инструмента из твердых сплавов
	Заточка дереворежущих дисковых пил из твердых сплавов
12A2-45°	Заточка инструмента из твердых сплавов и инструментальных сталей Шлифование и заточка инструмента из твердых сплавов и инструментальных сталей
383331	Глубинное шлифование инструментальных материалов Шлифование инструментальных материалов с охлаждением Шлифование и заточка твердосплавного инструмента с охлаждением
12B9, 12M2-45°	Заточка дереворежущих дисковых пил из твердых сплавов
12R4	Заточка передней поверхности многолезвийного инструмента из быстрорежущих сталей
12V9-45°	Обработка крупногабаритных фрез
14A1	Обработка крупногабаритных штампов
<i>Круги на керамических связках</i>	
1A1	Круглое наружное шлифование режущего инструмента
12A2-45°	Заточка ножей из твердых сплавов и инструментальной стали
1V1	Заточка режущего инструмента из инструментальной стали Шлифование протяжек с елочным профилем Вышлифовка стружечных канавок зубьев борфрез из твердых сплавов и быстрорежущих сталей

Окончание табл. 9.4

Форма шлифовальных кругов из СТМ	Технологические операции шлифования и заточки инструментов
6А2	Шлифование боковых граней многогранных пластин из твердых сплавов и режущей керамики Шлифование инструментальных материалов, в том числе электрохимическое и электроимпульсное Плоское глубинное шлифование инструментальных материалов Глубинное шлифование, в том числе электрохимическое, многогранных пластин из твердых сплавов Плоское торцовое шлифование РСМП из твердых сплавов по опорным поверхностям Шлифование граней и радиусов многогранных пластин из твердых сплавов и режущей керамики

В приведенных далее таблицах представлены типовые технологические процессы заточки шлифовальными кругами из СТМ основных видов режущих инструментов, применяемых в промышленности: отрезных твердосплавных резцов общего назначения на специальном станке-автомате мод. М3-54 (табл. 9.5); дисковых дереворежущих пил с пластинами из твердого сплава с использованием заточных станков фирмы Wolmer (Германия) (табл. 9.6); фасонных твердосплавных резцов, применяемых при производстве подшипников, с использованием универсально-заточных станков (табл. 9.7); дереворежущих ножовочных полотен из инструментальных сталей на специальной автоматизированной линии (разработчик — Нижегородский металлургический завод, Россия) или на специализированном станке-автомате (табл. 9.8). В табл. 9.9 представлены типовые технологические процессы алмазной заточки твердосплавного металлорежущего инструмента. В табл. 9.10 приведены показатели конкурентоспособности инструментов из СТМ при заточке основной номенклатуры режущих инструментов.

Применение шлифовальных кругов из СТМ в технологиях шлифования и заточки режущих инструментов обеспечивает ускорение



9.5. Технологический процесс автоматизированной алмазной заточки отрезных твердосплавных резцов общего назначения на станке-автомате мод. МЗ-54

Операция заточки	Форма, размеры и характеристика алмазного шлифовального круга	Режимы заточки			Состав СОТС
		Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	
Заточка: вспомогательной правой поверхности вспомогательной левой поверхности главной задней поверхности передней поверхности	12A2-45° 150×10×3×32 АС4 100/80—160/125 100 В1-11П-58,0	15...20		0,1...0,5	«Аквол-10» или Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0,5...1 %, H <sub>2</sub> O (остальное)
	12A2-45° 150×5×3×32 АСМ 40/28 100 В1-11П-30,0	0,2...0,3			
	9A3 150×0,1×32×20×0,05 АС4 50/40	25...30		0,05...0,1	
	9A3 150×0,1×32×20×0,05 АС4 50/40				
Обработка: фаски на передней поверхности правого радиуса округления левого радиуса округления					Без СОТС

### 9.6. Технологический процесс полной алмазной заточки дисковых дереворежущих пил с пластинами из твердого сплава

Операция заточки	Модель заточного станка	Форма, размеры и характеристика шлифовального круга	Режимы заточки				Состав СОТС	Примечание
			Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/лв.ход			
Шлифование по наружному диаметру	ЗВ642; ЗМ642Е; З672	12А2-45° 150×10×3×32- АС6-125/100-200/160 100 КМ1-58,0	20...25	1,5...2,0		0,03...0,05	Na <sub>3</sub> PO <sub>3</sub> (0,6 %) + + касторовое масло (0,5 %) + + H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (0,2 %) + + NaNO <sub>3</sub> (0,25 %) + + H <sub>2</sub> O (остальное)	Скорость из- делия (пилы) 20...30 м/мин  Напряжение технологиче- ского тока — 6...8 В
		12А2-45° 150×10(3+4+3) ×3×32 АС6 200/160, 63/50, 200/160 100 КМ1-58,0	25...30	1,0...2,0				
Заточка боковых поверхностей	ЗД740  ЗМ642Е; ЗВ642	1А1 400×2,5×6×203 АС6 125/100-200/160 100 КМ1-815,0	20...25	0,2...0,3	0,1...0,3		Скорость из- делия (пилы) 20...30 м/мин	
		12М2-45° 125×5(2,5×2,5)×6×32 АС4 160/125, 63/50 100 В1-11П-46,6	25	0,2...0,3	0,1...0,3			
Заточка по передней поверхности	Фирма Wolmer	ТУ2-037-421-83; 12А2-20° 125×6(3+3)×1,5×32 АС4 160/125, 63/50 100 В1-11П-14,8			0,1...0,3		—	
		12М2-45° 125×5(2,5+2,5)×6×32 АС4 160/125, 63/50 100 В1-11П-46,6		0,2...0,3	0,3...0,5			
Заточка по задней поверхности								

9.7. Технологический процесс полной алмазной заточки фасонных твердосплавных резцов, применяемых при производстве подшипников

Операция заточки	Модель станка	Форма, размеры и характеристика шлифовального круга	Режимы заточки			Состав СОТС
			Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	
Шлифование передней поверхности	3Г71М; 3Б722	АС6(АС4)125/100-250/200-М1-О4, КМ1, 100 В1-11П-675,0	3035	2...3	0,05...0,10	«Аквол-10» или Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0,5...1 %, H <sub>2</sub> O (остальное)
Заточка фасонной профильной поверхности	395М; 395	14ЕЕ1Х 150×10×6×136° АС4 160/125 (63/50) 100 В1-11П-117,0 1А1 150×6×5×32 АС4 160/125(63/50) 100 В1-11П-60,0 14ЕЕ1Х 125×3×4×32 АС4 160/125(63/50) 100 В1-11П-19,6	20...25		0,05...0,10	
Заточка радиусной профильной поверхности	395М; 3М642Е	1А1 150×6×5×32 АС4 160/125(63/50) 100 В1-11П-61,0	20...25		0,10...0,20	Без СОТС
Заточка передней поверхности	3В642; 3Б22Э; 3М642Е	12А2-45° 150×5(10)×3×32 АС4 80/63-100/80 100 В1-11П-30,0(58,0) 12А2-45° 150×10(5+)×3×32 АС4 160/125, 63/50 100 В1-11П-58,0	25...30	1,0...1,5 (ручная)	0,03...0,05 (ручная)	

Окончание табл. 9.7

Операция заточки	Модель станка	Форма, размеры и характеристика шлифовального круга	Режимы заточки			Состав СОТС
			Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	
Заточка главной задней поверхности	3В642; 3М642Е; 3Е624ЭР	12А2-45° 150(200)×20×3×32 АС6 80/63-100/80 100 М1-04-108,0	25...30	1,5...2,0	0,05...0,10	Электролит $\text{KNO}_3$ (5 %)+ $+\text{NaPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (3 %)+ $+\text{NaNO}_2$ (0,5%)+ $+\text{H}_2\text{O}$ (остальное)
		12А2-45° 150×20 (5+10+5)×3×32 АС6 200/160, 125/100, 63/50 100 КМ1-108,0 (58,0)	20...25			
Заточка вспомогательной задней поверхности	3В642; 3М642Е	12У5 150×11×5×32 АС6 160/125-250/200 100 КМ1-98,0	15...20	1,0...1,5 (ручная)	0,20...0,30 (ручная)	«Аквол-10» или $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (0,5...1 %) + $+\text{H}_2\text{O}$ (остальное)
		12А2-45° 125×3×3×32 АС4 80/63-100/80 100 В1-11П-15,2	25...30	1,0...1,5 (ручная)	0,03...0,05 (ручная)	
Заточка стружкололомающих элементов	3В642; 3М642Е	12А2-45° 150×10(20)×3×32 АС4 80/63-125/100 100 В1-11П-58,0 12А2-45° 150×10(5+5)×3×32 АС4 160/125, 63/50 100 В1-11П-58,0	20...25	1,0...2,0 (ручная)	0,05...0,10 (ручная)	«Аквол-10» или $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 0,5...1 %, $\text{H}_2\text{O}$ (остальное)

### 9.8. Технологический процесс автоматизированной алмазной заточки дереворежущих ножовочных полотен из инструментальных сталей по передней поверхности

Модель заточного станка	Форма, размеры и характеристика алмазного шлифовального круга	Режимы заточки			Состав СОТС
		Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	
Специализированная автоматическая линия (ГОПМЗ)	По Ту 88 ИСМ 625–83: 14ЕЕ1 250×8×6×50×76- АС6 200/160-150 М2-01-234,0	80	0,25	0,5	NaNO <sub>3</sub> (8 %)+ +NaNO <sub>2</sub> (1 %)+ +H <sub>2</sub> O (осталь- ное)
Специализированный станок-полуавтомат (ИСМ)					

### 9.9. Типовые технологические процессы алмазной заточки твердосплавного металлорежущего инструмента

Инструмент	Операция	Модель станка	Форма, размеры и характеристика шлифовального круга	Режимы заточки			Состав СОТС
				Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	
Резцы общего и специального назначения	Заточка задней поверхности	ЗЕ624ЭР	12А2-45° 200(150)×20(10)×3 АС6 100/80–160/125 100 М1-04	25...30	1,5...2,0 (ручная)	0,06...0,10 (ручная)	«Аквол-10» или Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1...3 %)+ +H <sub>2</sub> O (ос- тальное)

Продолжение табл. 9.9

Инструмент	Операция	Модель станка	Форма, размеры и характеристика шлифовального круга	Режимы заточки				Состав СОТС				
				Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход						
Резцы общего и специального назначения	Заточка передней поверхности, радиусов и упрочняющих фасок	3Б22Д; 3В642; 3Б632В	12А2-45° 150×10×3 АС4 80/63—63/50 100 В1-11П	20...25	1,5...2,0 (ручная)	0,03...0,05 (ручная)		Без СОТС				
									14ЕЕ1 125×3×4×60° АС4 160/125(63/50) 100 В1-11П	1,0...1,5	0,03...0,05	
										1ЕЕ1 150×10×6××136° АС4 160/125(63/50) 100 В1-11П	1,5...2,0	
Фрезы дисковые и торцовые	Заточка задней поверхности	3Б667; 3Э667	12А2-45° 150×20(6+10+4)×3 АС6 200/160; 125/100, 63/50 100 М-М1-04	25...30	0,2...0,3	0,30...0,50	«Аквол-10» или Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1...3%) + +H <sub>2</sub> O (ос- тальное)					
							3М642Е; 3В642	12А2-45° 150×10(5+5)×3 АС4 160/125, 63/50 100 В1-11П	1,0...2,0 (ручная)	0,03...0,05 (ручная)	Без СОТС	

Окончание табл. 9.9

Инструмент	Операция	Модель станка	Форма, размеры и характеристика шлифовального круга	Режимы заточки			Состав СОТС
				Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	
Фрезы дисковые и торцовые	Заточка передней поверхности	3В642; 3М642Е	12А2 125(150)×10×3 АС4 125/100–160/125 100 В1–11П	15...20	1,5...2,0	0,05...0,06	Без СОТС
	Доводка задней поверхности	3В642; 3М642Е	12А2 125(150)×10×3 АС4 63/50–50/40 100 В1–11П	25...30	1,0...1,5	0,02...0,03	
Развертки, сверла, фрезы, зенкера	Заточка передней поверхности	3В642; 3М642	12R4 125(80)×1,5×2 АС4 125/100–160/125 100 В1–11П	15...20	1,5...2,0	0,03...0,05	Без СОТС
	Доводка передней поверхности	3В642; 3М642Е	12R4 125(80)×1,5×2 АС4 63/50–50/40 100 В1–11П	25...30	1,0...1,5	0,01...0,03	

## 9.10. Показатели конкурентоспособности инструментов из СТМ

Технология шлифования	Характеристика разрабатанного инструмента из СТМ	Характеристика зарубежных аналогов	Показатель качества инструмента из СТМ	Оценка конкурентоспособности инструмента из СТМ
Технология алмазной заточки дисковых пил с пластинами из твердого сплава	12М2-45° 125×5(2,5+2,5)×6-АС4 160/125, 63/50 Н1Д-В1-11П-100-46,6	12М2-45° 125×5 (2,5+2,5)×6-Д126, С100; Д35, С75	Относительный расход алмаза, мг/г: разработанный — 0,90; аналог — 2,29	Износостойкость разработанных кругов в 2,6 раза выше
	12А2-20° 125×6(3+3)×1,5-АС4 160/125, 63/50 Н1Д-В1-11П-100-14,8	12А2-45° 125×3×1,5-Д54—С75	Относительный расход алмаза, мг/г: разработанный — 0,65; аналог — 2,35	Износостойкость разработанных кругов в 3,6 раза выше
Технология алмазной заточки мелкоразмерного твердосплавного инструмента (сверла и фрезы диаметром 0,3...3 мм)	11V9-70° 100×3×10-АС6 125/100Н1 Д-В2-01-2-75-30,0	11V9-70° 100×3×10- RWG-W-Д126-826N-75	Относительный расход алмаза, мг/г: разработанный — 0,96; аналог — 1,02	Износостойкость разработанных кругов равнозначна
	4А9200х10х3-АС1550/40...63/50-М02-150-79,0	2SP700 200х10х3-Д46SP-2063А-С90	Количество инструментов, обработанных кругом, штук: разработанный — 3500; аналог — 3500	



Продолжение табл. 9.10

Технология шлифования	Характеристика разрабатанного инструмента из СТМ	Характеристика зарубежных аналогов	Показатель качества инструмента из СТМ	Оценка конкурентоспособности инструмента из СТМ
Технология алмазного шлифования крупногабаритного твердосплавного штампового инструмента	1А1 510×25×5-АС4 80/63-В1-11П-100-871,0	1А1 510×25×5-ДС120-Р75-В41-3,0	Количество инструментов, обработанных кругом, шт.: разрабатанный — 9; аналог — 6	Износостойкость обработанных кругов в 1,5 раза выше
Технология заточки крупногабаритного протяжного инструмента из инструментальных сталей	12А2-45° 100×5(3+2)×5-КР 160/125, 63/50 Н1Д-В1-1П(В2-01-1)-100-33,0	4000×100×3×6-Д1110-75-ВR76 Фирма «Вендт» (Германия)	Относительный расход сВН, кг/инстр.: разрабатанный — 0,80; аналог — 1,07	Износостойкость обработанных кругов в 1,3 раза выше
Технология шлифования твердосплавных ножей дерево-режущего инструмента	12А2-45°SS 150×10×5-АС4 100/80А2-В1-13-125-64,0	Д11125×10×2-5Д120-100	Относительный расход алмаза, мг/г; разрабатанный — 1,25; аналог — 1,35	Износостойкость обработанных кругов в 1,1 раза выше

Окончание табл. 9.10

Технология шлифования	Характеристика разрабатанного инструмента из СТМ	Характеристика зарубежных аналогов	Показатель качества инструмента из СТМ	Оценка конкурентоспособности инструмента из СТМ
Технология шлифования твердосплавных ножей бумажно-резательных машин	6A2 200×20×3-AC6 160/125-КМ1-100-149,0	361(6A2 200×5×4)-Д126-М263/22-75	Относительный расход алмаза, карат/инстр.: разрабатанный — 0,11; аналог — 0,15	Износостойкость разрабатанных кругов в 1,4 раза выше
	6A2 200×20×3-AC4 80/63-В1-11П-100-149,0	361(6A2 200×5×4)-Д76-М265/20-50	Относительный расход алмаза, карат/инстр.: разрабатанный — 0,09; аналог — 0,12	Износостойкость разрабатанных кругов в 1,3 раза выше
	6A2 200×10×3-ACМ 28/20-В1-01-1-100-79,0	361(6A2 200×5×4)-МД16-В160-50	Относительный расход алмаза, карат/инстр.: разрабатанный — 0,07; аналог — 0,08	Износостойкость разрабатанных кругов равнозначна
Технология шлифования художественного стекла	1ЕЕ1250х6х10х100°-АС1580/63-МХ4-5-50	1ЕЕ1250х6х 5х100°-АС680/63-М2-01-50	Относительный расход алмаза, мг/см <sup>3</sup> : разрабатанный — 0,12; аналог — 0,20	Износостойкость разрабатанных кругов в 1,7 раза выше

темпов развития инструментального производства, повышение производительности труда, механизации и автоматизации производства, а также улучшение качества и увеличение срока службы инструментов. Применение синтетического алмаза и сBN в инструментах для заточки быстрорежущих сталей и твердых сплавов позволило совершить качественно новый скачок в развитии инструментального производства. Синтетический алмаз и сBN стали определяющим фактором технического прогресса, совершенствования существующих, создания новых инструментов и технологических процессов, снижения себестоимости продукции, улучшения качества и повышения стойкости и долговечности инструмента.

Шлифовальные круги из сверхтвердых материалов позволили с наивысшей точностью обрабатывать инструменты любой сложной формы, которые в ряде случаев невозможно изготовить другими абразивами. Благодаря алмазу и сBN успешно решается проблема высокоэффективного использования автоматизированного оборудования, станков с числовым программным управлением, как при изготовлении инструмента, так и при его эксплуатации. Кроме того, сверхтвердые материалы позволяют экономить дорогостоящие инструментальные материалы, сократить расход инструментов, значительно повысить культуру производства и улучшить условия труда.

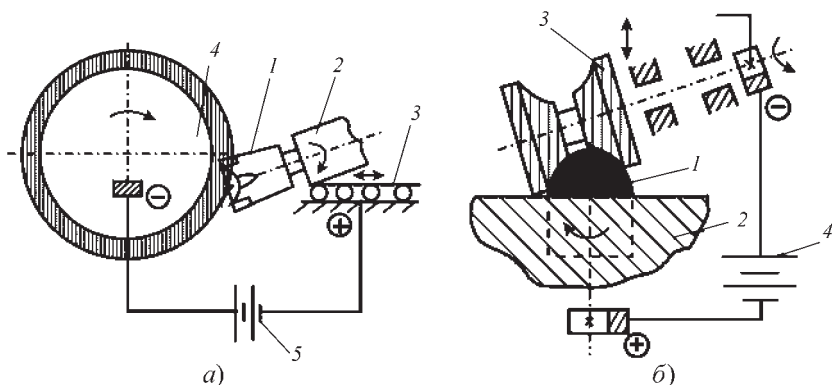
Разработанные круги из СТМ соответствуют мировому уровню и являются конкурентоспособными по сравнению с разработками зарубежных фирм (см. табл. 9.14). Эти результаты получены для основной номенклатуры шлифовальных кругов из СТМ — форм 1А1, 1ЕЕ1, 11V9, 12А2 и 12М2, используемых в технологиях шлифования дисковых пил, штампов, протяжек, сверл, фрез ножей и других инструментов.

#### **9.4. ЗАТОЧКА ЗАТУПЛЕННЫХ БУРОВЫХ КОРОНОК УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Из всех видов горного инструмента после бурения затачивают, в основном, твердосплавные буровые коронки ударного действия. Конструкция инструмента позволяет осуществлять 5–7 переточек на лезвийных коронках с призматическими вставками и 3–5 переточек на штыревых коронках с цилиндросферическими вставками. Это достигается в случае соблюдения правил эксплуатации бурового ин-

струмента, которыми предусмотрено ограничение по величине площадки износа твердосплавных вставок — 2,5 мм в периферийной части лезвийных коронок и 0,5 диаметра штыря для цилиндросферических. Чем чаще восстанавливаются коронки, тем больше общая наработка на инструмент, что объясняется снятием дефектного слоя на рабочей поверхности твердого сплава, возникающего при многократном ударном взаимодействии с разрушаемой породой.

Большое значение имеет метод обработки коронок. При их ручном затачивании на точильно-шлифовальных станках с кругами из карбида кремния зеленого (КЗ) неизбежны прижоги и микротрещины в твердом сплаве, что снижает показатели стойкости инструмента. Алмазное шлифование повышает качество инструмента, так как на обработанных поверхностях формируются сжимающие напряжения. При этом восстанавливается правильная форма и геометрия такого сложнопрофильного инструмента, каким является буровая коронка, а шероховатость поверхности соответствует  $Ra\ 0,63...0,80$  вместо  $Rz \leq 10$  при заточке КЗ. Для этого была разработана технология врезного алмазно-эрозионного шлифования, изготовлены специальные алмазные инструменты и заточные станки.



**Рис. 9.7. Принципиальная схема восстановления лезвийных (а) и штыревых (б) коронок с наложением технологического тока напряжением 6...10 В:**

а: 1 — крестовая коронка; 2 — бабка изделия; 3 — каретка; 4 — алмазный круг формы 1ЕЕ1; 5 — источник технологического тока;

б: 1 — твердосплавная вставка; 2 — корпус коронки; 3 — алмазный круг формы 4Н5; 4 — источник технологического тока

На рис. 9.7 показана принципиальная схема шлифования крестовой буровой коронки с технологическим током и штыревой коронки с цилиндросферическими твердосплавными вставками.

В табл. 9.11 приведены данные по типоразмерам твердосплавных буровых коронок, затачиваемых соответствующим алмазным инструментом, а также моделям созданных станков для восстановления затупленных коронок.

### 9.11. Характеристика алмазных кругов для заточки буровых коронок различных типоразмеров

Типоразмеры обрабатываемых буровых коронок	Форма и характеристика алмазных кругов для моделей станков		
	М3-38	В3-237 В3-302	А3-110
Долотчатые: КДП, КШИ, БКПМ 36-60	12Н2 250×42×3×76 АС6 250/200	9Н1 250×40×3×R180×76 АС20 250/200 100 МО20-2	
Трехперые: КТП, КТШ, КШЛ 36-55		1ЕЕ1 250×В×3×145×76 АС20 250/200100 МО20-2	—
Крестовые: ККП, БКПМ, БКР	—		
Штыревые: КНШ, КШС, КНТУ 36-110		—	ЧН5 27×6×3×R12×10; ГА 17×20×2×10 (12)

Внедрение на горнорудных предприятиях технологии механизированной алмазно-электроэрозионной обработки твердосплавного бурового инструмента позволяет снизить физическую нагрузку в 4 раза, уровень вибрации в 10 раз, уровень шума на 14 %, практически ликвидировать запыленность воздуха абразивными частицами.

## Глава 10

### ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СТМ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Инструменты для комбинированной обработки разрабатывают применительно к выполнению конкретных технологических процессов или отдельных операций. Они изготавливаются различных типоразмеров, с алмазо- и сBN-содержащим слоем на электропроводных связках. Инструменты можно разделить на алмазно-абразивные (для формирования плоских, круглых, фасонных поверхностей) и специальные — с поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами (ПСТМ), позволяющие выполнять такие же операции, но с обеспечением низкой шероховатости обработанной поверхности в изделиях из труднообрабатываемых материалах, преимущественно из твёрдых сплавов.

#### 10.1. ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ СТМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*Методы обработки.* Для обработки плоских поверхностей наибольшее распространение в промышленности получили комбинированные методы обработки с применением шлифовальных инструментов из СТМ:

- электрохимическое шлифование (ЭХШ);
- электроэрозионное шлифование (ЭЭШ).

Сущность *электрохимического шлифования* кругами из СТМ заключается в сочетании электрохимического растворения обрабатываемого материала с механическим воздействием на него зерен сверхтвёрдых материалов. Алмазные зерна-диэлектрики обеспечивают зазор между кругом и изделием 0,015...0,025 мм, а низкое напряжение источника тока (5...10 В) способствует протеканию электрохимических процессов. В качестве технологической среды

используют водные составы насыщенных электролитов ( $\text{NaNO}_3$  (100 г/л) +  $\text{NaCl}$  (50...100 г/л) и др.). Практика показала, что электрохимические процессы эффективны при невысокой производительности съема материала алмазными зернами (до 100 мм<sup>3</sup>/мин). С ее повышением резко возрастает интенсивность электроконтактных процессов, что вызвано наличием большого количества стружки в зазоре между обрабатываемой поверхностью и поверхностью круга. Эффективность электрохимических процессов при этом снижается практически до нуля. Кроме того, существенным недостатком электрохимического шлифования является проблема утилизации насыщенных электролитов.

Поскольку в реальных процессах шлифования материалов кругами из СТМ производительность обработки находится в пределах от 500 до 2000 мм<sup>3</sup>/мин, то наибольшее распространение в производстве получила такая разновидность электрохимического шлифования, как электроалмазное шлифование, или *электрошлифование* (ЭШ). Сущность последнего состоит в том, что электрохимические процессы рассматриваются не как средство для съема материала, а исключительно как процессы, регулирующие режущую способность шлифовальных кругов из СТМ, которая, в свою очередь, обеспечивается электроконтактными процессами замыкания зазора стружкой. В этом случае в качестве электролитов можно использовать ненасыщенные составы:  $\text{NaNO}_3$  (10...30 г/л) +  $\text{NaNO}_2$  (2 г/л) с добавкой других солей (1...2 г/л). Электрошлифование имеет следующие преимущества по сравнению с обычным шлифованием кругами из СТМ:

- производительность обработки повышается в 1,5–2 раза;
- износостойкость алмазных кругов возрастает в 2–4 раза;
- отсутствуют негативные изменения в структуре поверхностного слоя обрабатываемого материала;
- можно вести высокопроизводительную обработку труднообрабатываемых материалов.

Источником технологического тока в описанных выше процессах служат выпрямители типов ВУ, ВСА, ВАКГ, ВАКР и др. К шпинделю шлифовального станка через щеткодержатели и токосъемное кольцо подводят отрицательный заряд от источника тока, а к станине — положительный.

Сущность *электроэрозионного шлифования* кругами из СТМ заключается в том, что в зоне шлифования в межэлектродном промежутке возбуждаются электроразряды от источника импульсного технологического тока. В качестве таких источников используют генераторы типов ШГИ, ГКИ, ГТИ, которые вызывают в рабочей зоне разряды с частотой в несколько кГц, продолжительностью от единицы до нескольких десятков микросекунд при амплитудном значении напряжения от 60 до 150 В и обеспечивают прямой пробой промежутка между кругом и обрабатываемым изделием. Эти генераторы в большей степени предназначены для чисто электроэрозионной обработки.

Специально для электроэрозионного шлифования созданы низкочастотные генераторы типа ИТТ с частотой 50 Гц и амплитудным напряжением 5...10 В. Характерным для процессов электроэрозионного шлифования является то, что для воздействия разряда на связку круга подключают положительный полюс источника тока к кругу, а отрицательный — к обрабатываемому изделию. Межэлектродный промежуток в этом случае может заполняться любой технологической жидкостью, преимущественно на водной основе. Основная роль электроразрядов заключается в поддержании высокой режущей способности кругов. Преимущества ЭЭШ по сравнению с обычным шлифованием кругами из СТМ:

- повышение (от 3 до 7 раз) производительности обработки;
- можно работать кругами на любых электропроводных связках;
- меньшие затраты мощности на процесс обработки.

Нужно иметь в виду, что процесс ЭЭШ характеризуется интенсификацией износа кругов из СТМ. Так, хотя при шлифовании быстрорежущей стали кругами из сVN производительность и увеличивается в 2 раза, однако до 4 раз повышается износ круга, а себестоимость обработки почти в 3 раза выше, чем при упругом ЭШ. Другим недостатком ЭЭШ является то, что при воздействии электрических разрядов на обрабатываемую поверхность таких материалов, как безвольфрамовые твердые сплавы, магнитотвердые сплавы, оксидно-карбидная керамика, могут возникать трещины и сколы. Кроме того, после этого процесса шероховатость обработанной поверхности выше, чем при обычном шлифовании кругами из СТМ или при электрошлифовании.



**Оборудование.** Для указанных процессов могут быть использованы как специальные станки мод. ЗЭ731, ЗЕ624, так и модернизированные универсальные станки, в которых головки станка со шлифовальным шпинделем изолированы от станины с помощью втулок, шайб и пластин из электроизоляционного материала.

**Типоразмеры шлифовальных кругов, характеристика их рабочего слоя, конструкции кругов.** Типоразмеры кругов, как правило, определяются используемым оборудованием. В основном применяют круги формы 12А2-45° 125(150)×10(20)×3×32 или 6А2 150(250)×20×3×32(76). Характеристика рабочего слоя определяется требованиями к обработанной поверхности. Преимущественно используют порошки алмаза АС6 (АС15, АС20) или сВN (кубонит КР, КВ). Зернистость СТМ от 100/80 до 250/200. Относительная концентрация СТМ — 100. Связка — металлическая или металлополимерная. Конструкции режущего слоя кругов — стандартные сплошные. При необходимости для улучшения подачи технологической жидкости в зону обработки используют специальные круги с канавками в режущем слое (рис. 10.1). В случае глубинного шлифования для учета неравномерности износа режущей поверхности круга в радиальном направлении применяют многослойные круги, каждый слой которых отличается по физическим и техническим характеристикам (рис. 10.2, а).



Рис. 10.1. Круг формы 6А2SS диаметром 250 мм для глубинного шлифования

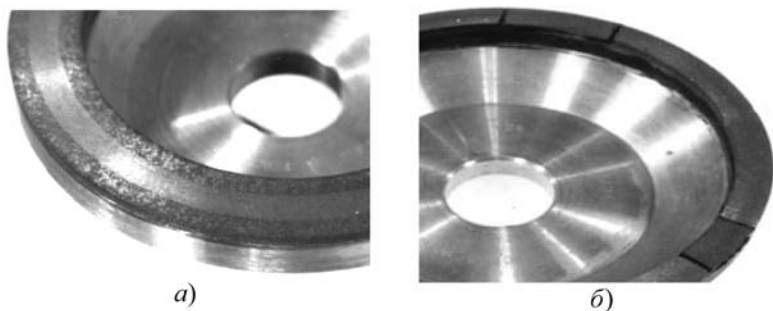


Рис. 10.2. Фрагменты специальных многослойных кругов со слоями, чередующимися в радиальном (а) и окружном (б) направлениях

Для учета неравномерности износа круга в окружном направлении используют круги с чередующимися в радиальном направлении слоями (рис. 10.2, б). Основными преимуществами таких специальных инструментов является то, что при их использовании реализуется возможность целенаправленно изменять характеристику рабочего слоя на одном круге, например, применять одновременно слои с крупными зёрнами алмаза для достижения высокой производительности обработки и слои с более мелкими зёрнами для обеспечения низкой шероховатости обработанной поверхности. Тем самым они обеспечивают требуемое качество обработанной поверхности и снижение износа кругов даже при повышении производительности шлифования  $Q$ .

**Электро- и теплофизические характеристики кругов для электрошлифования.** Учет электроконтактных процессов при износе кругов позволил получить для условий электрошлифования зависимость расчета относительного расхода  $q_p$  СТМ в миллиграммах на грамм в кругах:

$$q_p = \frac{\alpha_3 I_k^2 R_k + \beta_3 I_k U}{0,568 \alpha_3 K^{-1} \gamma_{св} \gamma_m k_{33} k_k k_3 R_k Q [c(T_{пл} - T_{св}) + L] (1 - K/400)}, \quad (10.1)$$

где  $\alpha_3$  — коэффициент, отражающий долю электрической энергии, которая расходуется на нагревание и расплавление контактирующих материалов в месте их непосредственного контакта;  $I_k$  — сила тока, А;  $R_k$  — электрическое сопротивление круга, Ом;  $\beta_3$  — коэф-

фициент, отражающий долю электрической энергии, которая расходуется на нагрев и расплавление материалов от электрической дуги при разрыве контакта;  $U$  — напряжение, подающееся на электроды, В;  $K$  — относительная концентрация СТМ в режущем слое круга, %;  $\gamma_m$  — плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{св}$  — плотность связки, кг/м<sup>3</sup>;  $k_k$  — коэффициент, отражающий долю режущей поверхности круга, которая находится в контакте с материалом при обработке и снимает припуск на обработку;  $k_3$  — коэффициент содержания электропроводных компонентов в связке по массе;  $k_{э3}$  — коэффициент, отражающий долю разрушения связки круга за счет электроэрозии;  $Q$  — производительность шлифования, м<sup>3</sup>/с;  $c$  — удельная теплоемкость связки круга, Дж/(кг·К);  $L$  — скрытая теплота плавления материала связки, Дж/кг;  $T_{пл}$  — температура плавления связки, К;  $T_{св}$  — среднее значение установившейся температуры связки при электрошлифовании, К.

В соответствии с зависимостью (10.1) за износ кругов ответственными являются параметры, связанные с их электрофизическими ( $k_k, k_3, k_{э3}, R_k$ ) и теплофизическими ( $c, L, T_{пл}$ ) характеристиками.

Значения некоторых указанных выше параметров шлифовальных кругов из СТМ приведены в табл. 10.1, 10.2.

### 10.1. Теплофизические характеристики связок кругов из СТМ

Основа связки	Марка связки	$T_{пл}$ , К	$c,^*$ кДж/(кг·К)	$L$ , кДж/кг
Cu–Al–Zn	M1-04	783	0,55	182
	M1-05	813		218
Cu–Sn	M2-01	1058	0,40	100
	M3-16	1053		108
	MC6	1083		32
Cu–Sn–Sb	M2-09	958	0,35	40
	M2-12Э	953	0,30	83
	MO20-2	963	0,30	63

\* Массовая теплоемкость  $c$  определялась при  $T = T_{пл} - 293$  К.

### 10.2. Влияние связок на электрическое сопротивление кругов из СТМ с характеристикой 12А2-45° 150×10×3×42×32 АС4 (АС6, КР) 100/80—100

Связка	Твердость рабочего слоя HRB	Коэффициент содержания электропровод- ных компонен- тов в связке, $k_3$	Электрическое сопротивление кругов, мОм	
			Связка без СТМ	Связка с СТМ
<i>Металлические связки</i>				
М1-01	87±5	0,95	—	2,8±0,2
М1-04	86±7	0,91	2,9±0,3	3,5±0,3
М1-05	95±4	0,75	4,4±0,4	—
МО13-Э	103±4	0,95	4,0±0,3	4,9±0,4
М1-10	92±6	0,91	2,7±0,2	—
М2-01	87±6	1,00	2,1±0,2	2,4±0,2
М2-09	96±4	0,97	2,5±0,2	—
М2-12Э	96±6	0,88	2,6±0,2	3,4±0,3
М3-16	94±3	0,97	2,0±0,2	—
МО20-2	105±5	0,88	2,9±0,3	3,9±0,4
МС6	92±3	0,85	2,3±0,3	2,9±0,3
<i>Металлополимерные связки</i>				
В1-01	35±5	0,94	11,0±3,0	31,0±5,0
В1-02	49±5	0,94	—	25,0±2,0
В1-03	44±4	0,91	5,0±1,0	9,0±2,0
В1-10	43±7	0,60	20,0±2,0	129,0±8,0
В1-13	54±3	0,65	10,0±2,0	18,0±4,0
ВСЭ	56±4	0,72	7,0±1,0	10,0±2,0
<i>Полимерные связки с металлизацией алмазов</i>				
В1-11П	62±2	—	—	76,0±18,0
В2-01	68±6	—	—	712,0±38,0
В2-08	64±3	—	—	80,0±24,0

Электрическое сопротивление (ЭС) шлифовальных кругов наиболее зависит от концентрации зерен СТМ, их покрытия и связки круга. С повышением концентрации СТМ ЭС кругов ощутимо возрастает, поскольку в связке увеличивается доля неэлектропроводного абразива.

Стеклопокрытие зерен СТМ резко повышает величину ЭС. Это вызвано повышенным содержанием неэлектропроводного материала (стекла) в композиции абразив–связка. ЭС кругов без покрытия и с металлизированным СТМ отличается незначительно. При этом у металлических связок металлопокрытие (Н-125) зерен несколько снижает электрическое сопротивление, а у металлополимерных — металлизация порошка алмаза (МА) повышает, что объясняется изменением механизма электропроводности, обусловленного полупроводниковыми свойствами оксидов покрытия. В случае, когда связка круга — полимерная (типа В2-01, В2-08) и не проводит ток, введение металлизированного покрытия зерен СТМ резко снижает электрическое сопротивление. Так, круг 12А2-45° 150×10×3×42×32 АС4 100/80–100 В2-08 имеет  $R_k = 4 \cdot 10^6$  Ом, а при введении металлизации порошка алмаза  $R_k = 80$  мОм.

Электрическое сопротивление кругов из СТМ на различных связках приведено в табл. 10.2. Видно, что наибольшее ЭС — у кругов на металлополимерных связках, которые являются гетерогенными полимерными композитами, имеющими полимерное связующее и токопроводящий наполнитель.

При изменении относительной концентрации СТМ в кругах на токопроводящей полимерной связке объемная доля полимера  $V_n$  остается постоянной, а объемная доля наполнителя  $V_n = 1 - (V_n + V_a)$ . Учитывая это, можно найти электрическое сопротивление круга в зависимости от относительной концентрации и покрытия СТМ:

$$R_k = 1500\rho_n \frac{l\sqrt[3]{1/P_{вн}}}{S[1 - (V_n + V_a)](1 - V_a)}, \quad (10.2)$$

где  $\rho_n$  — удельное электрическое сопротивление наполнителя, Ом·м;  $l$  — длина электропроводного участка, м;  $P_{вн}$  — контактное давление, которое формируется в полимерной композиции внутренними напряжениями, МПа;  $S$  — номинальная площадь контакта, м<sup>2</sup>;  $V_n$  — объемная доля полимера в связке;  $V_a$  — объемная доля алмазов в связке.

Из выражения (10.2) следует, что при равных значениях  $\rho_n$ ,  $R_k$ ,  $l$ ,  $S$  электрическое сопротивление круга зависит от  $V_a$  — объемной доли СТМ с учетом его покрытия, и с повышением относительной концентрации СТМ возрастает. Следовательно, зная сопротивление  $R_{кэ} = 10$  мОм круга-эталона (АС4 100/80 100 ВСЭ), можно рассчитать электрическое сопротивление кругов с другими характеристиками:

$$R_{ki} = \frac{\{[1-(V_n + V_a)](1-V_a)\}_o}{\{[1-(V_n + V_a)](1-V_a)\}_i} R_{кэ}. \quad (10.3)$$

Для более детального анализа влияния составляющих абразиво-содержащих композитов на их проводимость необходимо знать удельное электрическое сопротивление (табл. 10.3).

### 10.3. Удельное электрическое сопротивление связок для кругов из СТМ

Связка круга	Марка	Удельное электросопротивление $\rho$ , $\times 10^{-6}$ , Ом·м
Металлическая	M2-01	0,040±0,002
	M2-12Э	0,115±0,005
	M1-04	0,055±0,003
Металлополимерная	B1-02	0,044±0,008
	B1-10	0,450±0,030
Полимерная	B2-01	$1,82 \cdot 10^{17}$
	B2-08	$1,73 \cdot 10^{18}$

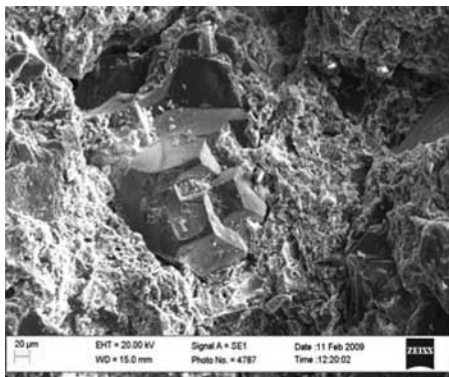
Видно, что основа связок существенно влияет на их проводимость, при этом металлизация (МА, Н1-25) алмазных зерен повышает электропроводность композитов, а стеклопокрытие — снижает. Это характерно как для металлических, так и металлополимерных связок. Наравне с покрытием зерен относительная концентрация алмаза существенно влияет на электрическое сопротивление композита. Характерным является различие в изменении проводимости

композитов с металлической связкой [с повышением относительной концентрации алмаза удельное электрическое сопротивление монотонно возрастает:  $\rho_{\text{км}} = (0,097 + 0,350K/25)10^{-6}$ ] и композитов с металлополимерной связкой (электрическое сопротивление резко возрастает при относительной концентрации алмаза более 100). Поэтому при электрошлифовании нежелательно использовать круги на металлополимерных связках с относительной концентрацией алмаза выше 100.

Для достижения эффективной обработки кругами из СТМ инструментальных материалов, особенно содержащих карбиды металлов *Ib* — *Ib* подгрупп, необходимо реализовать процесс электрошлифования, в котором исключено негативное действие как интенсивных электрохимических, так и интенсивных электрофизических процессов. Тем более что интенсивности электрохимических электродных процессов в условиях электрошлифования кругами из СТМ недостаточно для достижения ощутимых показателей анодного растворения, но вполне достаточно для поляризации поверхностей анода и катода, формирования на них пленок и изменения, тем самым, условий электрофизического контактирования электродов [11]. Поэтому, выдвинута концепция разделения направленности механических, электрохимических и электрофизических процессов при электрошлифовании различных материалов таким образом, чтобы механические процессы резания зернами были направлены исключительно на сьем обрабатываемого материала, эрозионные — исключительно на поддержание высокой режущей способности круга, а электрохимические — как процессы электродной поляризации, то есть как регулирующие. Тем самым для указанной выше группы материалов максимально устраняется негативное действие электроэрозионных процессов на обрабатываемую поверхность, а положительное действие направлено на устранение контакта связки и обрабатываемого материала в зоне обработки. В этих условиях обеспечивается повышение производительности обработки без ухудшения качества обработанной поверхности.

Очень важно при комбинированной обработке обеспечить такое воздействие на рабочую поверхность инструмента, которое, наряду с известным физическим влиянием, направленным на возобновление его режущей способности, позволяло бы вносить дополнитель-

**Рис. 10.3.** Состояние режущей поверхности круга на связке В2-08 после плазменного воздействия ( $Q = 12$  кВт,  $v = 25$  см/мин)



ные позитивные изменения в поверхностный слой рабочей поверхности, например, формируя на ней функциональные пленки или повышая физико-механические свойства поверхностного слоя. Одним из таких методов является плазменное воздействие, характеризующееся высокими значениями мощности и удельного теплового потока, что оказывает влияние на состояние и свойства инструментальных композитов с СТМ для шлифовальных кругов как на полимерных (рис. 10.3), так и металлических связующих.

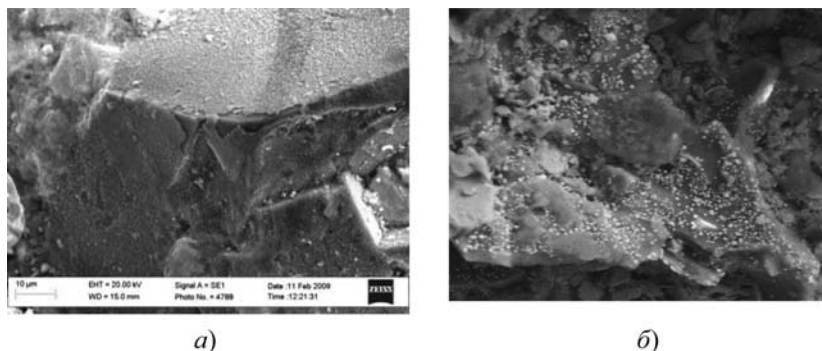
Условия плазменной обработки рабочего слоя кругов из СТМ определяются мощностью плазменной струи  $Q$  и скоростью перемещения плазматрона  $v$ .

Наиболее чувствительными к плазменной обработке являются круги на полимерных связующих, для которых наряду со вскрытием зерен (см. рис. 10.3) наблюдаются и поверхностные структурные изменения в виде выгорания рабочего слоя и образование трещин на рабочей поверхности. Чтобы избежать последнего, необходимо снизить ток плазменной струи до 150 А, а скорость перемещения плазматрона повышать. При этом основным регулятором интенсивности воздействия является скорость перемещения плазматрона.

Плазменная обработка кругов на органической связке позволяет управлять контактными процессами в зоне шлифования за счет формирования пленок определенного состава на зернах СТМ (рис. 10.4, а) и на связках (рис. 10.4, б).

Для металлических связок могут иметь место поверхностные структурные изменения от воздействия интенсивной плазмен-



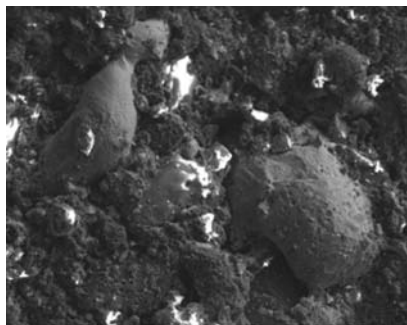


**Рис. 10.4. Пленка на зерне из кубонита (а) и на связке В2-08 (б) после плазменного воздействия**

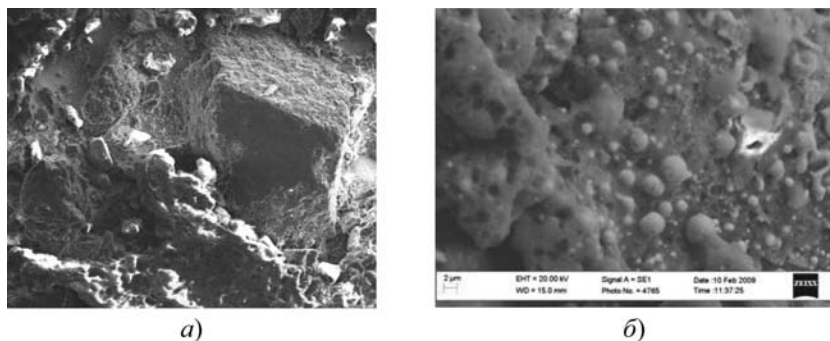
ной струи, связанные с оплавлением (рис. 10.5). Для избежания такого негативного воздействия на рабочую поверхность круга необходимо, аналогично полимерным связкам, снижать ток струи и повышать скорость перемещения плазмотрона. Для металлических связок регуляторами интенсивности плазменного воздействия выступают оба фактора. Это дает возможность достичь необходимого эффекта вскрытия зерен абразива без негативного воздействия, которое могло бы привести к образованию трещин в связке.

Пленки также образуются на зернах СТМ и металлической связке (рис. 10.6).

Анализ элементного состава пленок, возникающих на зернах СТМ и связках в зоне плазменного воздействия, показывает, что



**Рис. 10.5. Участок с элементами оплавления на режущей поверхности круга на металлической связке МО20-2 после плазменного воздействия ( $Q = 18$  кВт,  $v = 25$  см/мин)**



**Рис. 10.6.** Пленка на зерне из кубонита (а) и на связке MO20-2 (б) после плазменного воздействия

они содержат значительное количество кислорода и элементы, входящие в состав связки.

Массовая доля кислорода на зернах фиксируется от 26,7 до 33,6 %, на связке — от 16,9 до 25,0 %. Несколько меняется распределение элементов связки, входящих в состав пленок. Если для исходной шихты связки MO20-2 соотношение между основными составляющими связки Cu:Sn:Sb составляет 8,75:2:1, то на зернах СТМ это соотношение 5:2:1 за счет снижения содержания меди. На поверхности связки количество меди и олова увеличивается в соотношении 8,95:3,78:1. На такое перераспределение элементного состава связки указывают и результаты исследования связки в лунке воздействия плазменной струи — в глубине связки соотношение между медью и оловом составляет 4, а на поверхности лунки 2,88 и 1,28.

Перераспределение химических элементов, характерное для плазменного воздействия, в зависимости от интенсивности теплового воздействия приводит к изменению твердости рабочего слоя круга (рис. 10.7). В целом имеется тенденция к снижению твердости рабочего слоя круга при увеличении режимов плазменной обработки.

В зависимости от того, на что именно направлена плазменная обработка — на упрочнение рабочего слоя и создание на нем функциональных пленок или на преимущественное обеспечение хоро-

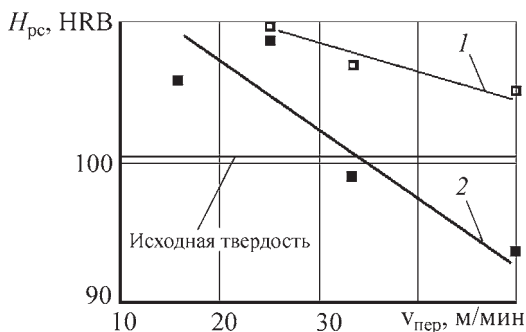


Рис. 10.7. Изменение твердости рабочего слоя круга на связке МО20-2 после воздействия плазменной струи в зависимости от скорости перемещения плазмотрона при силе тока плазменной струи: 1 — 150 А; 2 — 200 А

шего выступания зерен и повышение режущей способности путем разупрочнения рабочего слоя, есть возможность управления плазменным воздействием для повышения эксплуатационных показателей шлифовальных кругов.

Исследования, проведенные при шлифовании алмазным кругом 12А2-45° 125×5×3×32-АС6 125/100-М2-01-100 твердого сплава ВК6, показали, что после предварительного механического воздействия на режущую поверхность круга свободным абразивом относительный расход алмаза составляет 1,2 мг/г, после электроэрозионного воздействия при  $U = 30$  В,  $I = 2$  А — 1,97 мг/г, после плазменного воздействия при силе тока плазменной струей  $I = 150$  А, скорости перемещения плазмотрона  $v_{пер} = 25$  см/мин — 0,87 мг/г. Вероятно, повышение износостойкости в 1,4 раза в результате плазменной обработки связано с образованием оксидных пленок на поверхностях связки и зерен круга.

**Рекомендации по применению шлифовальных кругов из СТМ при комбинированной обработке плоских поверхностей режущих инструментов**

#### Электрошлифование [11]

*Обрабатываемые материалы* — вольфрамовые и безвольфрамовые твердые сплавы, быстрорежущие стали, оксидно-карбидная керамика, магнитотвердые сплавы.

*Источники технологического тока, электрические режимы обработки* — выпрямители типов ВУ, ВСА, ВАКГ, ВАКР и т.п. К шпинделю шлифовального станка подводят «минус» от источника тока, а «плюс» к обрабатываемому изделию. Технологический ток: напряжение 6...8 В, сила тока 100...200 А.

*Типоразмеры шлифовальных кругов, характеристика их рабочего слоя* — круги форм 12А2-45° 125(150)×10(20)×3×32 или 6А2 150(250)×20×3×32(76). Алмаз марки АС6 или сВN марки кубонит КР (КВ). Зернистость шлифпорошков СТМ 80/63...250/200. Относительная концентрация СТМ в рабочем слое кругов 100 % (возможна 75 %). Связка круга — металлическая (М1-01, М1-10, М2-12Е, М020-2) или металлополимерная (В1-01, В1-03, В1-13).

*Специальные конструкции кругов* — 6А2SS 250×20×5×76 на полимерных связках для шлифования безвольфрамовых твердых сплавов. 12А2-45° многослойные и с чередующимся слоем для глубокого шлифования твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

*Режимы шлифования* — скорость вращения круга — 25...30 м/с, глубина шлифования 0,5 мм, продольная подача 0,3...1,0 м/мин.

*Технологические жидкости:*

— для электрошлифования твердых сплавов — натрий азотнокислый (5,0 % мас.) и азотистокислый (0,2 %), никель азотнокислый (0,5 %);

— для электрошлифования безвольфрамовых твердых сплавов — натрий азотнокислый (4,0 % мас.) и азотистокислый (0,2 %), бромистый аммоний (0,2 %) и глицерин (0,5 %).

*Выходные показатели процесса* — производительность обработки 1500...2500 мм<sup>3</sup>/мин, относительный расход СТМ 1...3 мг/г, параметр шероховатости обработанной поверхности *Ra* 0,32...0,64.

### **Электроэрозионное шлифование**

*Обрабатываемые материалы* — вольфрамовые твердые сплавы и быстрорежущие стали.

*Источники технологического тока, электрические режимы обработки* — низкочастотные генераторы типа ИТТ-35, работающие с частотой 50 Гц и амплитудным напряжением 5...10 В. К шпинделю шлифовального станка подводят «плюс» от источника тока, а «минус» — к станине. Технологический ток: напряжение — 30...50 В, сила тока — 2...10 А.

*Типоразмеры шлифовальных кругов, характеристика их рабочего слоя* — круги форм 12А2-45° 125(150)×10(20)×3×32 или 6А2 150(250)×20×3×32(76). Алмаз марки АС6 или сВN кубонит марки КР (КВ). Зернистость шлифпорошков СТМ 80/63...250/200. Относитель-

ная концентрация СТМ в рабочем слое кругов — 100 % (возможна 75 %). Связка круга — металлическая (М1-01, М2-01, М2-12Е, М020-2).

*Специальные конструкции кругов* — 12А2-45° многослойные и с чередующимся слоем для глубинного шлифования твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

*Режимы шлифования* — скорость вращения круга 25...30 м/с, глубина шлифования 0,5 мм, продольная подача 0,3...1,0 м/мин.

*Технологические жидкости* — натрий азотнокислый (1,0 % мас.) и азотистокислый (0,2%).

*Выходные показатели процесса* — производительность обработки 2000...3500 мм<sup>3</sup>/мин, относительный расход СТМ 3...7 мг/г, параметр шероховатости обработанной поверхности *Ra* 0,50...0,90.

### **Процессы с плазменной обработкой режущей поверхности кругов**

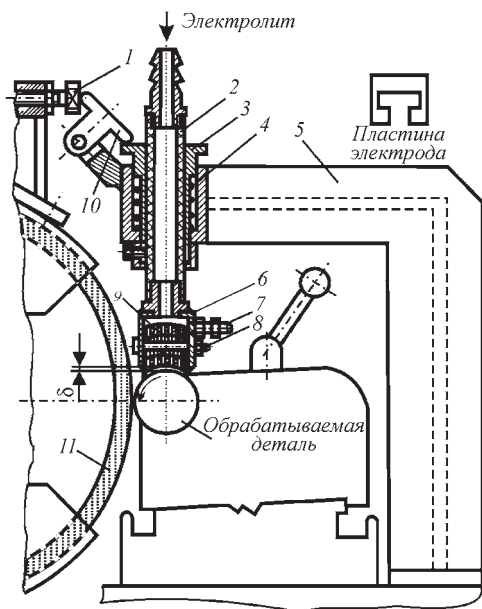
*Обрабатываемые материалы* — вольфрамовые и безвольфрамовые твердые сплавы, быстрорежущие стали, оксидно-карбидная керамика, магнитотвердые сплавы.

*Режимы плазменной обработки* — плазменная струя мощностью 12...18 кВт, скорость обработки: для кругов на полимерных связующих 62,5...90 см/мин, для кругов на металлических связующих 16...83,3 см/мин.

*Выходные показатели процесса* — повышение износостойкости круга в 1,4 раза.

## **10.2. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

Алмазно-электрохимическая обработка (АЭО) изделий с поверхностями вращения осуществляется по схемам одно- и многопроходного шлифования при жесткой (дозированной на ход стола) или упругой подачах алмазно-абразивного инструмента с алмазонасным слоем различного профиля, преимущественно прямого. Процесс электрохимического шлифования проводится с электрохимическим растворением обрабатываемого материала вне зоны абразивного действия круга с использованием автономного поликристаллического катода (ПК) (рис. 10.8).



**Рис. 10.8.** Схема АЭО с использованием ПК:

1 — упор; 2 — труба; 3 — стакан; 4 — пружина; 5 — кронштейн; 6 — корпус катода; 7 — клемма; 8 — гайка; 9 — металлические пластины с ПСТМ; 10 — кулачок; 11 — алмазный шлифовальный круг

### 10.2.1. Обработка наружных поверхностей

Автономный поликристаллический катод (АПК) представляет собой набор металлических пластин с вклеенными или впаянными в них вставками из поликристаллов сверхтвердых материалов, на которых при изготовлении катода алмазным шлифованием сформированы гладкие рабочие поверхности. Пластины устанавливаются в корпусе головки катода прорезями вверх и вниз попеременно, благодаря чему образуются каналы, через которые электролит, поступающий к пластинам, подается на все участки обрабатываемой поверхности.

Перед обработкой какие-либо две из пластин, находящиеся в корпусе головки, выставляются по диаметру детали. В процессе обработки АПК упруго прижимается к обрабатываемой поверхности

изделия. В процессе обработки поперечному перемещению шлифовального круга соответствует равное по величине вертикальное перемещение катода, обеспечивающее постоянство силы прижима пластин при уменьшении диаметра изделия.

Формирование поверхности с применением АПК выполняется в такой последовательности. На первом этапе алмазным (или алмазно-электрохимическим) многопроходным шлифованием придают обрабатываемой поверхности детали круглую форму. Возможно также образовывать на ней только отдельные гладкие площадки, позволяющие вводить поликристаллические пластины в контакт с вращающимся изделием. Проводится алмазное шлифование совместно с электрохимическим растворением обрабатываемого материала на площади, определяемой суммарной катодной поверхностью вставок из ПСТМ. На втором этапе, после съема заданного припуска на обработку, проводится механическая чистовая обработка полученной поверхности мелкозернистыми поликристаллами АПК, что определяет ее низкую шероховатость (алмазный круг в этом случае отводится от заготовки).

При АЭО поверхностей вращения выбор инструмента связан непосредственно с их размерами, величиной припуска на обработку и требованиями к их качеству. Как правило [16], используют стандартные алмазные круги прямого профиля с алмазоносным слоем на металлических связках марок М1-04, МС6, МЗ-21 и им подобных с порошками алмаза АС15...АС32 зернистостью 125/100 – 315/250 при относительной концентрации 100.

### **10.2.2. Обработка круглых внутренних поверхностей**

Инструменты для АЭО внутренних поверхностей по типу относят к алмазно-абразивным или поликристаллическим, а по принципу применения — к инструментам для одно- и многопроходного, врезного или глубинного шлифования, осуществляемого аналогично алмазному шлифованием наружных поверхностей.

По назначению их выбирают в зависимости от размеров и формы обрабатываемого отверстия, требуемых точности и шероховатости поверхности, принципиальной схемы обработки.

В качестве алмазно-абразивных инструментов используют стандартные круги прямого профиля (1А1), алмазные цилиндрические

головки (АГЦ) или круги специальных форм. Обычно алмазосодержащий слой формируется на металлических связках типа МЗ-21, М1-04, гальванической никелевой и им подобных с порошками алмаза АС15...АС32 зернистостью 80/63–315/250 с относительной концентрацией 100...150 в алмазосодержащем слое.

Более сложным является формирование внутренних поверхностей алмазно-электрохимической обработкой поликристаллическими катодами (АЭОПК) [16], при которой в связи с очень малым износом вставок из ПСТМ, находящихся в рабочей части корпуса инструмента, приработка поликристаллов к форме обрабатываемой поверхности происходить не может. Если рабочая часть поликристаллического катода, например, цилиндрической формы, будет равной или больше длины отверстия, то вследствие радиального отгибания инструмента, упруго прижимаемого к обрабатываемой поверхности, поликристаллы будут контактировать с ней при осевой осцилляции ПК лишь на участке вблизи торцевой кромки заготовки. Доводку на уровне полирования обрабатываемой поверхности или зачистку ее от продуктов электролитического растворения в процессе черного съема сплава (припуска на обработку) в этом случае осуществлять невозможно.

Основная сложность АЭОПК цилиндрических отверстий состоит в неравномерном по их длине съеме сплава электролитическим растворением — большим со стороны входа в отверстие, эта особенность осложняет возможность получения отверстий постоянного диаметра в поперечном сечении. Кроме того, требуется изыскание специальных приемов, позволяющих управлять величиной отгибания ПК для возможности осуществления доводочной операции. Одним из таких приемов является использование люнетного упора, в основу применения которого положена возможность осуществления высокопроизводительного электролитического съема сплава при АЭОПК невращающимся инструментом-катодом.

Характерные особенности специальных инструментов для АЭО внутренних поверхностей, касающиеся их конкретного назначения, типоразмеров, условий и принципов эксплуатации с учетом технологии изготовления инструментов, рассмотрены на примерах инструментов для обработки каналов твердосплавных волок и хо-



лодновысадочных матриц, формирования фасонных отверстий, алмазно-электрохимического сверления (АЭС).

**Поликристаллические катоды** (ПК) предназначены для алмазно-электрохимического чернового съема металла (сплава) и последующей чистовой механической доводки полученной поверхности на уровне ее полирования. Область применения ПК широка и определяется номенклатурой обрабатываемых изделий, а количество типоразмеров ПК практически не ограничено. Они могут быть в форме кругов прямого профиля, чашек, брусков, стержней и др. (рис. 10.9).

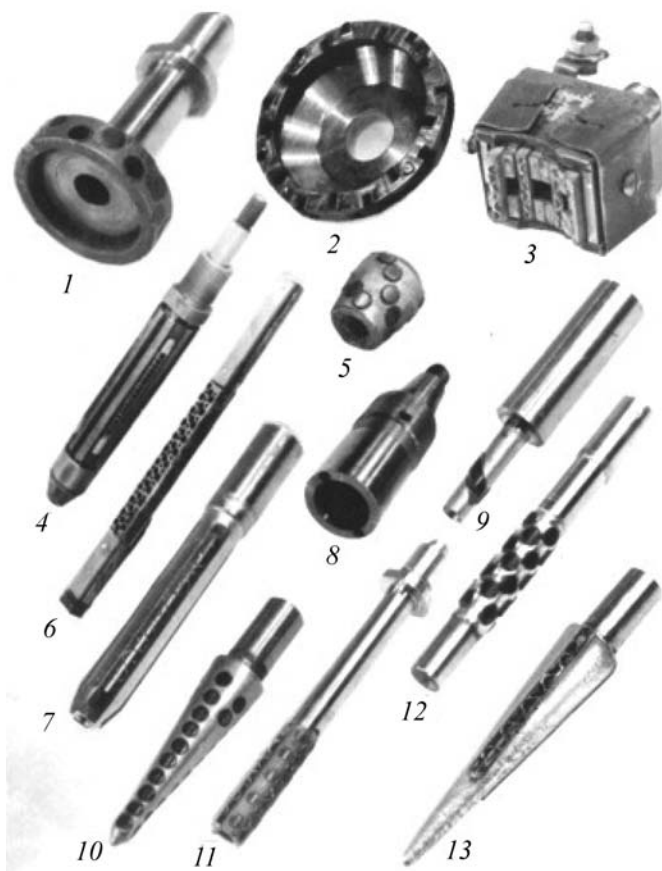
Поликристаллические катоды изготавливаются обычно заводом-потребителем, что обуславливается, с одной стороны, возможностью быстро получать катоды с формой и размерами, необходимыми ему в данный момент, часто минуя при этом стадии оформления, согласования и утверждения соответствующей технической документации на такие инструменты, а с другой стороны — возможностью исключить зависимость потребителя от заводов-поставщиков ПК в отношении сроков поставки и стоимости инструментов.

Целесообразность такого подхода к изготовлению ПК основывается еще и на том, что реставрация эксплуатировавшихся ПК, которая должна осуществляться силами потребителя, и изготовление новых инструментов предусматривают одни и те же технологические операции.

ПК представляет собой металлический корпус заданной формы, в который впаяны или вклеены поликристаллические элементы (ПЭ) — отдельные поликристаллы сверхтвердых материалов, призматические бруски или пластины.

В большинстве случаев корпус ПК изготавливают из стали 40Х или ей подобной. Возможно применение и других сталей, в том числе конструкционных. При необходимости впаивания поликристаллов в корпус с использованием недефицитных фосфорных припоев, корпус изготавливают из латуни ЛС59 (ЛС61). Корпус ПК состоит из рабочей части, в которой закрепляют поликристаллические элементы, и хвостовика с базовой посадочной поверхностью. Некоторые ПК вместо хвостовика имеют базовое отверстие для закрепления инструмента в шпинделе станка.

Для размещения ПЭ в корпусах катодов, в них фрезеруют пазы или сверлят отверстия требуемых формы и размеров. В некоторых



**Рис. 10.9. Поликристаллические катоды для АЭОПК:**

1 — круг прямого профиля; 2 — чашечный круг; 3 — головка катода для обработки круглых наружных поверхностей; 4 — хонинговальная головка; 5 — ПК для обработки трех зон канала волок; 6 — притир для ручной обработки канала волок с угловым профилем; 7 — ПК для обработки канала редуцирующих холодновысадочных матриц; 8 — трепан; 9 — ПК с сегментными поликристаллическими элементами; 10 — ПК для обработки деформирующей и калибрующей зон канала волок с поверхностным закреплением столбиков ПСТМ; 11 — катод с рядным—распределенным расположением поликристаллов; 12 — ПК с удлиненным корпусом для обработки внутренних поверхностей; 13 — конический ПК с рядным расположением поликристаллов для обработки конической зоны канала волок

случаях, например при закреплении ПЭ фасонной формы, отверстия (пазы) прошивают электроэрозионным способом (по общепринятой технологии).

Рабочая поверхность поликристаллов выступает над катодной поверхностью корпуса на 0,2...0,3 мм. Благодаря этому в процессе АЭОПК между ней и обрабатываемой поверхностью образуется межэлектродный зазор с высотой, равной этой величине. Через такой зазор при обработке протекает электролит и создаются условия для электрохимического растворения обрабатываемого материала.

**Поликристаллические элементы** (ПЭ) разнообразны. Они могут быть изготовлены из токо- и нетокопроводящих ПСТМ, алмазотвердосплавных пластин, отработанных алмазных волок, поликристаллов, получаемых прямым превращением графита в алмаз при высоких давлениях или в присутствии соответствующих сплавов — растворителей углерода, а также путем спекания порошков алмаза, кубического нитрида бора (сBN) в чистом виде или с активирующими добавками в условиях высоких статических давлений.

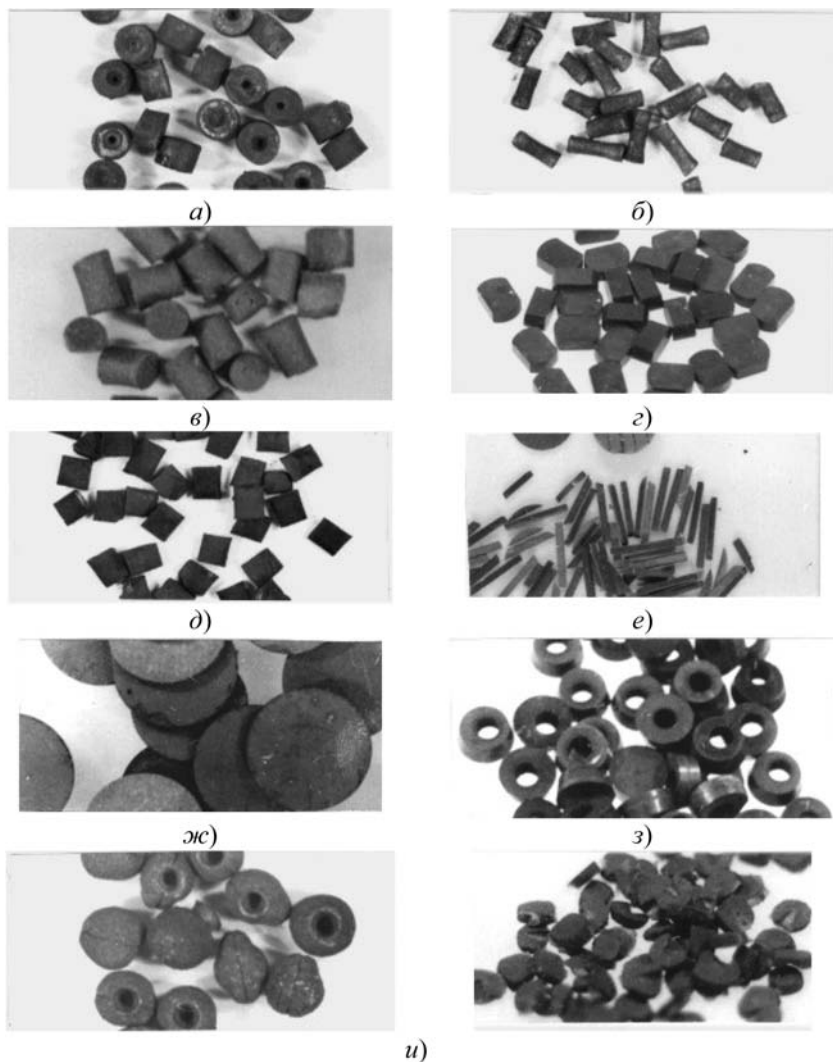
По форме ПЭ могут быть в виде столбиков, колец, дисков, пластин, полусфер, брусков, фигурных сегментов, усеченных конусов, трубок, а по структуре — с равномерным или лучистым распределением зерен внутри поликристалла (рис. 10.10).

В ПК применимы поликристаллы практически любых типов, выпускаемые промышленностью для изготовления режущих инструментов: карбонадо, баллас, карбонит, СВ, СКМ-Р, геотермал, эльбор-Р, гексанит-Р, киборит и др.

Основными характеристиками ПСТМ для ПК являются их износостойкость, токопроводимость и зеренная структура, определяющие соответственно эксплуатационную стойкость инструментов, возможность исключения или прохождения технологического тока через ПСТМ, а также получение обработанной поверхности с низкой шероховатостью.

Несмотря на то что износостойкость ПСТМ зависит от большого числа факторов (размера зерен, типа обрабатываемого материала, режимных параметров и др.), при выборе поликристаллов для катода можно ориентироваться на их твердость, коррелирующую с износостойкостью.

Для обеспечения при АЭОПК низкой шероховатости обрабатываемой поверхности, например, по твердому сплаву *Ra* 0,08, зерна



**Рис. 10.10. Поликристаллические элементы, используемые в катодах для АЭОПК:**

*а* — вставки СВ для алмазных волок; *б* — цилиндры СВА; *в* — цилиндры карбонита; *г* — пластины киборита; *д* — пластины эльбора-РМ; *е* — бруски, полученные электроэрозионным разрезанием алмазно-твердосплавных пластин; *жс* — пластины АТП; *з* — кольца карбонита; *и* — спеки баллас

алмаза или сBN в ПСТМ должны быть размером примерно 10 мкм. При этом в катодах, предназначенных для АЭОПК твердосплавных изделий, желательное использование ПСТМ на основе алмаза, а для обработки стальных — на основе сBN, химически инертного к железу и его сплавам.

Поликристаллы, пригодные для ПК, имеют обычно электрическое сопротивление 0,5...1,0 кОм и выше. Возможно применение ПСТМ и с меньшим сопротивлением. Зависит это от варианта осуществления АЭОПК.

В большинстве случаев ПСТМ должны иметь высокое электрическое сопротивление, позволяющее практически исключить прохождение тока через поликристаллы, контактирующие в процессе АЭОПК с обрабатываемой поверхностью при напряжении на электродах в несколько вольт, и выполняющие в этом случае свою основную роль — износостойких электроизоляционных прокладок между корпусом ПК и изделием. В токопроводящих поликристаллах выполнение такого требования может быть обеспечено их электроизоляционным покрытием, например, из эпоксидного клея. В этом случае электрическое сопротивление самих поликристаллов теряет свое значение.

Когда приходится обрабатывать отверстия малого диаметра, например в твердосплавных волокнах с каналом диаметром 2...3 мм и с использованием самого поликристалла в качестве катодной части ПК для прохождения через него технологического тока, то сопротивление его должно быть ориентировочно 20...100 Ом. При таком варианте АЭОПК технологический ток разветвляется на две составляющие: ток короткого замыкания, проходящий через ПСТМ и контактирующий с ними МС, и ток, проходящий через электролит в боковых зазорах между поверхностями специальных лысок на поликристалле и обрабатываемой детали.

Поликристаллам может быть придана различная форма путем их алмазного шлифования, электроэрозионной обработки (для токопроводящих ПСТМ), обработки свободным абразивом или лазерным лучом. Для шлифования поликристаллы обычно размещают в оправе и скрепляют стиракрилом. Иногда их скрепляют баббитом. Это позволяет осуществлять шлифование поликристаллов партиями в 150...200 шт. и более, а не в одиночку, и ускорять тем самым обработку ПЭ. Таким способом можно получать

пластины и сегменты, уменьшать габаритные размеры заготовок ПСТМ.

Для поликристаллических катодов разработана технология изготовления цилиндрических столбиков поликристаллов типа СВ диаметром 1,5...2,5 мм, длиной до 5 мм (см. рис. 10.10, б), что позволяет размещать их без предварительного шлифования в корпусах ПК малых размеров. Перед укладкой поликристаллов в пазы катода на торцах таких столбиков делают скосы под углом 15...20°. Это позволяет искусственно образовать длинный составной «поликристалл» с перекрытием их стыкующихся торцевых поверхностей.

**Поликристаллические бруски** (ПБ) составляют особую группу ПЭ. Целесообразность создания и применения их обусловлена, с одной стороны, отсутствием выпуска отечественной алмазной промышленностью длинных цилиндрических заготовок ПСТМ, необходимых для изготовления ПК, а с другой — стремлением максимально возможно упростить технологию их изготовления. Последняя при наличии ПБ должна сводиться к клеиванию ПБ в пазы корпуса заданной формы и последующему алмазному шлифованию рабочих поверхностей инструмента. При этом в ряде случаев обеспечивается достаточно высокая прочность соединения ПБ с корпусом катода благодаря сочетанию адгезионно-активного контакта ПСТМ с оправой и большей, чем в случае закрепления отдельных поликристаллов, площади клеевого соединения оправы с поверхностью паза, в котором закрепляется брусок.

Могут быть два типа ПБ: цельные и составные. *Брусок первого типа* представляет собой призматический стержень, получаемый из цилиндрических или дисковых заготовок ПСТМ путем их разрезания на отдельные части алмазным отрезным кругом, с помощью лазера или электроэрозионным способом (профильным или непрофилированным электродами). Токпроводящие поликристаллы обрабатывают электроэрозионным способом, поликристаллы с большим электрическим сопротивлением — с помощью алмазного круга или лазера.

В настоящее время наиболее распространенными в алмазной промышленности являются дисковые заготовки ПСТМ диаметром 7, 13, 30 мм, хотя изготавливают поликристаллы диаметром и до 50 мм. Электроэрозионным разрезанием легко получать тонкие ПБ, например, с поперечным сечением 1,0×1,0 мм из алмазно-

твердосплавных пластин (АТП) (см. рис. 10.10, *e*), необходимые для изготовления мелкогазмерных ПК. При разрезании заготовок ПСТМ с помощью лазера характеристики обработки по точности, в большинстве случаев, ниже, чем в случае электроэрозийной.

Поликристаллический *брусок второго типа* — составной, представляет собой металлическую желобчатую оправу, согнутую из жести толщиной 0,1...0,2 мм, или медную такой же толщины. Внутри оправы уложены в определенном порядке и скреплены между собой, а также с оправой адгезионно-активной металлической связкой сегменты, цилиндрические заготовки или пластины ПСТМ. В поликристаллических брусках такого типа открытая, рабочая поверхность поликристаллов шлифована с целью обеспечения одинакового размера граней бруска по его высоте. Здесь целесообразно использование нетокопроводящих зерен алмаза.

Нетокопроводящие бруски, полученные из круглых заготовок нетокопроводящих ПСТМ алмазным шлифованием по общепринятой технологии, припаивают к корпусам ПК серебряным припоем. Пайке поддаются только металлизированные поликристаллы. Наиболее прочной является вакуумная металлизация с адгезионно-активными компонентами припоя. Приемлемым, с точки зрения простоты, удобства и стоимостных показателей, можно считать также никелевое покрытие ПСТМ, особенно при небольших партиях ПБ.

ПБ с клеевым соединением ПСТМ представляют собой ряд скрепленных круглых заготовок, пластин или сегментов ПСТМ как и в предыдущем случае, но без оправы. Такие бруски получают путем заливки ПСТМ, уложенных в тонкостенную оправу из фольги (обычно медной) толщиной 0,05...0,1 мм, эпоксидным клеем с последующим извлечением из нее склеившихся в форме бруска поликристаллов. Для более прочного закрепления поликристаллов в клеевой массе их предварительно металлизуют гальваническим способом, благодаря чему они приобретают развитую поверхность.

ПБ комбинированного типа представляют собой оправы, к донной поверхности которых припаяны ПСТМ, а пространство между поликристаллами и боковыми стенками оправы заполнено клеем или каким-либо другим нетокопроводящим уплотнителем.

Расположение ПЭ в корпусах оказывает существенное влияние на работоспособность ПК и обеспечиваемые ими технологические

показатели обработки. Основными требованиями к расположению ПЭ в корпусах являются: обеспечение наибольшей возможной катодной поверхности, определяющей в определенной степени силу технологического тока, затрачиваемого на анодное растворение металла; прочное закрепление ПЭ в корпусах катодов; расположение рабочих поверхностей ПЭ в одной плоскости или на одном диаметре, что обеспечивает формирование гладкой полированной поверхности (без следов — царапин).

Основными видами расположения ПСТМ в корпусах ПК являются рядное (рис. 10.11, *a–e*), распределенное (рис. 10.11, *ж, з*), рядно-распределенное (рис. 10.11, *и, к*). Распределенное расположение ПСТМ может быть винтообразным (рис. 10.11, *ж*), в шахматном порядке (рис. 10.11, *з*), произвольным. Заготовки ПСТМ размещают в корпусе ПК так, чтобы в процессе обработки при вращении и поступательном движении инструмента обеспечивалась зачистка ими всех участков обрабатываемой поверхности от продуктов электрохимических реакций.

Рядное расположение характерно для поликристаллических брусков, особенно тонких, шириной 1,5...2,0 мм, высотой до 2,5 мм. Эффективно оно и в случае использования крупных круглых заготовок ПСТМ (диаметром до 7 мм). При рядном расположении поликристаллов в ПК обеспечивается перекрытие их одного другим, исключая зазоры между смежными поликристаллами. Благодаря этому ПК с рядным расположением ПСТМ могут быть использованы при обработке не только по схеме многопроходного, но и по схеме шлифования невращающимся инструментом (с осцилляцией). Рядное расположение поликристаллов позволяет размещать в корпусе инструмента не только поликристаллические элементы, но и алмазно-абразивные бруски. Тем самым обеспечивается возможность удаления ими специально нанесенного на обрабатываемую поверхность электроизоляционного покрытия, предохраняющего от электрохимического растравливания участки поверхности, смежные с обрабатываемым. Это, в свою очередь, позволяет во многих случаях повысить точность формирования поверхности при АЭОПК.

Распределенное расположение — наиболее простое и легко реализуемое. В технологическом плане изготовление таких ПК сводится к закреплению поликристаллических заготовок в радиально



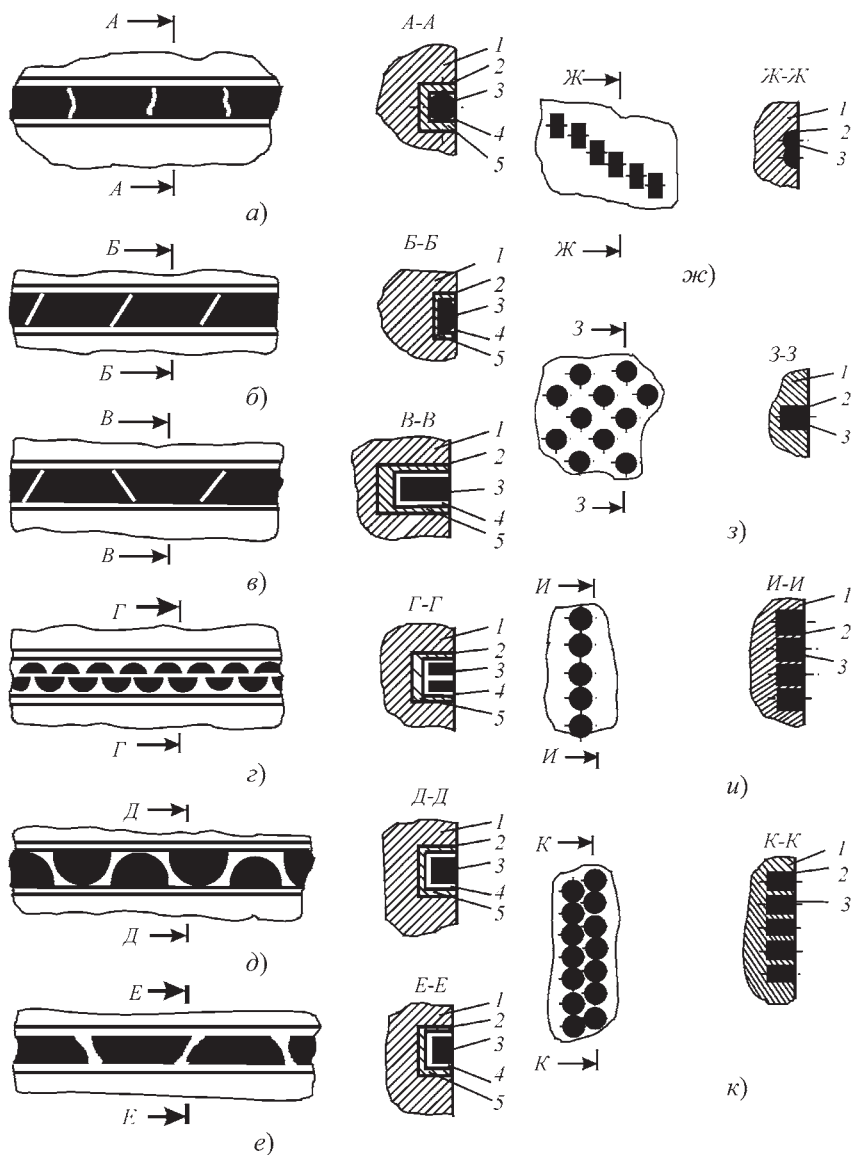


Рис. 10.11. Варианты расположения ПСТМ в корпусах ПК и оправках ПБ:

1 — корпус; 2 — клеевой шов; 3 — поликристалл; 4 — связка-припой;  
5 — оправка

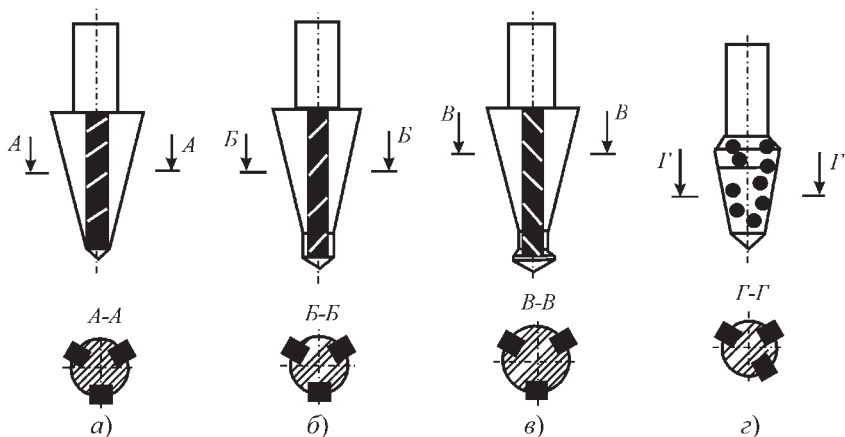
просверливаемых отверстиях корпуса. При этом закрепление поликристаллов достаточно прочное.

К достоинствам распределенного способа расположения поликристаллов следует отнести возможность замены отдельных поликристаллов (в случае непредвиденного разрушения ПСТМ) новыми без нарушения закрепления других, и обеспечение прочного закрепления поликристаллов в корпусе, особенно при использовании их коротких цилиндрических заготовок. Разновидностью распределенного расположения элементов ПСТМ в корпусах ПК является рядное-распределенное. ПК с таким расположением ПСТМ легко изготавливаемы, но используются, главным образом, при АЭОПК по схеме многопроходного шлифования. Расстояние между рядами поликристаллов в таких катодах с цилиндрической рабочей поверхностью диаметром 5...15 мм при выступании из корпуса их рабочих поверхностей на 0,3 мм находится в интервале 2,4...4,2 мм (увеличивается соответственно диаметру ПК). При распределенном размещении ПСТМ необходимо учитывать диаметр и высоту используемых заготовок поликристаллов для того, чтобы исключить их касание друг с другом внутри тела корпуса.

**Поликристаллические катоды для обработки канала волок.** Основными технологическими разновидностями АЭОПК канала волок являются: обработка деформирующей (конической) зоны, деформирующей и калибрующей зон, формирование всего канала. Обработка деформирующей зоны проводится при удалении припуска на обработку, равного нескольким десятым долям миллиметра, в волокнах с диаметрами каналов  $d_k \geq 3$  мм, а обработка двух и трех смежных зон канала в волокнах с диаметрами каналов  $d_k \geq 5$  мм — и при меньших припусках.

Для ПК, используемых при АЭОПК канала твердосплавных волок, приняты четыре формы их рабочей части: коническая, конусно-цилиндрическая, комбинированная и бочкообразная (с двусторонними коническими поверхностями) (рис. 10.12).

Конические ПК предназначены для обработки деформирующей или выходной зон канала волокни, конусно-цилиндрические — для обработки деформирующей и калибрующей зон, в том числе скругленного перехода между зонами, комбинированные и бочкообразные — для обработки деформирующей, калибрующей и выходной зон канала.

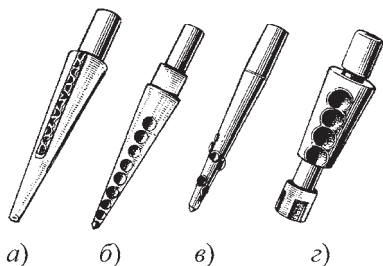


**Рис. 10.12. Конструкции поликристаллических катодов для АЭОПК твердосплавных волок:**

*a* — конического; *б* — конусно-цилиндрического; *в* — комбинированного; *г* — бочкообразного

Вариант расположения ПЭ в катодах (рис. 10.13) выбирается в зависимости от размеров катода и имеющихся у потребителя ПЭ. Распределенное и рядное распределенное винтообразное расположение почти одинаковы. Различие лишь в том, что второе уподобляется однозаходному, а первое — многозаходному зенкерам.

Особую группу ПК составляют инструменты с кольцами поликристаллов, нанизанных пирамидально на осевой стержень катода (рис. 10.14) и спаянных в таком положении. Такие ПК используются для обработки волок с каналом малого диаметра ( $d_k = 2...3$  мм), когда



**Рис. 10.13. Катоды с различным расположением поликристаллических элементов:**

*a* — рядным; *б* — рядно-распределенным; *в* — винтообразным; *г* — рядно-распределенным с алмазно-абразивными брусками на цилиндрическом участке

**Рис. 10.14.** Поликристаллические катоды для АЭОПК каналов в волокнах малых типоразмеров



обычные конические катоды с закреплением на их концах ПЭ без острых вершин и ребер изготовить практически невозможно из-за малых размеров конуса инструмента.

Поликристаллические кольца получают из дисковых или цилиндрических заготовок ПСТМ с помощью лазера и последующей ультразвуковой доработки. Если ПЭ состоит из токопроводящих поликристаллов, то отверстия в цельных заготовках прошивают электроэрозионным способом.

Для того чтобы в процессе АЭОПК на обрабатываемой поверхности не оставались следы от стыков смежно соединяемых ПЭ, их располагают наклонно по отношению к оси вращения инструмента. На боковой поверхности поликристаллической части такого ПК параллельно образующим конической поверхности или под углом  $1...2^\circ$  к ним выполняют алмазным шлифованием  $1...3$  и более лысок. К поверхности лысок приклеивают полоски фольги толщиной  $0,1...0,2$  мм из меди, латуни или нержавеющей стали. В процессе обработки они играют роль катодных элементов, через которые к электролиту подходит технологический ток.

Если в ПК используются токопроводящие ПСТМ, припаяваемые к корпусу катода, то роль катодных элементов выполняют поверхности самих лысок. Электрическое сопротивление заготовок ПСТМ для таких ПК —  $5...30$  Ом.

Значительно расширяют возможности АЭОПК комбинированные инструменты-катоды, оснащаемые поликристаллическими и алмазно-абразивными элементами. Необходимость в них вытекает из сложности исправления исходной формы обрабатываемого отверстия путем только электрохимического растворения сплава, когда приходится удалять значительный припуск, так как при АЭОПК обычно материал удаляется электрохимическим растворением эквидистантно исходной форме обрабатываемой поверхности.

При необходимости выравнивать поверхность отверстия или устранять значительную его конусность, а в общем случае — локализовать электрохимическое растворение на требуемых участках, где должен происходить съем металла или сплава, поверхность покрывают тонким слоем электроизоляционного клея, например, УП 5–207. В процессе обработки участков канала, на которых требуется обеспечить растворение сплава для послойного выравнивания обрабатываемой поверхности, клей необходимо счищать. Для этого и используются алмазно-абразивные элементы, в большинстве случаев алмазно-абразивные бруски, выполняющие в процессе обработки роль абразивных скребков.

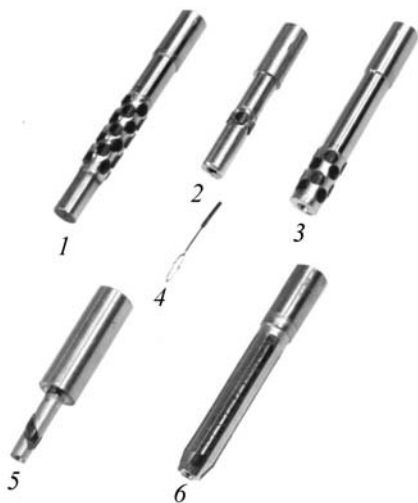
Возможность осуществления такого технологического приема основывается на практически одинаковой производительности АЭОПК вращающимся и невращающимся инструментом в случае неизменяемой частоты вращения обрабатываемой заготовки, как это имеет место при внутреннем шлифовании. Это позволяет вначале зачищать алмазно-абразивным элементом ПК наиболее выступающие неровности обрабатываемой поверхности, обеспечивая их опережающее электрохимическое стравливание. Затем, повернув соответствующим образом инструмент, проводят доводку поликристаллическими элементами, включая стадию полирования.

К этой группе комбинированных инструментов примыкают алмазно-абразивные сверла или зенкеры, оснащаемые поликристаллами сверхтвердых материалов. Они позволяют получать одним инструментом отверстия в цельной заготовке или удалять большой припуск на обработку, а также доводить полученную поверхность до обеспечения заданных параметров по точности и качеству. При этом на этапе черного съема может быть устранен эксцентриситет или овальность отверстия без предварительного покрытия поверхности его стенки клеевой изоляцией. Особенно эффективно использование комбинированных конических зенкеров при обработке неглубоких цилиндрических отверстий.

*Инструменты для АЭО каналов твердосплавных холодновысадочных матриц* имеют форму, негативную по отношению к форме обрабатываемых зон каналов (цилиндрическую, коническую, ступенчатую, сферическую и др.) (рис. 10.15). Они могут быть алмазно-абразивными или поликристаллическими.

**Рис. 10.15. Поликристаллические катоды для обработки каналов холодновысадочных матриц:**

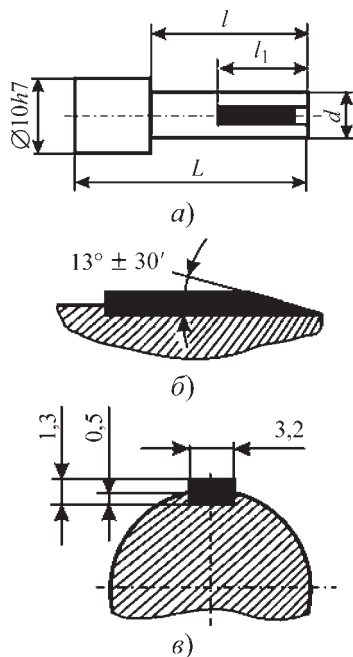
1 — с двусторонним удлинением корпуса; 2 — с коротким рядом поликристаллов; 3 — с односторонним удлинением корпуса; 4 — с пружинным корпусом; 5 — с сегментами поликристаллов; 6 — с коническим и цилиндрическим участками ПСТМ



*Алмазно-абразивные инструменты* бывают с алмазонасным слоем двух видов: на гальванической или металлокерамической связках с высокопрочными алмазами AC15, AC20.

Инструменты с алмазонасным слоем на гальванической (обычно никелевой) связке характеризуются высокими производительностью и стабильностью режущих свойств. Вместе с тем, такие инструменты имеют всего 1–2 слоя алмазов и, следовательно, характеризуются непродолжительным сроком службы. Кроме того, выравнивание алмазонасного слоя (часто приобретающего в процессе закрепления гальваническим способом алмазов на стальном корпусе инструмента неровности и дендритовые наросты) затруднено, так как абразивная правка инструмента может привести к ощутимому или даже полному удалению алмазонасного слоя с его корпуса. На практике в таких инструментах прочность соединения их алмазонасного слоя с корпусом не всегда достаточна.

Указанные недостатки отсутствуют в инструментах с алмазонасным слоем на металлокерамических связках. Согласно нормативной документации, такие инструменты имеют алмазонасный слой диаметром 4...20 мм, длиной 4...20 мм, толщиной 1,2...6,6 мм при общей длине инструмента 40...80 мм. Для шлифования каналов холодновысадочных матриц эффективно также применение алмаз-



**Рис. 10.16. Катод с алмазно-абразивным бруском:**

*a* — схема ( $L$  — общая длина катода;  $l$ ,  $d$  — длина и диаметр рабочей части катода;  $l_1$  — длина бруска); *б*, *в* — продольное и поперечное сечение катода

ных инструментов типа А8 (А1ПП) с алмазосным слоем диаметром 6...13 мм, длиной 6...10 мм.

Широкие возможности в создании инструментов для обработки твердосплавных холодновысадочных матриц открывает листовой алмазосный прокат. Промышленность выпускает пластины недеформированного проката толщиной 0,15...6,3 мм с порошками алмаза АСМ, АСН зернистостью 20/14...60/40 и алмазами АС6, АС15, АС20, АС32 зернистостью 50/40...500/400 на связках М2-01 и М5-22. Ширина и длина пластин равняется 100...400 мм. Из таких пластин электроэрозионным способом вырезают бруски, которые затем вклеивают в корпуса инструментов (рис. 10.16).

Для инструментов, применяемых в процессах АЭО, эффективно могут быть использованы и серийно выпускаемые промышлен-

ленностью хонинговальные бруски типа АБХП 60×3×1,5×4,9×2 АС32 250/200 100 МП1, которые клеивают в соответствующие пазы корпуса катода и шлифуют после этого абразивными кругами по известной технологии для придания инструменту необходимой формы. При этом обеспечивается выступание рабочей (прошлифованной) поверхности алмазоносного слоя брусков над корпусом на 0,5 мм.

Алмазно-абразивные инструменты, несмотря на их высокую эффективность, позволяют осуществлять только предварительный, черновой съем основного припуска на обработку.

Черновой съем сплава в сочетании с доводочными операциями при высокой стойкости рабочего инструмента осуществляется *поликристаллическими катодами*. Разработаны конструкции ПК для обработки сквозных цилиндрических каналов, а также деформирующих зон каналов матриц. Такие катоды имеют рядное и ряднораспределенное расположение поликристаллических элементов в корпусах. В них используются поликристаллы типа СВ, карбонита, эльбора-Р, киборита и другие в форме цилиндров, пластин, сегментов, дисков.

При АЭОПК съем твердого сплава происходит в основном за счет его электрохимического растворения в условиях «абразивного трения», и производительность процесса обработки при прочих равных условиях зависит от силы технологического тока, которая определяется катодной площадью ПК. Следовательно, чем меньшее количество поликристаллов находится в корпусе катода, тем больше его катодная площадь и должен быть выше технологический ток (скорость съема сплава). С этой точки зрения наиболее приемлемыми являются однорядные ПК.

В однорядных катодах длинные поликристаллы могут быть глубоко посажены в корпуса и, следовательно, прочно закреплены в них с помощью клея. Вместе с тем однорядные инструменты используют главным образом при невращающемся шпинделе. В случае отгибания инструмента под действием радиальной силы его прижима, ПЭ могут оставлять на обрабатываемой поверхности винтообразный след-царапину, если ряд ПСТМ короткий, или контактировать с поверхностью только небольшим участком ряда, исключая возможность обработки всей поверхности отверстия, если ряд поликристаллов длинный.



Большими возможностями обеспечить низкую шероховатость обработанной поверхности (до  $Ra\ 0,08$ ) обладают многорядные ПК (см. рис. 10.15, б).

Так как применение инструментов с короткими рядами поликристаллов повышает вероятность появления на поверхности отверстия винтовой царапины, то короткорядные ПК целесообразно использовать в основном для предварительного съема основного припуска.

В удлиненных корпусах ПК длины катодных участков до и после поликристаллов должны равняться длине отверстия для того, чтобы при осевой осцилляции инструмента в любой момент обработки растворение сплава происходило постоянно по всей поверхности канала матрицы.

Диаметр  $d$  катодной части ПК (см. рис. 10.16, а) в одно- и многорядных катодах целесообразно выбирать наиболее близким к диаметру канала матрицы, т.е. меньшим, например, на  $0,5...1,0$  мм; высота выступания в них поликристаллов над корпусом должна быть равной  $0,3...0,5$  мм (см. рис. 10.16, в).

Разновидностью короткорядных ПК являются катоды с двумя поликристаллическими сегментами, закрепленными под углом к оси инструмента (см. рис. 10.15, 5). Такие катоды не оставляют глубоких следов-царапин на поверхности канала. Еще лучшими являются ПК с одним эллипсовидным поликристаллическим диском, закрепленным под углом к оси инструмента, а не с двумя половинками поликристаллов.

Для черновой АЭО каналов малого диаметра ( $3...4$  мм) в твердосплавных заготовках холодновысадочных матриц могут быть использованы также инструменты-катоды, представляющие собой стержни сегментного сечения из пружинной проволоки с припаяваемыми к ним алмазно-абразивными или поликристаллическими элементами.

При АЭОПК съем сплава происходит практически только путем его электрохимического растворения с эквидистантным копированием исходной формы обрабатываемой зоны канала матрицы. Если на ней имеются неровности, овальность, конусность, то исправить их многопроходной АЭОПК практически невозможно. Поэтому перед обработкой поверхность канала матрицы покрывают тонким слоем электроизоляционного материала, например клея

УП 5-207, выполняющего в данном случае роль защитного экрана от электрохимического растворения сплава. При вращении заготовки и осевой осцилляции контактирующего со сплавом катода осуществляется зачистка от клея поверхностей на выступах микронеровностей и обеспечивается возможность их электрохимического травливания. Послойная зачистка поверхности от клея происходит и на других участках поверхности по мере съема сплава. Процесс локализованного съема сплава в итоге приводит к выравниванию поверхности. Для этого ПК должен иметь абразивный участок, например, в форме бруска, позволяющий осуществлять зачистку поверхности от электроизолирующего покрытия. Требование становится выполнимым благодаря возможности вести обработку невращающимся ПК при повороте его поочередно алмазно-абразивным или поликристаллическим участками для контактирования с обрабатываемой поверхностью.

Так как при АЭОПК периферийной частью инструмента-катода абразивного съема сплава не происходит, то сила прижима его к обрабатываемой поверхности на этапе черного, электрохимического съема невращающимся ПК может быть небольшой (5...10 Н). Для этапа доводки полученной поверхности невращающимся инструментом такое усилие прижима является недостаточным, и на этапе доводки инструменту придают вращение. Чтобы абразивный участок комбинированного ПК при этом не оставлял на сплаве царапин, рабочую поверхность алмазно-абразивного бруска при изготовлении ПК занижают относительно рабочей поверхности поликристаллов.

К длиннорядным ПК относятся поликристаллические катоды типа хонинговальных головок (рис. 10.17). Такие инструменты используются при вращении только обрабатываемой заготовки и характеризуются теми же достоинствами, что и однорядные ПК. В них есть один подвижный хонинговальный брусок и два опорных. Опорные и подвижный бруски контактируют с обрабатываемым изделием благодаря разжимному усилию, создаваемому внутренней пружинной хонинговальной головки через ее шток. Когда припуск окажется равным нулю, автоматически отключается источник технологического тока и подается сигнал для перехода станка на осуществление доводки. Так как ход подвижного хонинговального бруска не превышает 1 мм, то разность диаметров канала и



Рис. 10.17. Хонинговальная головка с поликристаллическим бруском

хонинговальной головки также не может превышать 1 мм, что вносит ограничения в номенклатуру хонинговальных брусков и головок для такой разновидности АЭОПК.

**Инструменты для АЭОПК канала малого диаметра в твердосплавных холодновысадочных матрицах.** Проблемными вопросами в обработке твердосплавных холодновысадочных матриц являются изыскание способов повышения производительности труда на операции обработки длинных каналов малого диаметра (3...6 мм) и улучшение качества обработанной поверхности на внутренних конических переходах в редуцирующих матрицах. Для их решения приняты две принципиальные схемы АЭОПК канала матриц: обработка прутковым (или трубчатым) ПК, закрепляемым в растягивающих его центрах, и обработка стержневым катодом, перемещающимся по оси канала подобно развертке.

Одной из специфических особенностей АЭОПК является отсутствие прирабатываемости поликристаллических элементов катода по форме в процессе обработки, что обуславливается их ролью в процессе АЭОПК. Износостойкие электроизоляционные прокладки между катодной и обрабатываемой поверхностями регламентируют высоту межэлектродного зазора между ними и удаляют с металла или сплава продукты электрохимических реакций. Микрорезания они не проводят и поэтому очень мало изнашиваются.

Из-за отсутствия прирабатываемости поликристаллического катода необходимо обеспечивать его минимально возможный изгиб при обработке. В связи с этим в основу разработки конструкции устройств для АЭОПК канала холодновысадочных матриц малого диаметра положена принципиальная схема обработки при двустороннем закреплении двухопорного ПК в растягивающих центрах с

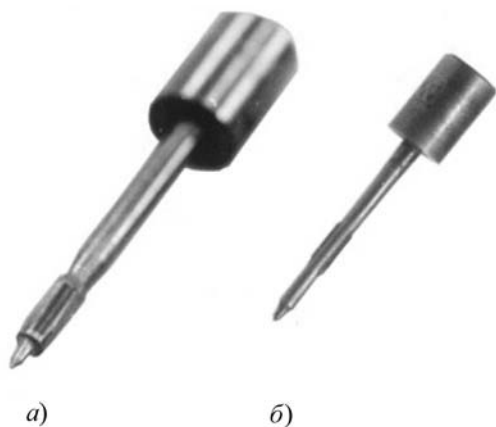
установкой упоров люнетного типа на входе и выходе канала матрицы. Двухопорный поликристаллический катод (ДПК) представляет собой цилиндрический корпус диаметром 3...6 мм, имеющий с двух сторон кольцевые проточки на глубину 0,2 мм. Этими участками корпус входит в радиальные пазы специальных упорных шайб, вставляемых в растягивающие центры в устройства для установки инструмента. В средней части корпуса поликристаллический и алмазно-абразивный элементы закрепляют пайкой или с помощью клея. Пазы под них в корпусе прошивают электроэрозионным способом. В качестве поликристаллических элементов целесообразно использование геотермала, СВ, карбонита, киборита, СКМ-Р и им подобных материалов.

Алмазно-абразивный элемент ДПК закрепляется в плоскости, перпендикулярной плоскости основного ряда поликристаллов. В процессе обработки ДПК не вращается. Его только поворачивают в зависимости от того, каким элементом необходимо работать на данной стадии формирования поверхности — абразивным или поликристаллическим.

С целью улучшения условий подачи электролита в зону съема сплава корпус ДПК изготавливают трубчатым с односторонним боковым пазом. В процессе обработки электролит подается внутрь трубчатого корпуса через растягивающие центры и поступает в зону обработки через боковой паз, что обеспечивает равномерное распределение электролита в зоне съема сплава.

Стержневой поликристаллический катод (СПК) (рис. 10.18, а) предназначен для съема припуска на обработку в твердосплавных заготовках матриц с диаметром канала 3...6 мм. Он может быть использован также для доводки внутренней конической поверхности редуцирующего участка канала. В этом случае размеры и форма рабочей части катода задаются в соответствии с размерами, указанными в чертеже на матрицу.

СПК представляет собой цилиндрический стержень с заданными диаметром и длиной, имеющий на одном конце цилиндрический хвостовик диаметром 10 мм для установки и закрепления инструмента в шпинделе станка, а на другом — поликристаллический элемент с конической, направляющей осевое перемещение СПК в процессе обработки, и цилиндрической (калибрующей) поверхностями. Рабочие поверхности поликристаллов выступают



**Рис. 10.18.** Стержневые поликристаллические катоды для АЭОПК канала твердосплавных холодновысадочных матриц:

*a* — катоды с поликристаллическим элементом в концевой части корпуса; *б* — в его середине

из корпуса катода на 0,2...0,3 мм, а сам корпус, кроме конического участка, покрывается тонким (толщиной до 0,05 мм) слоем электроизоляционного лака или клея, например, УП 5—207. Благодаря электроизоляционному покрытию исключается электрохимическое растравливание поверхности канала, расположенной за цилиндрическим участком СПК при углублении инструмента, и тем самым уменьшается конусность формируемого канала.

В случае обработки такими катодами редуцирующих матриц угол заходной части СПК выбирается равным углу конического перехода внутри канала матрицы.

С целью интенсификации алмазно-электрохимического съема сплава путем усиления коррозионного микроразрушения обрабатываемого слоя в таких СПК целесообразно применять поликристаллические элементы из крупных алмазных зерен, обеспечивающих микрорезание при глубоком поверхностном коррозионном растрескивании сплава.

Разновидностью СПК являются катоды с поликристаллическими элементами, расположенными в средней части его цилиндрического корпуса (см. рис. 10.18, б). Обработка такими катодами осуществляется по схеме многопроходного шлифования при упругой поперечной подаче невращающегося инструмента. Его ход при этом не может быть больше половины длины СПК, что определяет длину канала матрицы, обрабатываемой катодом рассматриваемого типа. При осцилляции СПК с поликристаллическим элементом в середи-

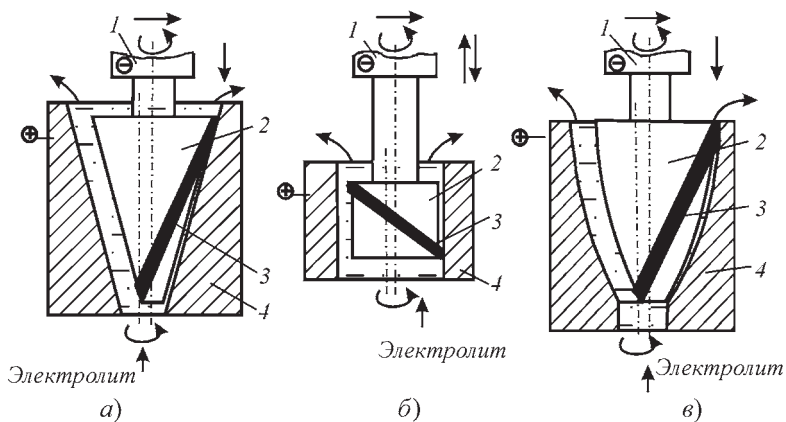
не корпуса, в любой момент обработки подвергается электролитическому растворению вся поверхность канала, а поликристалл счищает с нее продукты электрохимических реакций. Благодаря этому обеспечивается высокая производительность при черновом съеме сплава. Если в таком СПК располагают с одной стороны корпуса мелкозернистый, а с другой крупнозернистый поликристаллы, то после чернового съема сплава представляется возможным проводить мелкозернистым поликристаллом и доводку обрабатываемой поверхности на уровне полирования.

**Эллиптические поликристаллические катоды (ЭПК)** — качественно новая разновидность ПК: катоды с синусоидально перемещающейся при вращении инструмента и заготовки точкой постоянного контакта эллиптического пластинчатого или сегментных элементов ПК с обрабатываемой поверхностью.

Они характеризуются повышенной эксплуатационной стойкостью по форме, а также улучшенным качеством обработанной ими поверхности. В таких ПК наружная поверхность поликристаллического элемента представляет собой замкнутую кривую, охватывающую катодную поверхность корпуса так, что точки этой кривой, находящиеся в наиболее отстоящих один от другого радиальных сечениях катодной поверхности инструмента, лежат по разные стороны от оси его вращения. ПЭ может быть выполнен в виде пластины (рис. 10.19). Кроме того, инструмент может быть снабжен дополнительными ПЭ, установленными параллельно основному или под углом к нему (рис. 10.20).

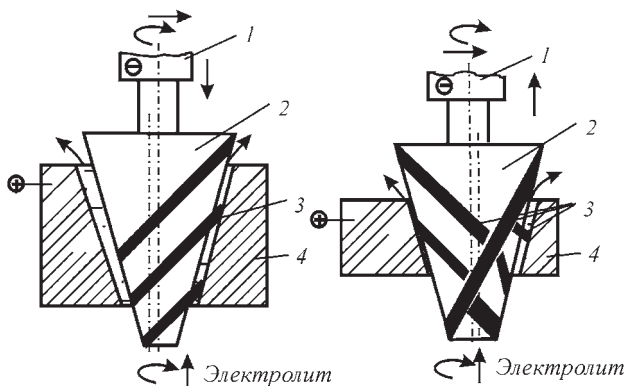
В эллиптических ПК поликристаллический элемент, выполненный в форме пластины, площадь контакта которой для склеивания с корпусом равняется нескольким квадратным миллиметрам и более, обеспечивает благодаря этому достаточную прочность их соединения, только небольшим своим участком выходит на торцевую катодную поверхность ПК. Таким образом, даже в мелкоразмерных ПК на всех его участках обеспечивается наличие катодной и поликристаллической поверхностей при прочном скреплении ПЭ с корпусом. Одновременно (благодаря выступанию ПЭ из корпуса) исключается возникновение электромеханического контакта между катодной и обрабатываемой поверхностями.

Катоды этой группы состоят из металлического корпуса, в котором под углом к оси вращения инструмента закреплен ПЭ с высту-



**Рис. 10.19.** Принципиальные схемы АЭОПК катодами с эллиптическими поликристаллическими пластинами отверстий:

*a* — конических; *б* — цилиндрических; *в* — фасонных; 1 — инструмент; 2 — корпус катода; 3 — эллиптическая поликристаллическая пластина; 4 — обрабатываемая заготовка



**Рис. 10.20.** Принципиальные схемы АЭОПК отверстий катодами с эллиптически-ми пластинами ПСТМ, расположенными в корпусах параллельно основной пластине (*a*) и под углом к ней (*б*):

1 — инструмент; 2 — корпус катода; 3 — поликристаллическая пластина; 4 — обрабатываемая заготовка

панием над корпусом. В качестве ПЭ используются пластины карбонита, киборита, АТП, СВ и др.

Ввиду того что выпускаемые промышленностью поликристаллы ограничены в размерах, а ПК целесообразно в некоторых случаях изготавливать длинными или большими в диаметре, то ПЭ могут быть образованы также соединением нескольких ПСТМ с приданием ПЭ алмазным шлифованием требуемой формы.

Для обработки эллиптическими ПК ход осевой осцилляции выбирают таким, при котором наиболее удаленные один от другого участки ПЭ не заходили бы за торцевые кромки внутрь отверстия. Если длина отверстия меньше длины катода, то возможны контакты его корпуса между поликристаллическими элементами с обрабатываемой поверхностью, возникновение электрических разрядов между ними, порча катода и поверхности отверстия. Происходит это вследствие «проваливания» упруго прижимаемой к ПК вращающейся заготовки в местах между противоположными участками поликристаллического элемента, выступающего на 0,2...0,3 мм из корпуса катода.

Чтобы избежать «проваливания», в катоде (см. рис. 10.20) под углом к основному или параллельно ему, закрепляют дополнительные ПЭ, благодаря чему появляются опорные поликристаллические участки катода. То же относится к обработке конических и фасонных отверстий или полостей.

В случае обработки цилиндрических отверстий или расшлифывания конических, когда заготовке придают вращение, инструмент-катод в каждый данный момент контактирует своим поликристаллическим элементом с поверхностью сплава по микродуге, образуемой касанием ПСТМ по винтовой линии с цилиндрической или конической поверхностями. При вращении (повороте) инструмента-катода участок касания перемещается за каждый оборот по всему периметру ПЭ, а на обрабатываемой поверхности остается след от контактирования вращающихся (цилиндрической и конической или двух цилиндрических) поверхностей. При этом траектория контакта имеет вид синусоиды. Так как в процессе обработки все участки рабочей поверхности контактируют с обрабатываемой одно и то же время и при одинаковых условиях, то износ ПЭ происходит равномерно по всему его периметру. Поэтому не требуется реставрировать ПЭ круглым алмазным шлифованием.



По мере износа ПЭ требуется лишь обеспечить выступание рабочей поверхности ПЭ относительно катодной на 0,2...0,3 мм, что осуществляется обычно электролитическим травлением корпуса катода по известной технологии.

В таких ПК представляется возможным размещать ПЭ на участках корпуса с диаметром, например 3...4 мм, обеспечивая при этом прочие условия, необходимые для АЭОПК отверстий малого диаметра. В этом случае пластинчатый ПЭ может иметь толщину 1...2 мм, что практически выполнимо с помощью электроэрозионной и алмазной обработки цилиндрических заготовок или пластин ПСТМ. При таких условиях обеспечиваются условия достаточно прочного соединения ПЭ с корпусом катода.

### **10.2.3. Инструменты для алмазно-электрохимического сверления**

*Конструкции инструментов для алмазно-электрохимического сверления (АЭС)* отличаются между собой в зависимости от области применения (разновидностей АЭС в сочетании с вариантами обработки), конструкции и характеристики алмазоносного слоя (т.е. от связки, марки, зернистости и концентрации алмазов).

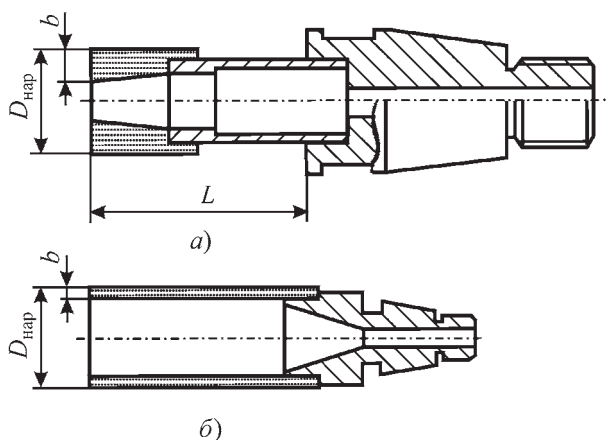
Для осуществления АЭС применяют сверла-трепаны, конические круги, инструменты с фасонной рабочей частью. В основу их разработки положено полное или частичное выполнение следующих общих требований к конструкции и алмазоносному слою: возможность предварительного формирования и последующего расшлифовывания отверстия одним и тем же инструментом без переустановки на станке его и обрабатываемой заготовки; обеспечение условий для реализации принудительной подачи электролита в рабочий зазор; сокращенная номенклатура и универсальность; обеспечение искусственной концентрации технологического тока в направлении съема обрабатываемого материала; применение высокотвердых электроэрозионностойких связок, прочно удерживающих алмазные зерна; обеспечение наименьшего биения инструмента после закрепления его в шпинделе станка.

*Алмазно-абразивные сверла-трепаны (АСТ).* Основная область применения АСТ — формирование внутренних цилиндрических поверхностей в цельных или уже имеющих отверстия заготовках.

Такие инструменты могут использоваться также для формирования ступенчатых отверстий.

По назначению АСТ разделяют на сверла, используемые только для получения отверстия в цельной заготовке или удаления основного припуска на обработку в заготовках, уже имеющих отверстия, и сверла, обеспечивающие, помимо получения отверстий, их расшлифовывание. В большинстве случаев АСТ второго типа отличаются дополнительным, периферийным алмазосносным слоем. Кроме того, АСТ могут быть с кольцевым (т.е. невысоким) или трубчатым алмазосносным слоем (рис. 10.21). Сверло-трепан состоит из хвостовика, к которому припаивается (латунью) металлический трубчатый корпус с алмазосносным слоем.

Если алмазосносный слой (обычно кольцевой) сформирован на металлокерамической связке, то он скрепляется с корпусом при спекании. Если же алмазосносный слой (обычно трубчатый) формируется методами гальванопластики, экструзии или из алмазосносного проката, который скручивают в трубку, то он прикрепляется к трубчатому металлическому корпусу (рис. 10.21, *а*) или непосредственно к хвостовику (рис. 10.21, *б*) пайкой с применением припоя ПСР 40 или олова



**Рис. 10.21.** Алмазные сверла с кольцевым (*а*) и с трубчатым алмазосносным слоем (*б*):

$L$  — длина рабочей части;  $b$  — толщина кольцевого алмазосносного слоя сверла;  $D_{нар}$  — наружный диаметр сверла. Сварной шов условно не показан

(реже). Характерной особенностью АСТ с кольцевым алмазонасным слоем является наличие в нем каналов, обеспечивающих возможность (или улучшающих условия) поступления электролита в торцевой зазор и удаления из него продуктов съема. Такие каналы расположены по образующим наружной и внутренней поверхностей кольцевого алмазонасного слоя (рис. 10.22). Кроме того, в этих инструментах коническая внутренняя поверхность алмазонасного слоя (рис. 10.22, а) обеспечивает улучшенные условия подхода электролита к торцу сверла, причем до полного износа алмазонасного слоя и при любой глубине трепанируемого отверстия.

Каналы по образующим алмазонасного слоя позволяют облегчить прокачку электролита без повышения его давления в напорной системе и снизить задаваемую силу прижима инструмента. Число

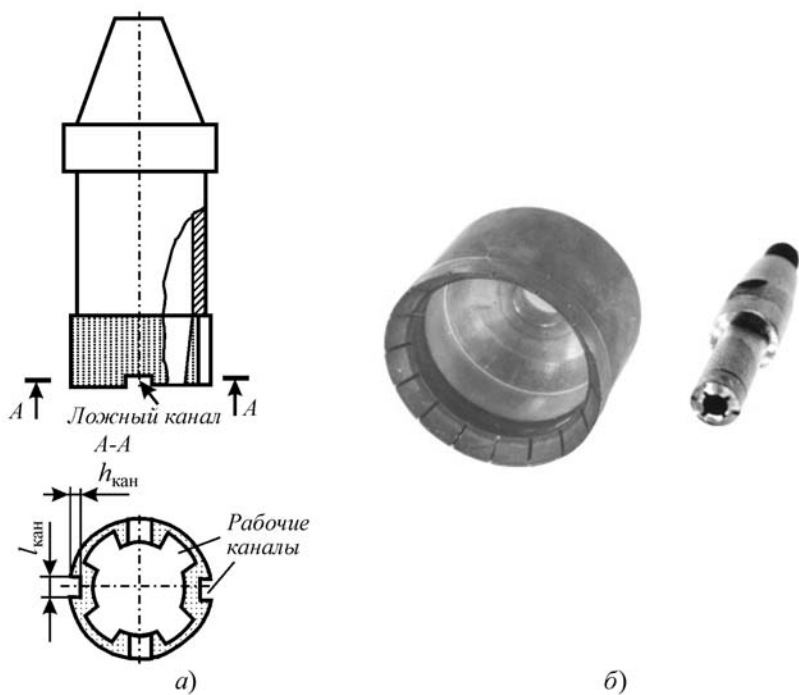


Рис. 10.22. Форма и расположение каналов в алмазонасном слое сверла: а — схема расположения каналов; б — сверла-трепаны с каналами;  $h_{\text{кан}}$  — глубина канала;  $l_{\text{кан}}$  — ширина канала

каналов  $n_{\text{кан}}$  устанавливается исходя из условий, обеспечивающих наименьший путь прохождения электролита через рабочий зазор с учетом прочности кольцевого алмазоносного слоя сверла и одинаковой его толщины по всему периметру

Ширина каналов  $l_{\text{кан}}$  должна быть минимально возможной. Применительно к указанным выше условиям определения общего числа каналов в сверлах-трепанах для алмазно-электрохимической трепанации (АЭТ) с преимущественно абразивно-механическим съемом сплава  $l_{\text{кан}} = 1$  мм. Каналы формируют электроэрозионным способом по общепринятой технологии обработки.

Правку кольцевого или трубчатого алмазоносного слоя для устранения радиального и торцевого биения, а также вскрытия алмазов, осуществляемую до формирования каналов, проводят методом абразивного шлифования на заточных или круглошлифовальных станках с использованием кругов прямого профиля с абразивами КЗ, КЧ, ЭБ, зернистостью, на два номера большей зернистости алмазов в алмазоносном слое сверла.

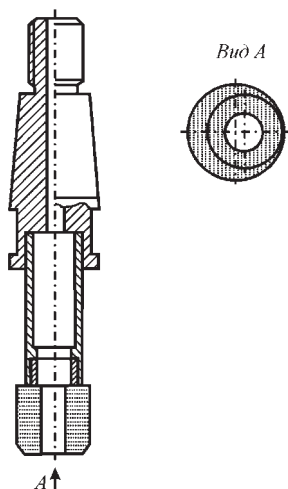
Необходимые условия для обеспечения подачи электролита в рабочий зазор выполняются также в случае смещения кольцевого алмазоносного слоя относительно оси вращения сверла (рис. 10.23). Для придания такому сверлу устойчивости в процессе соосной трепанации на его наружной торцевой кромке формируют коническую фаску. Она не только исключает увод сверла от оси отверстия, но и искусственно повышает пропорционально синусу угла при вершине конуса плотность технологического тока в направлении съема материала без изменения высоты межэлектродного зазора, повышения напряжения на электродах, скорости вращения инструмента и др. Коническая фаска обеспечивает также устойчивость сверла на стадии врезания инструмента в сплав. Наличие конической фаски позволяет согласно схеме разложения сил снизить задаваемую силу прижима сверла и облегчить обработку с преимущественно абразивно-механическим съемом твердого сплава.

Необходимые условия для поступления электролита под торец сверла реализуются и в случае эксцентрического расположения внутренней поверхности кольцевого алмазоносного слоя относительно его наружной поверхности (рис. 10.23, 10.24).

Воплощением в конструкции АСТ указанных выше требований являются также сверла с тонкостенным трубчатым граненым алмазонасным слоем (формируется методом гальванопластики) (рис. 10.25), благодаря чему обеспечивается образование в процессе трепанации естественных боковых зазоров как между стенкой отверстия и наружной поверхностью алмазонасного слоя, так и между керном и его внутренней поверхностью.

Для применения АСТ при расшлифовывании отверстий на их металлическом трубчатом корпусе методом гальваностегии формируют кольцевой алмазонасный слой или закрепляют специальные сегменты, располагаемые как можно ближе к хвостовику сверла, благодаря чему в процессе расшлифовывания обеспечивается большая жесткость технологической системы (рис. 10.26).

Для устранения или уменьшения биения торцевой поверхности алмазонасного слоя целесообразно применять сверла со специаль-



**Рис. 10.23.** Алмазное сверло-трепан со смещенным в радиальном направлении кольцевым алмазонасным слоем и соосной конической фаской



**Рис. 10.24.** Алмазное сверло-трепан с кольцевым алмазонасным слоем, внутренняя поверхность которого смещена в радиальном направлении относительно оси вращения инструмента



**Рис. 10.25.** Комбинированное трубчатое сверло-трепан с граненой и цилиндрической частями алмазонасного слоя

ным корпусом, позволяющим наклонять ось инструмента относительно оси вращения шпинделя или использовать универсальную оправку с гибким трубчатым элементом (рис. 10.27).

Разновидностью АСТ являются сверла с алмазонасным слоем, формируемым методом гальванопластики (рис. 10.28).

Отличительной особенностью их конструкции является максимальная прочность соединения алмазонасного слоя с трубчатым корпусом, так как в процессе изготовления они формируются как одно целое; им свойственна и малая толщина алмазонасного слоя.



Рис. 10.26. Сверла-трепаны с периферийным алмазонасным слоем для расшлифовывания отверстия, получаемого трепанацией

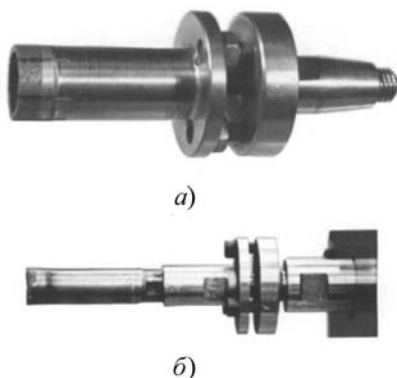
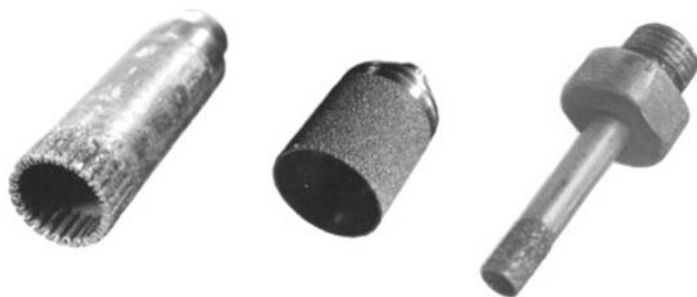


Рис. 10.27. Алмазное сверло-трепан (а) и оправка (б), позволяющие наклонять ось инструмента относительно оси шпинделя



**Рис. 10.28.** Алмазные сверла-трепаны с трубчатым и кольцевым алмазосносным слоем, формируемым методом гальванопластики



**Рис. 10.29.** Алмазные сверла-трепаны с алмазосносным слоем, формируемым методом гальваностегии

Данные сверла используются в основном для АЭС отверстий малого диаметра.

Еще одна из разновидностей АСТ — сверла с алмазосносным слоем, получаемым на металлическом корпусе заданной формы методом гальваностегии (рис. 10.29). Технология изготовления этого вида сверл позволяет создавать инструменты с рабочей частью и каналами любой формы. В таких АСТ исключается поломка алмазосносного слоя выпадающим керном. Они пригодны и для расшлифовывания периферийной поверхностью кольцевого алмазосносного слоя сверла.

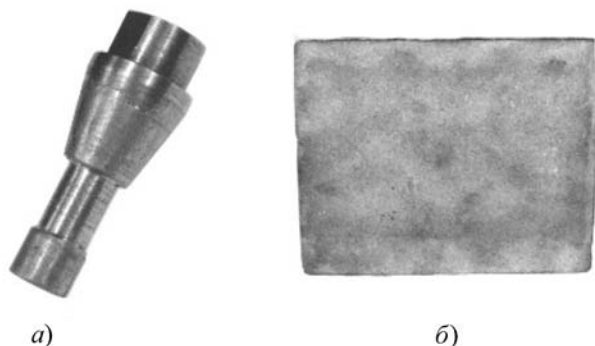
**Инструменты для формирования конических отверстий.** Для осуществления этой технологической разновидности АЭС используют различные типы алмазных конических кругов (АКК), что обуславливается как формой обрабатываемых отверстий, так и требованиями к их обработке. Наиболее распространены АКК, состоящие из хвостовика, к которому припаян конический металлический корпус с алмазонасным слоем (рис. 10.30). Последний может быть сформирован методом спекания (на металлокерамической связке), нанесен на стальной металлический корпус методом гальваностегии (на никелевой связке) или образован из алмазонасного листового проката (рис. 10.31). Такие круги используют только для предварительного, черного съема сплава в заготовках, уже имеющих коническое или цилиндрическое отверстие.

Отличием АКК с алмазонасным слоем, формируемым методом спекания, является возможность изготовления их с алмазонасным слоем на твердосплавной электроэрозионностойкой связке, которая обеспечивает очень высокую эксплуатационную стойкость инструмента. Для поступления электролита в межэлектродный зазор в алмазонасном слое образуют каналы, которые могут иметь различную конфигурацию. Они могут быть прямолинейными и расположенными веерообразно по образующим конической поверхности, могут иметь зигзагообразную форму либо выполнены в виде углублений, расположенных в шахматном порядке (см. рис. 10.30). Если угол конического круга большой ( $90...120^\circ$ ), то, как указывалось выше, каналы могут быть прямолинейными и расположенными



Рис. 10.30. Конические круги с алмазонасным слоем на гальванической и твердосплавной связках





**Рис. 10.31. Конический круг с рабочей частью из алмазосодержащего проката (а) и пластина проката (б), используемая для его изготовления**

ми веерообразно по образующим алмазосодержащего слоя. В этом случае при вращении инструмента поступление электролита в рабочий зазор будет обеспечиваться свободным затягиванием его в зазор.

При обработке глубоких конических отверстий, когда условия вытекания электролита из зоны обработки чрезвычайно затруднены вследствие большой площади контакта алмазосодержащего слоя с обрабатываемой поверхностью, каналы целесообразно формировать в корпусе в виде радиально расположенных отверстий, соединенных с общим осевым и периферийными каналами, что обеспечивает подачу электролита в рабочий зазор под давлением (рис. 10.32).

Возможность расшлифовывания конических отверстий реализуется благодаря тому, что к собственно коническому кругу добавляются элементы, которые позволяют осуществлять такую операцию.

Известно несколько разновидностей комбинированных конических кругов, конструкция которых определяется областью их применения и требованиями к обрабатываемой поверхности.

Если коническое отверстие предварительно уже сформировано в заготовке, например при ее спекании, и требуется лишь его увеличить алмазно-электрохимическим сверлением при обеспечении высокой точности и низкой шероховатости обработанной поверхности, то на корпусе конического круга (рис. 10.33, а) закрепляется круг типа 1А1 с такими диаметром и характеристикой, которые по-

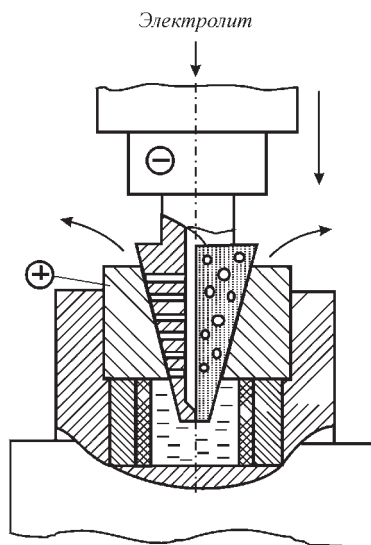


Рис. 10.32. Схема работы конического круга с радиальными каналами

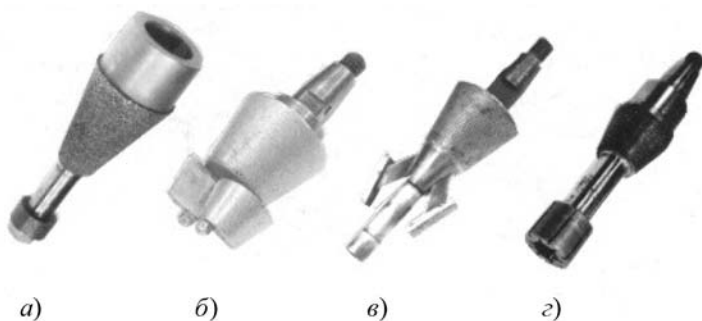


Рис. 10.33. Конические круги:

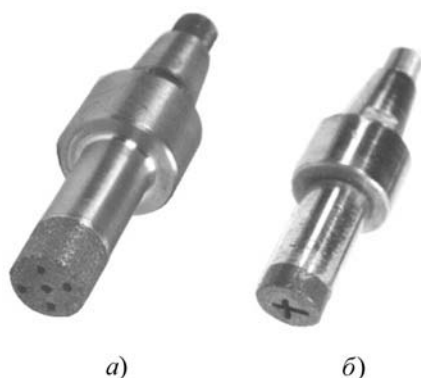
*а* — с кругом 1A1; *б* — с поворотными элементами; *в* — со сменными упругими элементами; *г* — со сверлом

зволюли бы осуществлять расшлифовывание с обеспечением заданной шероховатости обработанной поверхности.

Оригинальными являются АКК с поворотными (рис. 10.33, *б*) и упругими элементами (рис. 10.33, *в*).

Для формирования конического или зенкованного отверстия в цельной заготовке применяются конические круги, имеющие в нижней части кольцевое алмазное сверло-трепан (см. рис. 10.33, *з*), наружный диаметр которого равен меньшему диаметру конического алмазосносного слоя (или немного больше его). Достоинством АКК такого типа является возможность получения ими зенкованных отверстий при строго соосном расположении цилиндрического и конического участков отверстия, недостатком — трудность осуществления ими расшлифовывания конической поверхности отверстия из-за невозможности обеспечить выход инструмента при расшлифовывании периферией алмазосносного слоя сверла. Поэтому такими инструментами проводится чаще всего только предварительное формирование конических или зенкованных отверстий в цельных заготовках.

***Инструменты для бескернового сверления и обработки фасонных отверстий.*** В этом случае АЭО проводится при прохождении оси отверстия во вращающейся заготовке через алмазосносный слой вращающегося инструмента. Конструктивные формы наиболее простых инструментов для осуществления бескернового сверления показаны на рис. 10.34. В связи с тем что при формировании глухих отверстий обеспечивать малый радиус перехода от стенки к дну отверстия трудно вследствие значительного износа алмазосносного



**Рис. 10.34.** Алмазные инструменты для бескернового сверления с рабочей частью из композита славутич (*а*) и на металлокерамической связке (*б*)

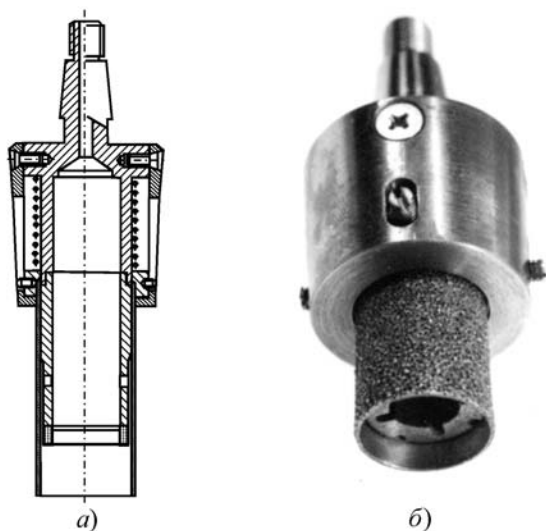
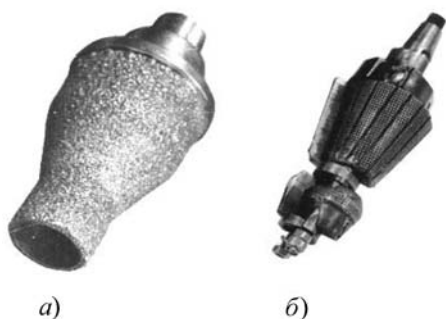


Рис. 10.35. «Рубашечное» сверло для формирования глухих цилиндрических отверстий с малым радиусом скругления на участке перехода от стенки к дну отверстия:

*a* — схема; *б* — сверло

слоя по наружной торцевой кромке, в некоторых случаях целесообразно применять «рубашечные» сверла специальной конструкции (рис. 10.35).

Рабочая поверхность их образована кольцевым алмазонасным слоем и охватывающим его другим, тонкостенным трубчатым алмазонасным слоем, закрепленным на цилиндрической поверхности упругоподвижной в осевом направлении втулки. При обработке тонкостенный алмазонасный слой прижимается к торцевой поверхности отверстия под регламентируемым усилием прижима, осуществляемым пружиной, а кольцевой — под задаваемым усилием прижима сверла. Основной съем сплава проводится кольцевой частью инструмента, а переход от стенки к дну отверстия — тонкостенным алмазонасным слоем. Происходит это одновременно. Тонкостенный трубчатый алмазонасный слой формируют методом гальванопластики. Это позволяет получать его толщиной 0,1...0,5 мм и обеспечивать в процессе обработки переход от стенки к дну отверстия с малым радиусом.



**Рис. 10.36. Фасонные алмазные инструменты:**

*а* — цельный с алмазоносным слоем, сформированным методом гальванопластики; *б* — многоэлементный с рабочей частью из листового алмазоносного проката

К конструкции фасонных инструментов для АЭС (рис. 10.36) предъявляются те же требования, что и к конструкции конических кругов.

Поскольку разновидности таких инструментов не могут быть типизированы из-за большого разнообразия их форм, дополнительные требования к их конструкции устанавливаются на основании требований к обработке конкретных изделий.

## Глава 11

# ИНСТРУМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СТМ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

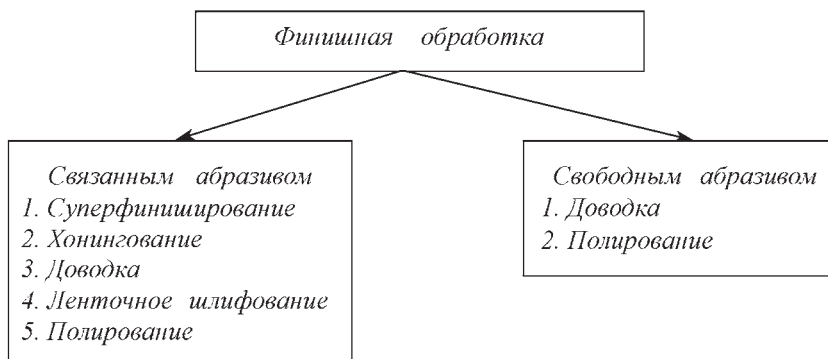
### 11.1. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ

Финишная обработка — процесс отделочной обработки поверхностей деталей, при которой:

- контакт инструмента и детали происходит по поверхности;
- инструмент может самоустанавливаться на поверхности детали;
- инструмент совершает осцилляционное движение или свободно проворачивается под действием сил трения;
- исправляется геометрическая форма, повышается точность размеров и уменьшается шероховатость, волнистость обрабатываемой детали;
- улучшаются физико-механические свойства обрабатываемой поверхности.

Финишная обработка обеспечивает низкую шероховатость обработанной поверхности, высокую точность и исправляет геометрическую форму деталей. Достигается это в результате снятия большого числа тончайших частиц обрабатываемого материала абразивными зёрнами. Только финишными методами обработки можно получить шероховатость поверхности вплоть до  $Rz\ 0,020...0,032$ , точность размеров и геометрической формы (конусность, овальность, бочкообразность) при этом составляют  $0,001...0,002$  мм.

Различают финишную обработку связанным и свободным абразивом (рис. 11.1) В инструментах из связанного абразива режущие зёрна закрепляют посредством металлической, органической или керамической связок, наносят на высокопрочную лавсановую ткань или шаржируют в поверхностный слой притира. При финишной обработке свободным абразивом режущие частицы поступают в зону обработки в виде суспензий или паст.



**Рис. 11.1.** Классификация видов финишной обработки

Устройство, форма и размеры инструментов и притиров для финишной обработки зависят от особенностей обрабатываемой поверхности и размеров обрабатываемой детали. По форме эти инструменты разделяют на следующие основные группы: цилиндрические и конические (для доводки внутренних тел вращения); плоские (для обработки плоскостей и цилиндрических поверхностей методом обкатывания); специальные и фасонные (для асимметричных и фасонных поверхностей).

Основная особенность финишных методов обработки на примере полирования карбида кремния алмазным порошком АСМ 2/1 представлена рис. 11.2. Суть ее состоит в том, что для заданных условий и режимов обработки шероховатость обрабатываемой поверхности с течением времени обработки можно уменьшить только до определенного предела. В дальнейшем процесс обработки не позволяет уменьшать высоту микронеровностей. Аналогично в зависимости от времени обработки изменяется и интенсивность съема материала.

Финишные методы обработки должны обеспечивать требуемое качество поверхности деталей при минимальных экономических затратах. В связи с этим работы по созданию новых финишных инструментов ведутся в следующих направлениях: создание более производительного и износостойкого инструмента; замена свободного абразива инструментом на связанном абразиве; создание инструментов, которые обеспечивают минимальную шероховатость поверхности.

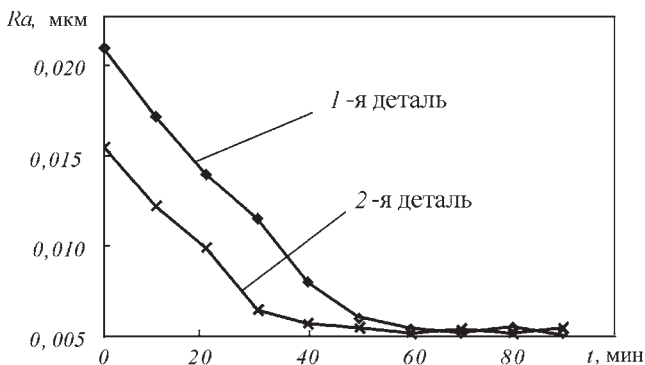


Рис. 11.2. Изменение шероховатости поверхности в зависимости от времени обработки для двух деталей (с различной исходной шероховатостью) при финишной обработке на одинаковых режимах

## 11.2. СУПЕРФИНИШИРОВАНИЕ

### 11.2.1. Особенности процесса

Суперфиниширование — это процесс отделочной обработки поверхностей деталей мелкозернистыми алмазными либо сBN-брусками на металлической, керамической и органической связках.

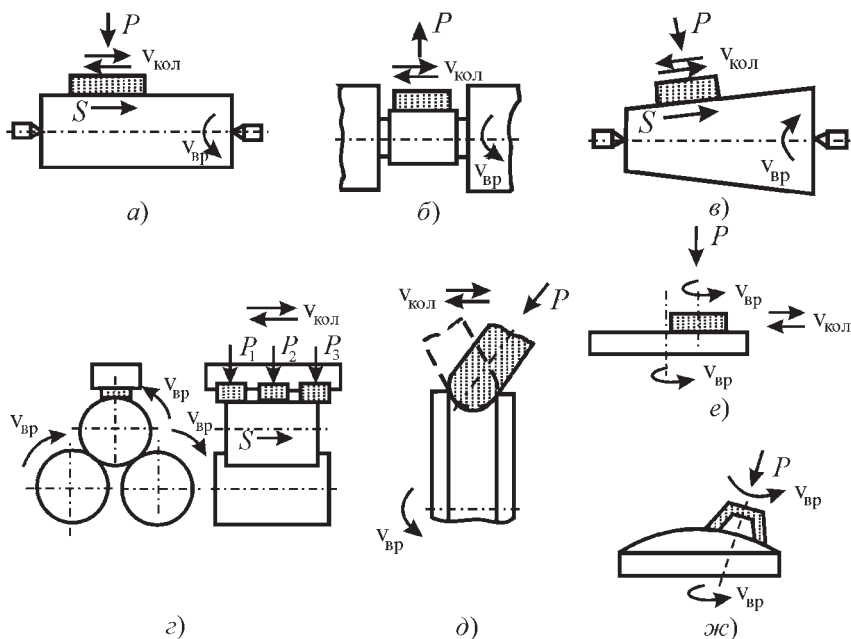
Процесс суперфиниширования основан на принципе вращательного движения обрабатываемой детали, поступательного движения инструмента (бруска) вдоль изделия с наложением колебательного движения с частотой 500...3000 двойных ходов в 1 мин и амплитудой 2...5 мм. Контакт инструмента и детали происходит по поверхности. Особенностью суперфиниширования является уменьшение интенсивности съема материала после снятия гребешков исходной шероховатости детали. Поэтому величина съема припуска ограничена и, как правило, не превышает 0,005...0,010 мм на диаметр. Суперфиниширование позволяет значительно снизить шероховатость поверхности (до 0,01 мкм). Кроме того, можно уменьшить волнистость (от 1...3 до 0,05...0,20 мкм) и огранку (от 3...5 до 0,2...1,0 мкм).

Суперфиниширование применяют для улучшения эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях трения, скольже-



ния и качения, поскольку с его помощью можно получить шероховатость поверхности в пределах  $Ra\ 0,05...1,00$  практически без волнистости, с минимальной огранкой ( $0,5\ \mu\text{м}$ ); удалить дефектный поверхностный слой металла, образовавшийся при шлифовании, и добиться его упрочнения без каких-либо структурных изменений.

Операции суперфиниширования классифицируют по следующим основным признакам (рис. 11.3): по виду базирования деталей — центровое и бесцентровое; по виду подачи — обработка врезанием и с продольной подачей; по форме обрабатываемой поверхности — суперфиниширование цилиндрических, конических, тороидальных (желоба колец подшипников), торцовых и сферических поверхностей. Как правило, во всех случаях супер-



**Рис. 11.3. Схемы суперфиниширования:**

*a* — центровое с продольной подачей; *б* — бесцентровое врезанием; *в* — конической поверхности; *г* — бесцентровое; *д* — тороидальной поверхности; *е* — торцевой поверхности; *ж* — сферической поверхности

финиширования обрабатываемая деталь вращается со скоростью  $v_{вр}$ , а брусок имеет колебательное движение с амплитудой  $A$  и частотой колебаний  $n$ . При обработке в центрах длинных деталей и бесцентровой обработке гладких деталей на проход имеется дополнительная продольная подача  $S$  головки с бруском или детали. Короткие (до 50...70 мм) участки поверхности на деталях, имеющих ступени, буртики, суперфинишируют методом врезания, при котором длина бруска равна длине обрабатываемой поверхности либо меньше последней на величину амплитуды колебаний.

При суперфинишировании торцовых и сферических поверхностей в качестве инструмента чаще всего используют не брусок, а круг чашечной формы, вращающийся со скоростью  $v_{вр}$  и имеющий колебательное или планетарное движение.

Детали суперфинишируют после шлифования, а те из них, которые не подвергались термообработке, — после чистового и тонкого точения на специальных суперфинишных станках или на универсальных токарных и шлифовальных станках с установленными на них головками вибраторов.

Принято различать две основные разновидности процесса: суперфиниширование с упругим прижимом и размерное суперфиниширование (микрофиниширование).

При суперфинишировании с упругим прижимом  $P$  (см. рис. 11.3) используется пружина, пневмоцилиндр либо гидроцилиндр. В этом случае инструмент самоустанавливается на поверхности детали, и такие погрешности формы, как овальность, конусность, бочкообразность и седлообразность, не исправляются.

При размерном суперфинишировании брусок прижимается к детали непосредственно гидроцилиндром либо через промежуточные жесткие звенья (например, клинорычажный механизм). Путем подбора соответствующей характеристики и регулирования режимов в процессе обработки обеспечивают непрерывность съема по времени и тем самым удаляют требующийся припуск (до 0,03...0,05 мм на диаметр). При этом полностью или частично снимается дефектный слой, оставшийся от предшествующей обработки, а также уменьшается некруглость на 20...80 % (в зависимости от вида исходной погрешности). Волнистость практически полно-

стью ликвидируется (до 0,05...0,20 мкм), огранка уменьшается до 0,2...0,7 мкм, овальность исправляется в меньшей степени. Конусность, бочкообразность и седлообразность сохраняются. В результате снижения шероховатости и удаления волнистости несущая поверхность возрастает до 95 %.

### 11.2.2. Инструменты для суперфиниширования

Алмазные суперфинишные бруски показаны на рис 11.4.

В качестве суперфинишного инструмента применяют алмазные (или cBN) бруски, изготовленные на основе микропорошков зернистостью АСМ 28/20...АСМ 40/28 (ЛМ 7/5...ЛМ 40/28).

Они обеспечивают шероховатость поверхности  $Ra$  0,40, а АСМ 10/7...АСМ 20/14 — до  $Ra$  0,2...0,1. Чтобы достичь шероховатости поверхности  $Ra$  0,1, рекомендуется после суперфиниширования проводить окончательную отделочную обработку при помощи алмазных эластичных лент на каучукосодержащих связках (Р14).

Наиболее эффективны для изготовления суперфинишного инструмента металлические связки М2-01, М2-08, керамические К3-01, СК4 и органические В2-01, В2-07. Бруски на металлической связке М2-01 можно рекомендовать только для предварительного суперфиниширования (не ниже  $Ra$  0,32), а бруски на связках К3-01, СК4 — для обеспечения шероховатости  $Ra$  0,08...0,16.

В отдельных случаях при небольшом съеме металла и высоких требованиях к товарному виду изделия используются алмазные суперфинишные бруски на органических В2-01, В2-07, В1-10 и керамических К1-01, К2-01 связках.

Оптимальная относительная концентрация алмазного порошка в алмазоносном слое бруска для зернистости АСМ 10/7 — 150, а для зернистости АСМ 3/2 — 100.

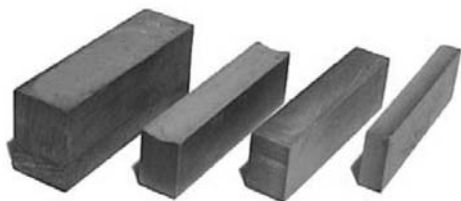


Рис. 11.4. Алмазные суперфинишные бруски

### 11.2.3. Особенности эксплуатации инструментов

Во всех случаях использования суперфинишных брусков точность деталей в продольном сечении (конусность, бочкообразность и седлообразность) должна быть обеспечена на предшествующих операциях. При этом необходимо учитывать технологические возможности выбранной разновидности процесса суперфиниширования, схемы обработки и характеристики брусков. При обработке деталей врезанием алмазными брусками на металлической связке равномерность диаметров заготовок не должна превышать 0,03 мм. В противном случае они плохо прирабатываются по каждой последующей детали. При бесцентровой суперфинишной обработке на проход разброс диаметра заготовок не должен превышать 75 % величины снимаемого припуска, иначе детали меньших диаметров будут лишь частично суперфинишированы, а на деталях больших диаметров образуются завалы кромок.

Припуск на суперфиниширование должен быть больше высоты исходной шероховатости и волнистости. Величину его на диаметр устанавливают из соотношения  $\Delta = 5Rz$ , где  $\Delta$  — припуск на диаметр, мкм.

При суперфинишировании стальных закаленных деталей с  $Ra$  0,2...0,5 припуск обычно находится в пределах допуска на размер. При этом припуск на суперфиниширование не оставляют. Точность диаметра, полученная шлифованием, после суперфиниширования, как правило, сохраняется.

При обработке деталей с исходной шероховатостью  $Ra$  0,5...1,0, а также при необходимости удалить дефектный слой после шлифования следует предусматривать припуск на суперфиниширование.

На современных суперфинишных станках скорость колебательного движения составляет 8...15 м/мин (частота колебаний бруска равна 1500...2500 дв.ход/мин) при амплитуде  $A = 2...3$  мм.

Для определения скорости колебательного движения  $v_{\text{кол}}$  бруска пользуются следующей формулой:

$$v_{\text{кол}} = \frac{2An_{\text{к}}}{1000}, \quad (11.1)$$

где  $n_{\text{к}}$  — частота колебаний бруска, дв. ход/мин;  $A$  — амплитуда колебаний бруска, мм.

Скорость вращения детали  $v_{вр}$  выбирают исходя из обеспечения требуемого угла сетки  $\alpha$ , определяемого по формуле

$$\alpha = \frac{v_{вр}}{v_{кол}}. \quad (11.2)$$

Интенсивность съема металла максимальна и наибольшее самозатачивание алмазно-абразивных брусков происходит при  $\alpha = 40...50^\circ$  (при  $v_{вр} = (8...15)v_{кол}$ , м/мин). Этот режим обработки рекомендуется для снятия брусками требуемого припуска и получения шероховатости поверхности  $Ra$  0,08...0,16.

Для обеспечения более низкой шероховатости поверхности суперфиниширование ведут при углах сетки  $\alpha = 60...88^\circ$ , для чего скорость вращения детали увеличивают в 2–10 раз и более (80...120 м/мин). При этом бруски полируют обрабатываемую поверхность, практически не снимая металла. Во избежание засаливания брусков рекомендуется работать при  $v_{вр}$  не более 30...40 м/мин. Скорость продольного возвратно-поступательного движения бруска или детали 0,3...2 м/мин.

Значение давлений прижима при суперфинишировании алмазными брусками на связке М2-01 не должно превышать 0,78...0,98 МПа, а на связке М2-08 — 1,47 МПа.

## 11.3. ХОНИНГОВАНИЕ

### 11.3.1. Сущность процесса

Хонингование — процесс окончательной обработки внутренних цилиндрических и конических поверхностей, который дает возможность исправлять геометрическую форму, повышать точность размеров и уменьшать шероховатость обрабатываемых поверхностей. Хонингование проводят алмазно-абразивными брусками, подвижно закрепленными в пазах хонинговальной головки. Хонинговальные бруски в процессе хонингования вращаются относительно оси хонинговального инструмента, осуществляют продольное движение и поперечную подачу, вызываемую действием радиальных сил, которые разжимают алмазно-абразивные бруски.

Совокупность этих трех движений создает условия для срезания микронеровностей, оставшихся после предшествующей операции. Для наиболее производительного хонингования необходимо, чтобы следы траекторий режущих кромок взаимно пересекались под значительным углом, так как при этом уменьшается проскальзывание режущих зерен по старым канавкам и создаются лучшие условия для срезания микровыступов. Образующийся между направлениями рисок угол должен составлять примерно  $45^\circ$ , т.е. величины вращательной и возвратно-поступательной скоростей должны быть примерно равными. Однако практика показывает, что при скрещивании рисок под прямым углом повышается износ брусков. Это объясняется переменным характером нагрузки на режущие зерна в процессе пересечения ими впадин и наплывов микрорельефа. Наиболее экономичный угол сетки, при котором добиваются наименьшего удельного расхода алмазов,  $60\text{--}80^\circ$  (рис. 11.5).

При хонинговании скорость резания обычно составляет  $50\text{--}100$  м/мин, т.е. в  $20\text{--}40$  раз меньше, чем при шлифовании. При такой малой скорости температура в зоне хонингования повышается только до  $50\text{--}100^\circ\text{C}$ , исходная твердость и структура поверхности сохраняются.

В процессе хонингования инструмент и деталь самоустанавливаются, что обеспечивает высокую точность обрабатываемых отверстий. При этом также отпадает необходимость правки инструмента, а припуски могут быть сведены до минимума. Однако в некоторых случаях режущая способность брусков с течением времени в результате засаливания (налипания продуктов обработки) резко снижает-

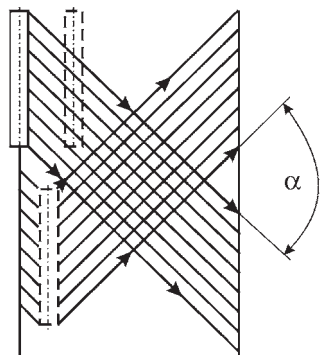
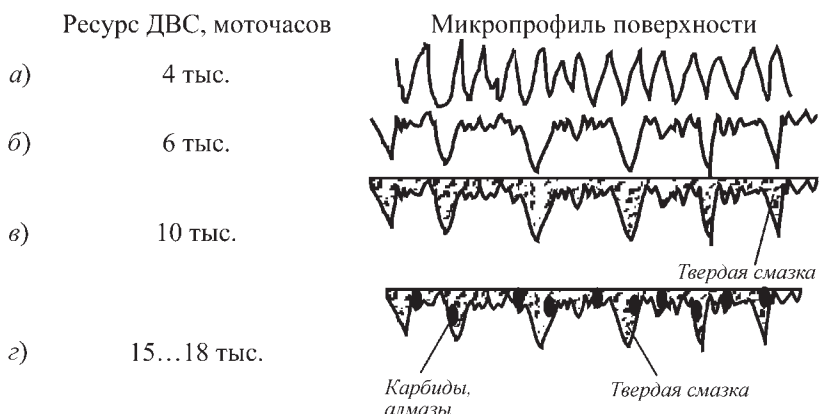


Рис. 11.5. Следы траекторий режущих зерен при алмазном хонинговании в виде сетки

ся, и происходит задираание обрабатываемых поверхностей. Чтобы быстро восстановить режущую способность, рекомендуется периодически изменять направление вращения хонинговальной головки (реверсирование). Периодичность этой операции устанавливают экспериментально в зависимости от степени затупления брусков. В зависимости от вида хонингования получают различные микропрофили поверхностей и, соответственно, достигаются различные эксплуатационные показатели изделий (рис 11.6).



**Рис. 11.6. Микропрофили поверхностей гильз и ресурса ДВС в зависимости от вида хонингования:**

а — обычное алмазное; б — плосковершинное алмазное; в — антифрикционное алмазное; г — антифрикционное алмазное с попутным шаржированием

### 11.3.2. Плосковершинное хонингование

Прогрессивным шагом в развитии алмазного хонингования гильз цилиндров двигателя внутреннего сгорания (ДВС) стала технология плосковершинного хонингования (ПВХ), обеспечивающая формирование на обработанной поверхности микропрофиля, состоящего из чередующихся плоских выступов и углублений для размещения смазки. Создание маслосъемного профиля, имеющего большую опорную площадь контакта, позволяет существенно сократить приработочный период, уменьшить расход масла, а также

значительно увеличить ресурс двигателя за счет повышения износостойкости гильз цилиндров. Микропрофиль поверхности, обработанной ПВХ, имеет следующие параметры: относительная опорная длина профиля 50...60 % на уровне 1...2 мкм, глубина масляных карманов 2,5...10 мкм, ширина 15...30 мкм. Формирование неровностей профиля происходит на операции предварительного хонингования брусками с порошками алмаза зернистостью 125/100...250/200 на металлической связке. На втором этапе обработки микровыступы обрабатываемой поверхности притупляются брусками меньшей зернистости на эластичной каучукосодержащей связке P11, обладающими так называемой локальной эластичностью, обеспечивающей упругое отжатие алмазных зерен под действием сил микрорезания. Установлено, что износостойкость плосковершинной поверхности с оптимальным микропрофилем в 10 и более раз выше, чем поверхности с однородной шероховатостью  $Ra$  0,16...0,32, а период приработки сокращается в 2 раза.

Развитием алмазного плосковершинного хонингования в указанном направлении стал метод плосковершинного антифрикционного хонингования (ПВАХ), сущность которого заключается в следующем. До нанесения твердосмазочного покрытия (ТСП) поверхность гильзы цилиндра обрабатывается методом ПВХ. Получаемый в результате последовательных операций черного хонингования крупнозернистыми (125/100...160/125) брусками и чистового хонингования мелкозернистыми брусками (14/10...20/14) на металлической связке М5-04 микрорельеф представляет собой чередование глубоких рисок для размещения смазки и плоских плато, увеличивающих необходимую относительную опорную длину профиля. Далее проводят нанесение фрикционным методом приработочного ТСП установленными в хонинговальной головке брусками, состоящими из композиционного материала конструкционного характера, получаемого путем спекания. В состав материала входят медь, цинк, графит, дисульфид молибдена и др. компоненты.

Оптимальный микропрофиль плосковершинной поверхности, по рекомендациям ведущих машиностроительных предприятий и зарубежных фирм, определяется следующими параметрами:

Ширина впадин, мкм . . . . .	10...100
Глубина впадин, мкм . . . . .	3,0...7,0



Параметр шероховатости гильз цилиндров в зоне верхней мертвой точки $Ra$ , мкм	0,6...1,0
Параметр шероховатости гильз цилиндров в зоне нижней мертвой точки $Ra$ , мкм	0,5...0,7
Угол наклона рисок к образующей гильзы, град	55...65
Относительная опорная длина профиля на уровне, равном 1 мкм, %	50...80

Рекомендуемый плосковершинный микрорельеф рабочей поверхности гильз формируется за счет разработанной технологии алмазного хонингования с нанесением антифрикционного покрытия, которая обеспечивает полное восстановление работоспособности гильз цилиндров при ремонте, исключает прижоги поршневых колец, задиры, улучшает приработку цилиндро-поршневой группы и сокращает время приработки до двух раз.

### 11.3.3. Инструменты для хонингования

Характеристика алмазоносного слоя брусков выбирается в зависимости от свойств обрабатываемого материала, величины припуска на обработку и требуемой шероховатости обработанной поверхности (табл. 11.1, 11.2).

#### 11.1. Рекомендации по применению алмазных хонинговальных брусков в зависимости от связки и марки алмаза

Марка связки	Марка алмаза	Назначение брусков
M3-21	APK4; AC15; APC3	Хонингование серых и закаленных чугунов твердостью 40...50 HRC, черновое
M5-09; M5-10	APK4; APC3; AC15; AC6	То же, получистовое
M2-03	ACM; AC6; AC4	То же, чистовое
M5-01	AC15; AC6; APK4	Хонингование закаленной конструкционной стали и азотированной стали твердостью < 60 HRC, черновое

Окончание табл. 11.1

Марка связки	Марка алмаза	Назначение брусков
M5-03; M1-01	APK4; AC6	То же, получистовое
M5-06	APK4; AC6; ACM; AC6	То же, чистовое Хонингование деталей из легированных сталей
M1-01; M5-08	APK4; AC15; AC6; AC4	Хонингование незакаленных сталей, серых и легированных чугунов, получистовое
M1-01; M2-03	AC4; AC6; ACM	То же, чистовое
M2-16	AC15	Хонингование колец подшипников из стали ШХ15
M2-09	AC15; AC6	То же, закаленных сталей узкими брусками
M2-03	ACM	То же чугунов чистовое и отделочное
M1-05	AC15; AC6	То же, деталей из закаленных сталей
M2-08	AC4	То же, тонкостенных чугунных деталей
M2-12	AC6	То же, электролитическое
V3-03	AC2; ACM	То же, деталей из титановых сплавов
V3-09	AC2; ACM	То же, деталей из дюралюминия
V3-07	AC2; ACM	Хонингование чистовое и плосковершинное
V3-16	AC2; ACM	То же, для специальных чугунов и хромокремнистых сплавов
V3-18	AC2; ACM	Хонингование сталей, чистовое

### 11.2. Рекомендуемые марки алмаза и зернистость порошков в зависимости от обрабатываемого материала и шероховатости поверхности

Обрабатываемый материал	Марка алмаза и зернистость порошка при $Ra$ , мкм						
	10...20	2,0...2,5	1,0...1,2	0,5...0,6	0,2...0,3	0,1...0,2	0,06...0,08
Серые и легированные чугуны	AC15 315/250, AC6 250/200	AC4 200/160, AC4 160/125, AC4 125/100	AC4 100/80, AC4 80/63	AC4 63/50, AC2 50/40	ACM 28/20, ACM 20/14	ACM 20/14, ACM 14/10	ACM 10/7
Закаленные чугуны	AC15 630/500, AC 15 500/400	AC15 400/315, AC15 315/250	AC 15 250/200, AC15 200/160, AC15 160/125	AC6 125/100, AC6 100/80	ACM 40/28, ACM 28/20	ACM 28/20, ACM 20/14	ACM 20/14, ACM 14/10
Нетермообработанные чугуны	AC15 315/250, AC6 250/200	AC6 200/160, AC6 160/125, AC6 125/100	AC6 100/80, AC6 80/63	AC4 63/50, AC2 50/40	ACM 40/28, ACM 28/20	ACM 20/14	—
Закаленные стали	—	AC6 200/160, AC6 160/125	AC6 125/100, AC6 100/80	AC6 80/63, AC4 63/50	—	—	ACM 14/10

Технологическую подготовку алмазного хонингования начинают с точной размерной установки и крепления алмазных брусков на стальные державки (колодки). Вследствие высокой износостойкости металлических связок бруски очень медленно прирабатываются в процессе хонингования.

Во время их приработки на деталях резко снижается точность хонингования и производительность обработки. Поэтому при установке и креплении брусков очень важно предотвратить разновысотность брусков в одном комплекте. Необходимо, чтобы их режущие

поверхности при сборке в хонинговальной головке располагались на одной окружности. Подготовленными к хонингованию считают такие бруски, поверхность контакта с обрабатываемым отверстием которых составляет не меньше 60 % всей номинальной режущей поверхности при обеспечении полного контакта по всей длине.

Алмазные бруски к металлическим колодкам крепят, как правило, путем припайки. В отдельных случаях их приклеивают к колодкам эпоксидным клеем.

Окончательно алмазные бруски по радиусу прирабатывают на хонинговальном станке по отверстию хонингуемой заготовки. С целью повышения производительности притирки алмазных брусков применяют притирочную пасту (абразивный порошок карбида кремния зеленого, смешанный с солидолом в пропорции 1:2). Зернистость абразивного порошка должна быть на 1 или 2 номера больше зернистости прирабатываемых брусков. Приработку проводят, периодически подавая СОТС.

#### **11.3.4. Инструмент для обработки мелкоразмерных прецизионных отверстий**

Процесс обработки прецизионных отверстий в деталях топливной аппаратуры (втулках плунжерных пар топливных насосов диаметром 8...12 мм) осуществляется одно- и двухбрусковыми хонголовками. В условиях серийного производства на заводах топливной аппаратуры, как правило, реализуется схема плавающего крепления заготовки и жесткого крепления хонголовки во вращающемся шпинделе хонинговального станка. Бруски работают в условиях самозатачивания и не требуют правки.

Длину брусков  $l$  выбирают в зависимости от длины  $L$  обрабатываемого отверстия. Меньшие отклонения формы отверстия достигаются при  $l = (0,75...1,0)L$ . Длина выхода брусков из отверстия соответствует примерно  $l/3$ . От длины выхода брусков из отверстия зависит отклонение от цилиндричности отверстия. Если отверстие при хонинговании приобретает форму конуса, необходимо увеличить выход брусков со стороны меньшего диаметра и, соответственно, уменьшить со стороны большего. При наличии седлообразности отверстия детали выход брусков следует уменьшить с двух сторон отверстия. В случае бочкообразности отверстия выход брусков необходимо увеличить. Длина перебегов корректируется как в период при-

работки нового комплекта хонбрусков, так и в процессе наладки станка в зависимости от характера отклонений формы отверстия.

Обработка деталей типа втулки плунжера топливных насосов реализуется на полуавтоматических хонинговальных станках мод. 3820, 3Е820, 3820-2, 3Е820-2 (двухшпиндельные). Для доводки прецизионных отверстий втулок плунжеров и т.п. применяют станки тех же моделей с индексом Д, например 3820-Д.

Для обработки деталей из термообработанных сталей ШХ15, 25Х5М наиболее оптимальными с точки зрения износостойкости и качества обработки являются алмазные хонбруски на металлических адгезионно-активных пористых связках. В производстве втулок плунжера применяются бруски следующих характеристик: черновые — АБХ 60×3×5×1,5 АС20 (АС32) 200/160 (160/125)-МП1-4; чистовые — АБХ 60×3×5×1,5 АС15(АС20) 100/80 (80/63)-МП1-4. Черновые бруски обеспечивают отклонение геометрической формы отверстия 5...10 мкм при  $Ra$  0,63, чистовые, соответственно — 1...3 мкм и  $Ra$  0,2...0,4.

Соотношение скоростей вращательного и возвратно-поступательного движений при обработке сталей выбирается из расчета получения угла пересечения рисок на обрабатываемой поверхности в пределах 65...75°. Исходя из этого, частота вращения шпинделя — 315...500 об/мин, частота возвратно-поступательного движения — 60...100 дв.ход/мин, давление на бруски  $(1...4)10^{-3}$  МПа (по балансу производительности и стойкости).

Окончательная доводка отверстий проводится в две-три операции притирами с пастой КТ на основе карбида титана зернистостью 5/3...10/7.

Применение алмазных паст не рекомендуется из-за интенсивного шаржирования обрабатываемой поверхности и высокого износа готовых деталей в процессе эксплуатации. После окончательной доводки отклонение геометрической формы отверстия не превышает 0,5 мкм на диаметр и шероховатость поверхности составляет  $Ra$  0,02...0,04.

### 11.3.5. Особенности эксплуатации хонинговальных инструментов

Чтобы достичь необходимой цилиндричности отверстия, следует правильно установить длину и положение хода хонинговальной головки (перебег хонинговальных брусков). Практикой установле-

но, что наилучшие результаты можно получить при выходе брусков из обрабатываемого отверстия на  $1/3$  длины бруска. При длине отверстий  $100...150$  мм бруски должны быть в пределах  $1/3...1/2$  длины отверстия. При обработке длинных отверстий рекомендуется применять хонинговальные бруски более длинных размеров. Этим достигают значительного повышения производительности, снижения в  $2...3$  раза удельного расхода алмазов и улучшения прямолинейности образующей детали. При обработке коротких отверстий длина бруска должна быть меньше длины отверстия, а выход хона должен составлять  $1/4$  их длины. Длину выхода бруска, а следовательно, и длину рабочего хона, уточняют в процессе наладки операции (после приработки брусков) так, чтобы обеспечить высокую точность формы отверстия.

При недостаточной длине выхода брусков наблюдается бочкообразность отверстия, а при излишней длине — корсетность. В тех случаях, когда отверстия деталей до хонингования имеют идентичные погрешности формы в продольном направлении, длину выхода брусков целесообразно устанавливать с учетом характера этой погрешности. Например, при конусности отверстия с большим диаметром внизу длина выхода брусков вниз обычно должна быть меньше, чем длина выхода брусков вверх (рис. 11.7). При корсет-

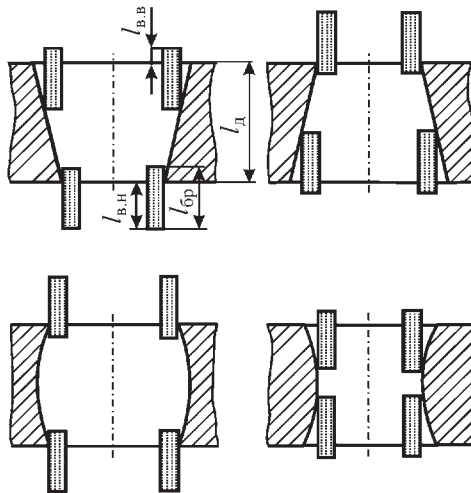


Рис. 11.7. Схема определения длины рабочего хода хона

ности длина выхода брусков вверх и вниз будет меньшей, чем при хонинговании бочкообразных отверстий. При правильно налаженном хонинговании неточность формы отверстия может в ряде случаев (при достаточной жесткости детали) не превышать 1...2 мкм.

Длину рабочего хода  $L_x$  определяют по формуле

$$L_x = l_d + l_{в.в} + l_{в.н} - l_{бр}, \quad (11.3)$$

где  $l_d$  — длина обрабатываемого отверстия;  $l_{в.в}$  — длина выхода бруска вверх;  $l_{в.н}$  — длина выхода брусков вниз;  $l_{бр}$  — длина брусков.

Количество режущих брусков в хонинговальной головке зависит от диаметра обрабатываемого отверстия. Наиболее эффективно исправляет исходные погрешности геометрической формы хонинговальная головка с четным числом (8, 6, 4, 2) диаметрально расположенных по окружности брусков. В этом случае они работают попарно, и на шток радиальной подачи не действуют радиальные силы, отжимающие хонинговальную головку.

Ширину брусков выбирают в зависимости от того, сколько их одновременно работает в хонинговальной головке, а также от отношения режущей поверхности работающих брусков к обрабатываемой поверхности отверстия. При хонинговании гладких отверстий это отношение составляет 0,5...0,6, а при хонинговании шлицевых отверстий — 0,8...1,0. Для деталей малой жесткости оно должно быть минимальным.

При обработке шлицевых и других прерывистых поверхностей применяют хонинговальную головку с шириной брусков, превышающей в 2–3 раза ширину паза, или специальные бруски, имеющие спиралевидную форму.

### 11.3.6. Хонингование отверстий в деталях из закаленных чугунов и сталей

Для предварительного (чернового) хонингования гильз тракторных двигателей нашли широкое применение бруски на износостойких связках М5-09, М5-10, для изготовления которых использованы высококачественные порошки алмаза марок АС15, АС20, АС32 и высокопрочные порошки поликристаллического алмаза марок АРК4, АРС3 зернистостью 200/160...800/630.

Алмазные хонинговальные бруски на пористых связках имеют объемную структуру, необходимую для проникновения охлажда-

дающей жидкости в зону резания и удаления продуктов обработки. Эти связки обладают также высоким алмазодержанием, что предохраняет алмазные зерна от вдавливания в них и преждевременного выпадения. Стойкость брусков на пористых связках по сравнению с брусками на металлических связках М1-01 выше в 3–4 раза. Удельная производительность хонингования при обработке серых и закаленных чугунов крупнозернистыми брусками повышается более чем в 2,5 раза. Процесс резания крупнозернистыми брусками имеет незатухающий характер и позволяет снимать припуск на хонингование до 1 мм. Такие показатели, как общее тепловыделение, усилие и мощность резания брусков зернистостью 630/500...800/630 и 200/160...250/200, примерно одинаковы. Бруски промежуточных зернистостей 400/315...500/400 по величине съема металла несколько уступают брускам зернистостью 630/500...800/630. Удельный расход алмазов в брусках на пористых связках более чем в 10 раз меньше по сравнению с брусками на металлической связке М1-01.

С целью повышения эффективности предварительного хонингования закаленных чугунов увеличивают площадь алмазонасной режущей поверхности хонинговальной головки, применяя более длинные или широкие бруски и увеличивая их количество в комплекте. Для этого рекомендуются бруски с повышенной режущей способностью (на связках М5-09, М5-10), в которых использованы порошки поликристаллического алмаза марок АРК4, АРС3. С применением хонинговальных головок с удвоенной длиной брусков значительно повышается точность (овальность уменьшается в 1,5...2 раза) и увеличивается производительность обработки (на 20...30 %).

Хонинговальные бруски, в которых применены порошки синтетического поликристаллического дробленого алмаза марок АРВ1, АРК4, АРС3, позволили заменить остродефицитные порошки монокристаллического алмаза АС15, АС20, АС32. Так, бруски из порошков АРВ1, являясь наиболее дешевыми, дают хорошие результаты при обработке серых чугунов, а бруски из порошков поликристаллического алмаза АРК4 и АРС3 — при обработке серых и закаленных чугунов (< 45 HRC) и сталей (< 50 HRC).

Алмазные хонинговальные бруски позволяют получать поверхность с шероховатостью вплоть до  $Ra$  0,08...0,063.



### 11.3.7. Хонингование эластичными брусками

Для окончательного хонингования отверстий в деталях из чугуна и стали применяют алмазные эластичные блок-бруски на каучукосодержащих связках ВЗ-03, ВЗ-07. Алмазный хонинговальный блок состоит из 6...12 брусков (рис. 11.8). Размеры последних: длина  $L$  — 100, 125, 150 мм, ширина  $B$  — 8, 10, 12, 16 мм, высота алмазного слоя  $S$  — 2 или 3 мм, общая высота  $h$  — 4...6 мм. Бруски крепятся к стальным колодкам хонинговальной головки эпоксидной смолой, замешанной с отвердителем в соотношении 10:1. В зависимости от марки бруски отличаются лишь эластичностью алмазного слоя (связкой) в сочетании с алмазами. Наиболее эластичными являются бруски, изготовленные на связке ВЗ-12, и наиболее жесткими — на связке ВЗ-19.

Чтобы получить шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,12...0,32, в брусках используют порошки алмаза АС2 зернистостью 63/50...80/63, а  $Ra$  0,020...0,080 — алмаза АСМ зернистостью 14/10...40/28. Окончательно отверстия хонингуют эластичными брусками при следующих режимах: скорость вращения хонинговальной головки  $v_{вр} = 30...40$  м/мин, скорость возвратно-поступа-

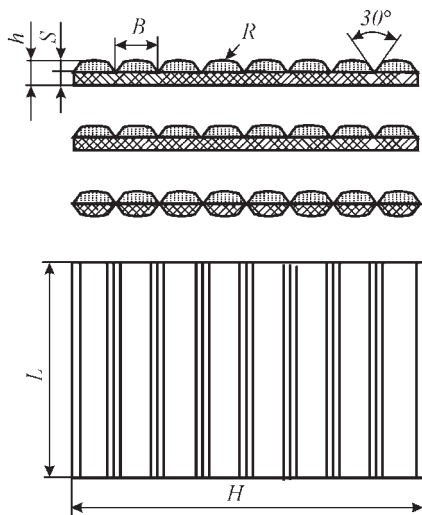


Рис. 11.8. Алмазные эластичные блок-бруски

тельного движения головки  $v_{\text{вп}} = 8...12$  м/мин, давление брусков на обрабатываемую поверхность  $P_{\text{уд}} = 588$  кПа. В качестве СОТС применяют керосин или смесь керосина с веретенным маслом при соотношении 1:1 или 2:1.

При хонинговании отверстий в деталях из чугуна и закаленной стали брусками на связках В3-07 и В3-18 достигается шероховатость поверхности  $Ra$  0,080...0,160.

При повышении эластичности без алмазосного подслоя шероховатость обработанной поверхности снижается незначительно. Однако применять в качестве подслоя эластичные связки (В3-12, В3-09) не всегда целесообразно, так как при этом погрешности формы отверстия не исправляются. Эффективным средством увеличения количества алмазных зерен, контактирующих с обрабатываемым материалом, является повышение их концентрации в алмазосном слое. Так, с повышением относительной концентрации алмазов АС2 в связке Р11/Р9 от 12,5 до 50 % шероховатость поверхности при обработке чугуна и стали сильно снижается. Однако наиболее резко она снижается при уменьшении зернистости алмаза. Так, после хонингования стальной поверхности брусками АСМ 10/7 на связке В3-07 50 %-ной концентрации за 60 с достигается  $Ra$  0,025...0,040.

Стойкость хонинговальных блок-брусков с порошком алмаза АС2 63/50...АС2 80/63 на эластичной каучукосодержащей связке В3-07 при окончательном хонинговании блоков цилиндров автомобилей в среднем в 3 раза превышает стойкость брусков с порошком алмаза АСМ20/14 на металлической связке М2-01. Бруски на эластичной основе не засаливаются и не образуют царапин на обрабатываемой поверхности, обеспечивая шероховатость поверхности  $Ra$  0,25...0,32. При этом создается микропрофиль с большой опорной (несущей) поверхностью, что повышает долговечность машин и механизмов.

### 11.3.8. Технологические среды для хонингования

Эффективность алмазного хонингования в значительной степени связана со свойствами используемых смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Это керосино-масляные фракции продуктов нефтепереработки или СОТС на водной основе. Рекомендуется применение водных 3...5 %-ных составов на базе концентратов «Аквахон», «Амфапол», «Гидропол-2»; «Синхо-2С»,

«Синхо-6», «Камикс», «Трибол», из масляных — НСК5У, ОСМ1, ОСМ2К, ВИ4, РЖ8 или смесь из 80 % керосина и 20 % масла И12 (И20). Наиболее перспективным для процессов алмазного хонингования чугунов, сталей и сплавов считается разработка и применение полусинтетических и синтетических СОТС на водной основе. СОТС на водной основе обеспечивают снижение пожароопасности производства, обладают высокими смачивающими, охлаждающими, антикоррозионными, моющими свойствами, активно влияют на качественные показатели формируемой поверхности детали (шероховатость, износостойкость, задиростойкость).

Применяемые рабочие жидкости должны обладать высоким моющим действием на поверхность. Моющее действие СОТС характеризуется степенью очистки обрабатываемой детали и инструмента от шлама, содержащего в себе мелкие частички металла и обрабатывающего инструмента (алмазное зерно, карбиды и неметаллические включения), которые удерживаются на поверхности детали электростатическими, ван-дер-ваальсовскими и механическими силами.

Моющая, диспергирующая и адсорбционная способность СОТС определяется кинетикой, механизмами преобразования и деструкции их компонентов в условиях высоких температур и нагрузок, транспортировки продуктов деструкции, физико-химическими процессами взаимодействия плазмы, которая возникает в зоне обработки, с поверхностями, контактирующими в процессе обработки.

Моющее действие СОТС определяется в основном присутствием в них поверхностно-активных веществ (ПАВ): ионогенных, неионогенных, амфолитных. Ионогенные ПАВ делятся на анионные (при диссоциации в водных растворах на ионы гидрофобная часть молекул принадлежит аниону), катионные (ПАВ диссоциируют с образованием поверхностноактивных катионов). Амфолитные образуют в растворах анионо- и катионоактивные группы. Неионогенные ПАВ не диссоциируют на ионы. Катионоактивные и амфолитные ПАВ не нашли широкого применения в составе СОТС. При выборе ПАВ, которые должны войти в состав СОТС, учитывается возможность химического взаимодействия между ПАВ и другими компонентами композиции, их термическая и гидролитическая стойкость. Коллоидно-химические свойства ПАВ (эмульгирующие

и солюбилизующие свойства и др.) обусловлены дифильной структурой ПАВ и их способностью к адсорбции на границе раздела фаз.

Высокой адсорбционной способностью обладают многие ПАВ, однако прочные адсорбционные пленки образуются только мицеллообразующими соединениями.

Широкое применение в составе СОТС нашли анионоактивные ПАВ — мыла высших жирных кислот, сульфокислот, сложные эфиры моно- и дикарбоновых кислот с одно- и многоатомными спиртами, алканоламинами. Высокие смазочные свойства солей и других производных карбоновых кислот и сульфокислот обеспечиваются образованием прочных адсорбционных пленок на поверхности металла за счет химических адсорбционных и координационных связей с ювенильной поверхностью металла. Неионогенные ПАВ, например полиэтиленгликольные эфиры жирных спиртов, не обладают высокими смазывающими свойствами, потому что образуют недостаточно прочные адсорбционные слои с менее плотной упаковкой молекул, которые занимают сравнительно большую площадь на поверхности. С увеличением количества оксиэтильных групп площадь, которую занимает молекула на поверхности раздела, увеличивается, что ведет к ухудшению не только смазочных, но и смачивающих свойств ПАВ.

Оптимальные свойства имеют неионогенные ПАВ с гидрофильно-липофильным балансом в пределах от 8 до 18. Они являются эмульгаторами, солюбилизаторами, моющими агентами. Щелочные и алканоламиновые мыла карбоновых кислот легко гидролизуются в воде. Недостатком щелочных и алканоламиновых мыл является также нестабильность в жесткой воде, обусловленная химическим взаимодействием с ионами редкоземельных металлов и образованием нерастворимых редкоземельных мыл. Присутствие редкоземельных мыл в растворах СОТС, которые в условиях производства приготавливают на жесткой водопроводной воде, негативно влияет на стабильность, моющее действие и другие свойства рабочих растворов. Вместе с тем следует отметить, что редкоземельные соли противодействуют пенообразованию. Оптимальными являются условия, при которых редкоземельные мыла образуются в виде коллоидной дисперсии, не снижая стабильности и не ухудшая другие свойства растворов мыл и их включающих композиций. Это

достигается введением ПАВ, которые имеют диспергирующее действие по отношению к редкоземельным мылам.

Эффективными диспергаторами редкоземельных мыл являются большинство неионогенных ПАВ. Преимуществом последних является физико-химическая нейтральность к солям и сохранение высокой моющей способности в жесткой воде. В табл. 11.3 приведены данные моющей способности, антикоррозионных и смазочных свойств 0,3 %-ных водных растворов некоторых анионоактивных и неионогенных ПАВ.

Из приведенных в табл. 11.3 данных видно, что высокое моющее действие имеют неионогенные ПАВ, оксиэтилированные спирты, которые, однако, характеризуются невысокими антикоррозионны-

**11.3. Скорость коррозии стали Ст40, моющая способность и смазочные свойства ПАВ**

ПАВ	Скорость коррозии стали Ст40, $10^{-2}$ м, мм/год	Моющая способность, %	Смазочные свойства по ГОСТ 9490–75		
			Нагрузка, Н		Индекс задира $I_3$
			Сваривания, $P_c$	Критическое, $P_k$	
Синтанол АЛМ-10	7,2	45,0	1410	320	23,7
Синтанол АЦСЕ-12	7,0	34,0	1260	560	24,9
Синтанол ДС-10	11,2	52,0	1260	710	27,7
Синтамид-5	0,64	50,0	1190	750	33,7
Стеарокс-6	1,44	20,5	1330	800	41,2
Синакто-406*	0,32	28,5	1260	1000	46,3
Олеат триэтаноламина*	0,32	17,0	1000	890	39,6
Неонол АФ-9-10	12,0	48,0	1330	425	35,7

\* Анионоактивные ПАВ.

ми и смазывающими свойствами. Удовлетворительное моющее действие, антикоррозионные и смазывающие свойства имеют оксиэтилированные амиды. Оксиэтилированные кислоты, так же, как и анионоактивные ПАВ, мыла и сульфонаты, имеют низкое моющее действие, но значительно лучшие антикоррозионные и смазывающие свойства. Как правило, в композициях СОТС присутствуют анионоактивные ПАВ — мыла высших жирных кислот, которые несут ответственность за основные функциональные свойства СОТС, и неионогенные ПАВ. Последние выполняют вспомогательную функцию, улучшают некоторые свойства композиции, например, стабильность к минерализованным водам.

Применение специальных СОТС на водной основе при алмазном хонинговании прецизионных деталей из термообработанных сталей типа ШХ15 позволяет не только обеспечить стабильный процесс резания, но и активно влиять на состав и эксплуатационные свойства обработанной поверхности.

На рис. 11.9 представлен внешний вид поверхностей деталей из стали ШХ15 после обработки хонингованием в среде керосина и 3 %-ного раствора фосфатсодержащей СОТС «Трибол».

Правильный подбор СОТС для процесса хонингования позволяет повысить задиростойкость и износостойкость обработанных деталей до 2,5 раз.

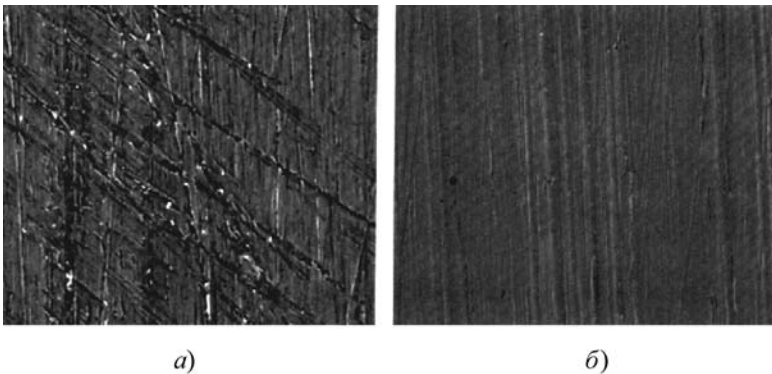


Рис. 11.9. Поверхность стали ШХ15 после хонингования с одинаковыми режимами в среде керосина (а) и СОТС «Трибол» (б)

## **11.4. ОБРАБОТКА ЛЕНТАМИ ИЗ СТМ И ИНСТРУМЕНТАМИ НА ИХ ОСНОВЕ**

Применение инструментов из СТМ на эластичных связках открывает большие возможности по повышению производительности обработки и улучшению качества изготовления деталей узлов и агрегатов с высокими эксплуатационными свойствами.

Разработан и применяется в промышленности алмазный инструмент на каучуковых связках, предназначенный, в основном, для шлифования, полирования, виброполирования, суперфиниширования, хонингования, доводки и декоративной обработки деталей из сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов, неметаллических материалов, в том числе драгоценных камней, мрамора, гранита, а также для шлифования напыленных покрытий. Его широкое использование обусловлено возможностью получения износостойких многослойных лент сложной формы различной степени эластичности, которые не дают прижогов, обеспечивают снижение шероховатости обработанной поверхности, создают на обрабатываемых поверхностях деталей специальный микро-рельеф.

По степени эластичности марки каучуковых связок можно разделить на четыре основные группы: высокоэластичные (ВЗ-10, ВЗ-26, ВЗ-32); эластичные повышенной жесткости (ВЗ-09, ВЗ-17, ВЗ-27); полуэбонитовые (ВЗ-06, ВЗ-07, ВЗ-20); эбонитовые (ВЗ-03, ВЗ-22, ВЗ-30, ВЗ-33).

Гамма алмазного эластичного инструмента включает: алмазные ленты полировальные (АЛП) со свободными тканевыми концами; алмазные ленты термопластичные полировальные (АЛТП); алмазные ленты шлифовальные бесконечные (АЛШБ) и алмазные ленты шлифовальные прерывистые двух типов (АЛШЕ) и (АЛШЛ) (табл. 11.4).

Инструменты на эластичных связках обладают большой работоспособностью за счет высоких режущих свойств зерен из СТМ и возможности управления количеством зерен, активно участвующих в процессе резания, способностью снижать вибрации и большим сроком службы при эксплуатации.

При необходимости в лентах могут использоваться алмазные шлифпорошки марок АС15, АС20.

## 11.4. Характеристики лент на каучуковых связках

Обозначение	Типоразмер $L \times B$ , мм	Марка связки	Марка алмаза	Концентрация алмаза, карат
АЛП	150×25...150×180	В3-10; В3-09; В3-06; В3-03	АС2 80/63...50/40 АСМ 60/40...3/2	50; 100
АТЛП		В3-06; В3-07	АС4 160/125...50/40 АС6 200/160...50/40 АСМ 60/40...3/2	
АЛШБ	1920×20	В3-10; В3-09; В3-06	АС2 80/63...50/40 АСМ 60/40...3/2	12,5; 25; 50; 100
АЛШЕ	200×55 300×140	В3-27		
АЛШЛ	300×140	В3-25		

Как основу в лентах АЛП используют высокопрочную лавсановую ткань, а в качестве связки — специальную резину различной твердости. Между основой и алмазоносным слоем имеется подслоя из резины, что улучшает эластичность и эксплуатационные свойства лент. Такой подслоя позволяет полностью изнашивать алмазный слой и обеспечивает постоянство прочности лавсановой ткани при эксплуатации инструмента. Закрепление алмазоносного слоя достигается за счет аппретирования основы специальными веществами и последующей привулканизации его к основе. В целях экономии алмазоносный слой наносится только на рабочую часть размером  $L \times B$ , а концы основы служат для закрепления ленты. На рабочей поверхности имеются рифления, благодаря чему не требуется ее вскрытия перед началом работы. Толщина алмазоносного слоя с учетом рифлений составляет 1,2 мм, т.е. лента представляет собой многослойный инструмент.

АЛП можно применять для создания специальных инструментов. Например, для виброполирования профиля лопаток применяют специальные профильные ложементы. Профиль резинового подслоя подгоняется по эталонной лопатке и имеет вогнутую или



выпуклую форму, после чего к нему приклеивается фрагмент ленты, размеры которой зависят от размеров поверхности лопатки и режимов обработки. Форма профиля подслоя зависит от твердости резины, профиля лопатки, режимов и траектории движения ее при полировании.

Перспективными методами финишной обработки фасонных деталей являются полирование и виброполирование лентами АТЛП, изготовленными на специальных термопластичных каучуковых связках типа полуэбонита. При кратковременном нагревании до температуры 170...175 °С ленты размягчаются и в результате прижатия к обрабатываемой детали повторяют ее форму. После охлаждения ленты в прижатом состоянии приобретенная форма сохраняется.

Размеры лент АТЛП в плане соответствуют размерам АЛП, а общая толщина лент за счет эластичного подслоя увеличена до 3,6+0,2 мм.

Для обеспечения низкой шероховатости обработанной поверхности, высокой точности размеров и формы для съема больших припусков и зачистки фасонных деталей шлифование и полирование осуществляют лентами АЛШБ свободной ветвью в условиях охватывающего контакта без контактной опоры.

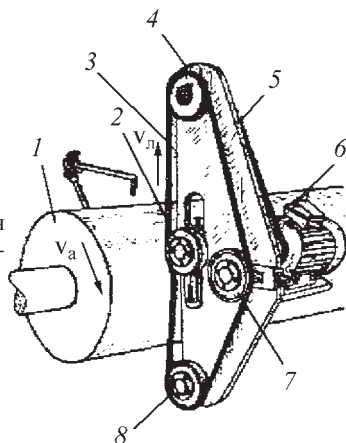
При шлифовании с контактной опорой лента к заготовке поджимается за счет специальных опор (дисков, роликов, копиров и других элементов) (рис. 11. 10). Шлифование с контактной опорой обеспечивает высокую точность обработки деталей сложной формы, имеющих неравномерные припуски. Однако эта обработка вызывает большую деформацию ленты и, как следствие, формируется шероховатость поверхности, большая по величине, чем при обработке без контактной опоры.

В условиях шлифования свободной ветвью важными характеристиками процесса является площадь контакта ленты с деталью и фактическое давление в зоне контакта. Увеличение площади контакта ленты с деталью при постоянном давлении приводит к повышению производительности и снижению шероховатости поверхности. Наименьшая шероховатость поверхности достигается при низких давлениях в контакте.

Отличием АЛШБ от АЛП является наличие алмазоносного слоя на всей рабочей поверхности бесконечной ленты. Для придания

**Рис. 11.10.** Схема ленточного шлифования с контактной опорой:

1 — деталь; 2 — контактный ролик; 3 — алмазная лента; 4, 8 — ролики; 5 — корпус; 6 — электродвигатель; 7 — натяжной ролик



гибкости лентам на связях марок ВЗ-09 и ВЗ-06 в алмазоносном слое делают надломы. Толщина алмазоносного слоя с учетом рифления 1 мм, а общая толщина ленты  $1,9 \pm 0,2$  мм.

Использование лент с алмазными порошками марки АС2 позволяет достичь наибольшей производительности обработки за счет наиболее развитой режущей поверхности зерен. Порошки алмаза зернистостью более 80/63 и менее 40/28 применять нецелесообразно, так как в процессе шлифования первые частично дробятся, а вторые обладают пониженной износостойкостью и не эффективны при снятии больших припусков. Кроме того, в процессе работы лент алмазные зерна частично утопают в эластичной связке, фактически снижая зернистость инструмента, и удаляют материал на меньшую глубину.

Концентрация алмаза в лентах играет меньшую роль, чем в жестком инструменте. Незначительное повышение съема обрабатываемого материала происходит при увеличении концентрации алмазов от 50 до 100 %. Шероховатость обработанной поверхности при этом несколько снижается.

В зависимости от назначений алмазных лент, исходной и требуемой шероховатости обработанной поверхности эксплуатировать инструменты необходимо с применением СОТС, что предотвращает размягчение каучуковых связок, обладающих некоторой термопластичностью. Применяемые эластичные связки являются прочными и достаточно стойкими к действию СОТС. В качестве

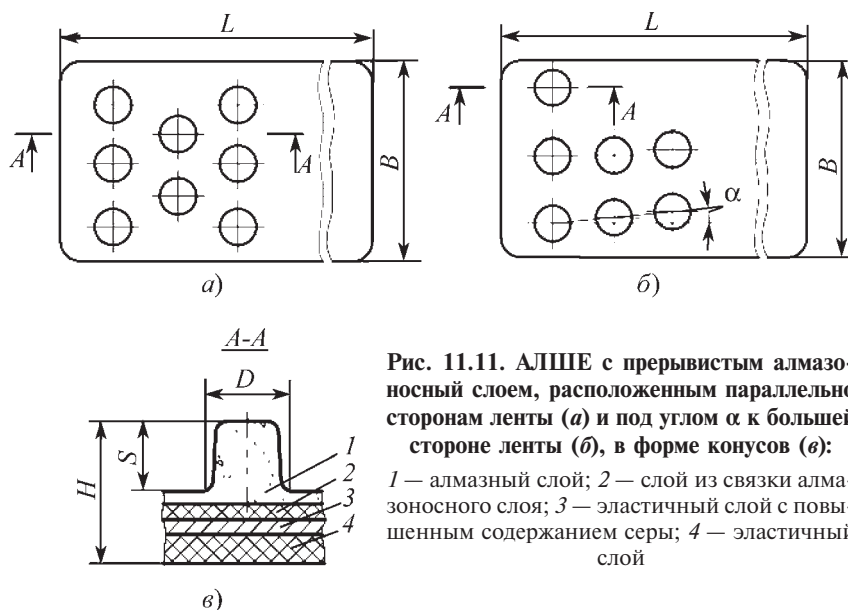
СОТС применяют водный раствор кальцинированной соды и нитрида натрия, а также раствор индустриального масла и керосина. Правильный выбор СОТС при шлифовании лентами позволяет не только отвести тепло из зоны обработки и удалить стружку, но и повысить производительность обработки, стойкость инструмента и значительно улучшить качество обработанной поверхности.

Шлифование профильных и цилиндрических деталей из закаленных и легированных сталей лентами АЛШБ с характеристиками АС2 63/50 В3-06 позволяет получить поверхность с шероховатостью  $Ra\ 0,32...0,63$ . Обработка выполняется с производительностью  $Q = 150...200\text{ мм}^3/\text{мин}$ , удельный расход алмаза  $q = 9...12\text{ мг/г}$ . Применение при полировании лент с характеристиками АСМ 40/28 В3-06 обеспечивает шероховатость обработанной поверхности  $Ra\ 0,08...0,16$  при  $Q = 30...60\text{ мм}^3/\text{мин}$ ,  $q = 3...10\text{ мг/г}$ . После виброконтактного полирования АЛП при оптимальных режимах обеспечивается шероховатость обработанной поверхности  $Ra\ 0,04...0,08$  при  $Q = 100...180\text{ мм}^3/\text{мин}$ ,  $q = 16...25\text{ мг/г}$ . При обработке АТЛП сохраняется геометрическая точность профиля детали, шероховатость обработанной поверхности составляет  $Ra\ 0,07...0,14$ , значительно улучшаются условия труда в связи с отсутствием абразивной пыли и газов, выделяющихся от подгорания основы абразивных лент.

Обработка алмазными лентами на эластичных связках производится на универсальных, специализированных и специальных станках. В ряде случаев для обработки используются токарные, шлифовальные и станки других групп модернизированные специальными быстросъемными приспособлениями, головками и другими устройствами. В массовом и крупносерийном производстве целесообразно применять специализированные полуавтоматы и автоматы, позволяющие получать значительный экономический эффект за счет совмещения процессов, например полирования и точения, автоматизации процесса и улучшения качества обработки.

С целью снижения теплонапряженности процесса обработки используют инструмент, представляющий собой шлифовальную ленту с прерывистым рабочим слоем типа АЛШЕ (рис. 11.11). Лента имеет подслоя толщиной 5 мм.

Наряду с алмазными порошками в лентах используются и порошки сBN (кубонит) — КР 125/100...50/40, КМ 60/40...1/0.



**Рис. 11.11.** АЛШЕ с прерывистым алмазосодержащим слоем, расположенным параллельно сторонам ленты (а) и под углом  $\alpha$  к большей стороне ленты (б), в форме конусов (в):

1 — алмазный слой; 2 — слой из связки алмазосодержащего слоя; 3 — эластичный слой с повышенным содержанием серы; 4 — эластичный слой

Алмазосодержащий слой лент типа АЛШЕ бывает в трех исполнениях и имеет форму усеченных конусов высотой 3, 6 и 10 мм, расположенных параллельно сторонам ленты и под углами  $\alpha = 3^{\circ}09'$  и  $\alpha = 4^{\circ}50'$  к большей стороне ленты. Алмазосодержащий элемент в них является отдельной частью инструмента, которая в зависимости от условий обработки может перемещаться, вдавливаясь в подложку на определенную глубину, и не влияет при обработке на соседние участки рабочей поверхности. Отклонения элементов на рабочей поверхности инструмента в процессе работы обеспечивают снижение засаливания и способствуют как проникновению СОТС в зону резания, так и интенсификации процесса обработки.

Прерывистый характер поверхности шлифовальной ленты АЛШЕ обеспечивает максимальное поступление СОТС в зону резания и наилучшие условия для отвода шлама. Обработка осуществляется при низких температурах, что исключает образование прижогов на обрабатываемых деталях и засаливание инструмента.

Инструментом со шлифовальной лентой АЛШЕ выполняется обработка плоских или круглых деталей на проход.

Обработка ряда деталей, например коленчатых валов, требует применения эластичных инструментов с меньшей степенью деформации рабочего слоя в зоне обработки. С этой целью применяются ленты типа АЛШЛ (рис. 11.12), режущая поверхность которых сформирована из трапециевидальных брусков высотой 5 и 10 мм в двух исполнениях, расположенных параллельно и под углом к меньшей стороне ленты. Бруски через промежуточные слои специальных составов соединены с эластичной основой, благодаря чему даже при жестком алмазоносном слое блоки имеют возможность изгибаться. Алмазоносный слой АЛШЛ изготавливается на различных связках — от высокоэластичных резин до эбонитов в зависимости от требований, предъявляемых к инструменту. Процесс шлифования инструментами из АЛШЛ сопровождается малыми температурами в зоне обработки, что исключает прижоги и нежелательные структурные превращения в материале изделия.

По своим технологическим возможностям обработка инструментом из лент типа АЛШЕ и АЛШЛ занимает область между тра-

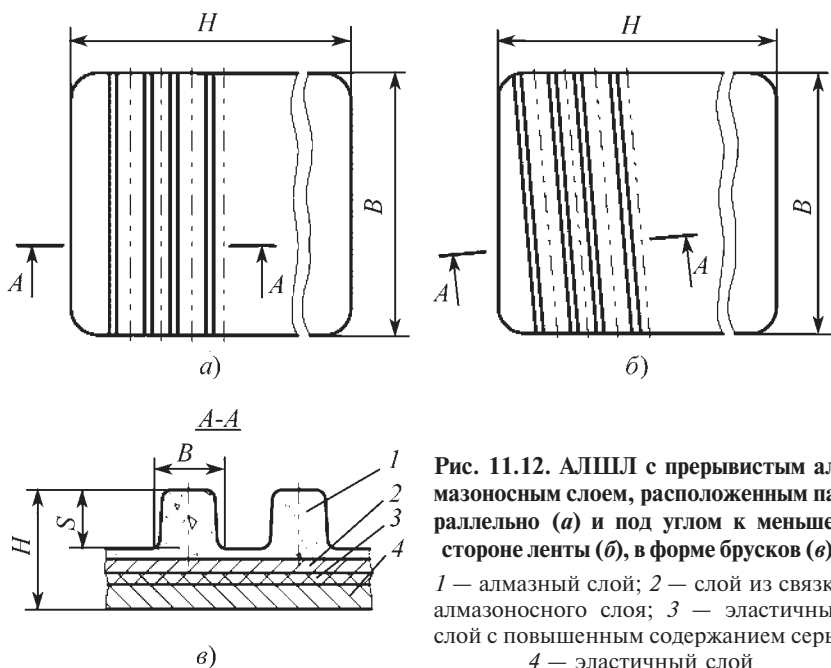


Рис. 11.12. АЛШЛ с прерывистым алмазоносным слоем, расположенным параллельно (а) и под углом к меньшей стороне ленты (б), в форме брусков (в):

1 — алмазный слой; 2 — слой из связки алмазоносного слоя; 3 — эластичный слой с повышенным содержанием серы; 4 — эластичный слой

диционным полированием алмазными эластичными лентами и тонким шлифованием. Обрабатываются изделия практически из любых материалов, применяемых в машиностроении и ремонтном производстве, включая наплавленные и напыленные покрытия высокой твердости.

Из лент АЛШЕ и АЛШЛ изготавливают специальные эластичные круги — ленты наклеиваются на цельный или сборный корпус круга клеем на основе эпоксидных смол.

При ленточном шлифовании и полировании характеристики лент и режимы обработки оказывают большое влияние на состояние поверхностного слоя обработанных изделий. Применение лент с алмазами различной зернистости на различных по эластичности связках позволяет эффективно управлять параметрами шероховатости обработанной поверхности, обеспечивая снижение высотных и увеличение структурных параметров, в частности, ее опорных характеристик.

В табл. 11.5 представлены технологические возможности кругов, изготовленных с использованием лент АЛШЕ и АЛШЛ, по обеспечению шероховатости обработанной поверхности.

### 11.5. Шероховатость обработанной поверхности в зависимости от характеристики алмазных порошков

Марка алмаза	Зернистость алмаза	Относительная концентрация алмаза	Параметр шероховатости $Ra$ , мкм	
			До обработки	После обработки
АСМ	40/28, 5/3	50	0,32...0,63	0,08...0,32
АС2; АС4	80/63, 63/50	100	0,63...1,25	0,32...0,63
АС6	100/80, 80/63	100	12,5...25,0	0,63...1,00
АС15	200/160, 125/100	100; 50	25,0...50,0	1,00...1,60

Особенно перспективно применение кругов из лент АЛШЕ при шлифовании газотермических покрытий из твердых сплавов, при использовании лент с алмазом АС2 зернистостью 80/63, обеспечивается шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  0,25, лент с алмазом АСМ зернистостью 40/28 —  $Ra$  0,08.

В отличие от алмазных бесконечных и конечных лент, инструментом на основе лент АЛШЕ и АЛШЛ можно производить размерную обработку цилиндрических и плоских деталей — производительность обработки достигает  $600 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . На финишных операциях шлифования относительный расход алмаза в инструменте составляет  $3,5...5,0 \text{ мг/г}$ , а при шлифовании без предварительной обработки (в зависимости от режимов шлифования) —  $15...20 \text{ мг/г}$ .

### 11.5. ЛЕПЕСТКОВЫЕ КРУГИ ИЗ СТМ

При финишной обработке деталей применяется специфическая группа эластичных инструментов с режущей частью из шлифовальной шкурки — лепестковые круги. Достоинствами лепестковых инструментов является большое разнообразие конструктивных решений (рис. 11.13), позволяющих создавать их для обработки разных по форме поверхностей, широкий диапазон характеристик, обеспечивающий различные требования к качеству поверхности, а также простота изготовления. В таких кругах сочетаются сравнительно жесткое крепление абразива и высокая эластичность в радиальном и тангенциальном направлениях. Упругое взаимодействие зерен с обрабатываемой поверхностью снижает напряженность теплового потока в процессе резания. Следствием чего является полное устранение прижогов и отсутствие растрескивания поверхностного слоя при обработке хрупких материалов.

Лепестковые круги находят применение в различных отраслях промышленности. Для зачистных, полировальных и шлифовальных работ используют круги, которые изготавливают из шлифовальной шкурки из карбида кремния, корунда, синтетических алмазов и cBN.

Наибольший эффект полирования достигается при обработке кругами с радиально расположенными лепестками, изготовленными из алмазных лент на каучуковых связках (рис. 11.14).

Наиболее производительными являются процессы обработки деталей лепестковыми кругами формы 1А1 размером  $250 \times 76 \times 15$  из лент на каучуковых связках В3-10 и В3-06 с порошками алмаза марок АС2 и АСМ зернистостью  $50/40...40/28$  100 %-ной концентрации.

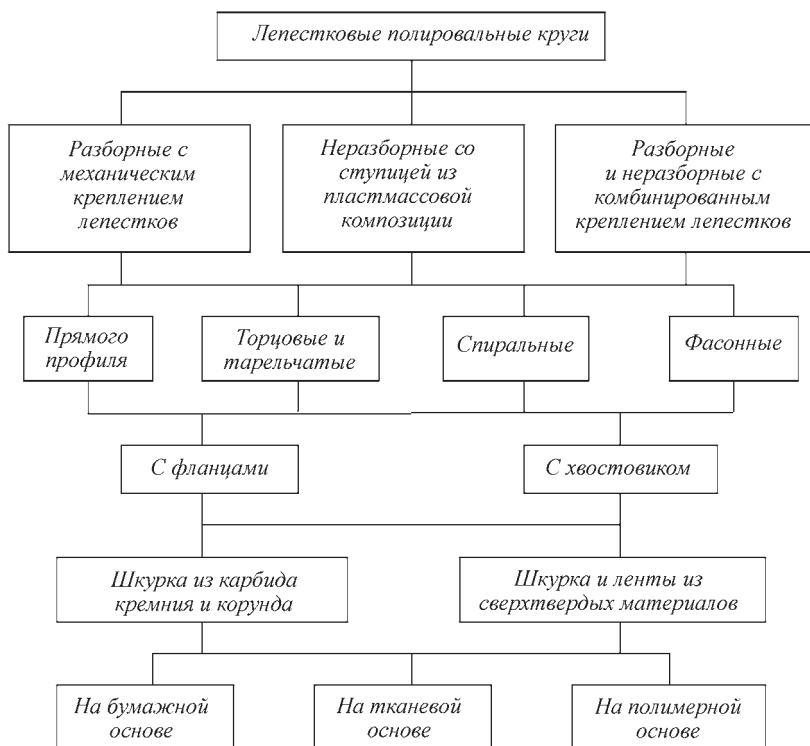


Рис. 11.13. Основные виды лепестковых кругов

Рис. 11.14. Лепестковый круг из алмазных лент

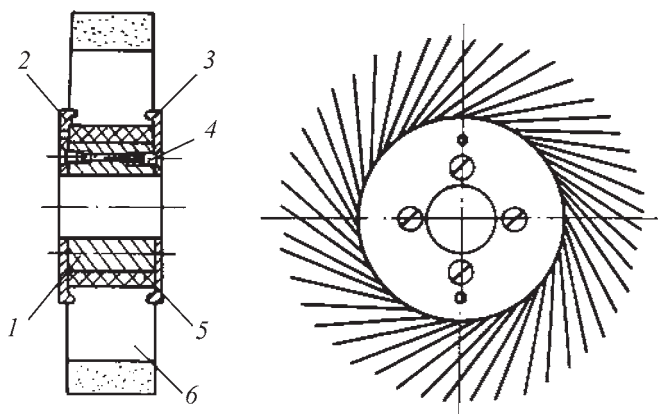


Для получения обработанной поверхности с низкой шероховатостью разработаны инструменты с наклонным расположением ле-



пестков (рис. 11.15), совместившие достоинства шлифовальной ленты и лепесткового круга с радиально расположенными лепестками. Такая установка лепестков увеличивает их упругость и площадь контакта с деталью, а также позволяет элементам круга входить в контакт с обрабатываемой деталью плавно, что значительно уменьшает износ самих лепестков, вызываемый ударами при встрече лепестка с деталью, и улучшает качество обработанной поверхности детали. Конструкции кругов с углами наклона лепестков от  $15$  до  $90^\circ$  позволяют снизить шероховатость обработанной поверхности до  $Ra\ 0,08...0,10$ . При этом относительный расход алмаза в инструменте снижается на  $20...30\%$  по сравнению с обработкой инструментом с радиальным креплением лепестков.

В зависимости от конкретных условий обработки применение лепестковых кругов позволяет в широких пределах варьировать такими показателями процесса, как съём материала, стойкость режущего элемента, шероховатость поверхности, точность обработки и т.д. С этой точки зрения лепестковые круги с регулируемым наклоном абразивных элементов являются «более управляемыми», так как легко изменяемые конструктивные параметры дают возможность изменять работоспособность инструмента в нужном направлении.



**Рис. 11.15. Лепестковый круг из алмазных лент с наклонным расположением режущих элементов:**

1 — ступица; 2, 3 — фланцы; 4 — винт; 5 — эпоксидная композиция; 6 — лепесток

Съем материала при полировании лепестковыми кругами производился в пределах дефектного поверхностного слоя детали, сформировавшегося во время предыдущей операции. Наиболее интенсивно съем материала происходит в начальный период времени обработки ( $\tau < 15...30$  с), при этом наблюдается значительное снижение высоты микронеровностей на обработанной поверхности. В дальнейшем продолжительность полирования не оказывает на шероховатость поверхности детали существенного влияния.

Особенностью лепесткового круга является то, что за счет эластичности материала лепестков в процессе работы имеют место упругие перемещения зерен абразива. Благодаря этому амортизируется удар при врезании в обрабатываемую деталь, у зерен имеется возможность относительно одинаково самоустанавливаться по высоте и более равномерно распределять между собой нагрузку. Изменение в широких пределах площади контакта лепесткового круга с изделием дает возможность управлять количеством режущих элементов в зоне резания, распределением тепловой и силовой нагрузок и формированием свойств поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Прерывистый, импульсный характер резания и вентиляционный эффект, возникающий в зоне обработки, способствуют обновлению затупившихся абразивных зерен и быстрому удалению шлама из зоны обработки.

Алмазные лепестковые круги не требуют правки, лепестки обладают способностью принимать профиль обрабатываемой поверхности. При этом высокая режущая способность и износостойкость инструмента обеспечивают стабильное качество поверхностного слоя изделия. Производительность процесса обработки ( $60...400$  мм<sup>3</sup>/мин в зависимости от зернистости алмаза и свойств обрабатываемого материала) в 1,3–1,5 раза выше, чем при использовании бесконечных лент, а затраты на инструмент сокращаются на 30...40 %. Расход алмаза в инструменте 2...8 мг/г в зависимости от обрабатываемого материала.

Особенно эффективна обработка лепестковыми кругами деталей с фасонными поверхностями, изготовленных из прутковых и тонкостенных нежестких заготовок — валы, оси, втулки, трубы, сосуды; матрицы и пуансоны штампов инструментального производства; нитепроводники с наружной рабочей поверхностью текстильных машин и т.д.

## 11.6. ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КРУГАМИ ИЗ СТМ

Методы финишной обработки зубчатых колес можно условно разделить на две основные группы. Первая группа — обеспечивающие геометрическую точность зубьев, вторая группа — обеспечивающие качество поверхности зубьев.

Отделочная обработка зубьев применяется для колес, изготавливаемых по нормам 5...7 степени точности с шероховатостью боковых поверхностей не ниже 6 класса. Инструменты из СТМ применяются для отделочной обработки термически обработанных колес — шлифование, зубохонингование, полирование.

Хонингование зубьев позволяет не только устранять видимые дефекты поверхности зубьев (забоины, заусенцы), но и снизить погрешности основного шага и профиля, уменьшить биение, а также повысить чистоту обработки. Для данного процесса используются алмазные или сVN-зубчатые хоны — цилиндрические зубчатые колеса или рейки, имеющие соответствующий исходный контур. При зубохонинговании происходит взаимная обкатка колеса и инструмента со скрещивающимися осями, в результате которой, за счет взаимного скольжения, снимается слой металла. В результате зубохонингования снимается припуск с поверхности зубьев 0,02...0,05 мм, время обработки 0,25...1,00 мин. СОТС — керосин, легкое машинное масло. Режимы обработки: скорость продольной подачи  $v_{\text{прод}} = 90$  мм/мин;  $n = 1...2$  дв. ход/мин; сила прижима  $P_{\text{приж}} = 200...500$  Н.

Зубчатые колеса после хонингования рабочих поверхностей зубьев имеют точность в пределах 6...7 степеней и шероховатость поверхности  $Ra$  1,00...0,12, которая зависит от зернистости порошка алмаза в инструменте.

Цилиндрические зубчатые колеса хонингуют на специальных зубохонинговальных станках и на модернизированных зубошевинговальных станках.

Шлифование зубьев осуществляется по методам копирования или принужденного обката (рис. 11.16), поэтому ошибки предварительного нарезания и деформации, образованные термической обработкой, после зубошлифования полностью устраняются. Эта особенность зубошлифования является единственным средством,

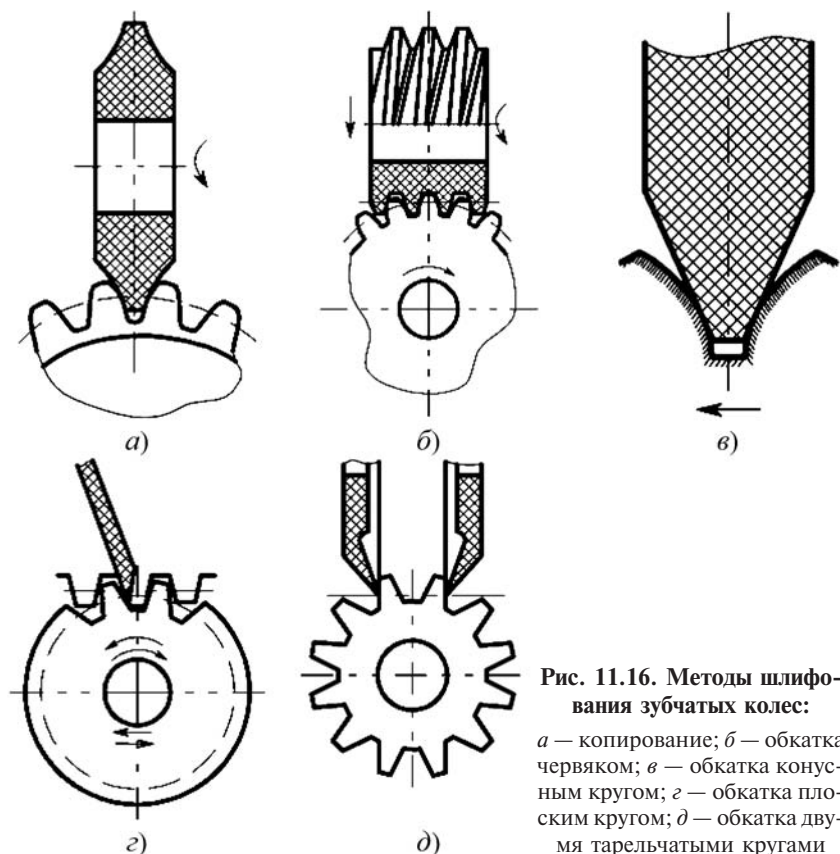


Рис. 11.16. Методы шлифования зубчатых колес:

*a* — копирование; *б* — обкатка червяком; *в* — обкатка конусным кругом; *г* — обкатка плоским кругом; *д* — обкатка двумя тарельчатыми кругами

обеспечивающим получение высокоточных зубчатых колес с закаленными до большой твердости зубьями. При изготовлении точных зубчатых колес, подвергнутых химико-термической обработке, зубошлифование широко применяется для чистовой обработки цементованных и закаленных зубьев, имеющих поверхностную твердость 58...63 HRC. При изготовлении зубчатых колес с азотированными зубьями твердостью 63...70 HRC зубошлифование применяется с целью устранения хрупкой верхней части слоя зубьев и искажений профиля, возникающих вследствие увеличения объема поверхностных слоев зубьев.

Метод копирования основан на воспроизведении рабочей поверхностью шлифовального круга впадины зубьев шлифуемого колеса (рис 11.16, а). Фасонная форма рабочих поверхностей круга образуется в процессе правки, причем алмазы механизма правки совершают относительно круга движение, воспроизводящее эвольвентный профиль зубьев обрабатываемого колеса. В процессе обработки имеется относительное движение круга вдоль оси колеса, что обеспечивает профилирование зубьев по всей их длине. После обработки каждого зуба колесо поворачивается на угол, соответствующий одному или нескольким зубьям (делительный поворот). Этот способ зубошлифования в основном применяется для обработки цилиндрических колес с прямыми внешними зубьями с точностью не выше 6-й степени, шероховатость поверхности зуба в пределах  $Ra\ 0,32...1,25$ . Шлифование по методу копирования нашло также применение при изготовлении точных колес с внутренними зубьями, в том числе и с косыми.

Метод обката основан на зацеплении обрабатываемого колеса с зубом рейки, воспроизводимой поверхностями шлифовального круга. Наиболее производительным способом зубошлифования является шлифование методом непрерывной обкатки червяком (станки Reishauer) (рис 11.16, б). Шлифование зубьев червяком позволяет получать зубчатые колеса 5...6 степени точности с шероховатостью обработанной поверхности в пределах  $Ra\ 0,2...1,0$ .

Шлифование зубьев методом обкатки с периодическим делением осуществляется одним конусным (станки Niles) (рис. 11.16, в), одним плоским кругом (рис. 11.16, г) или двумя тарельчатыми кругами (станки MAAG) (рис. 11.16, д). Точность зубчатых колес, обработанных одним конусным кругом, находится в пределах 5...6 степени, а шероховатость поверхности — в пределах  $Ra\ 0,2...1,0$ . Обработка плоским кругом позволяет обеспечивать точность колес в пределах 3...4 степени точности и шероховатость поверхности  $Ra\ 0,2...1,0$ . Зубошлифование двумя тарельчатыми кругами позволяет получать зубчатые колеса 4–5 степени точности с шероховатостью поверхности  $Ra\ 0,3...1,0$ .

Вид конусных шлифовальных кругов для зубошлифования выбирается, исходя из формы и размеров обрабатываемого зубчатого колеса, модели станка (рис. 11.17).

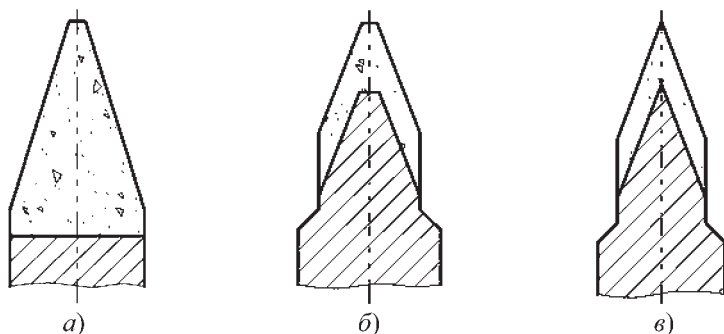


Рис. 11.17. Радиальное сечение рабочей части шлифовальных кругов:

*a* — круг с рабочим слоем из СТМ, напрессованным на алюминиевый корпус;  
*б* — круг с рабочим слоем из СТМ для зубошлифования полного профиля зуба;  
*в* — круг с рабочим слоем из СТМ для зубошлифования эвольвентной поверхности зуба

Для обеспечения бесприжогового зубошлифования и необходимой точности зубчатых колес на станках типа Niles разработаны круги на металлических связках с металлическими и неметаллическими покрытиями зерен.

От типа связки инструмента зависит режущая способность, стойкость круга, производительность зубошлифования, а также качество обработанной поверхности. Для зубошлифования деталей из закаленных и цементированных сталей 40Х, 18ХГТ, 12ХНЗА, быстрорежущих сталей Р6М5 рекомендуются круги на металлических связках М08, М1. Целесообразно применять сВN повышенной прочности марки КР.

Зернистость порошков СТМ для кругов выбирают в зависимости от требуемой шероховатости обработанных зубьев, необходимой производительности процесса, а также исходя из экономических соображений. Шероховатость обработанной поверхности  $Ra \leq 0,63$  и высокая износостойкость инструментов из сВN обеспечивается при использовании порошка сВN зернистостью 160/125.

Режимы зубошлифования колес из закаленной стали коническими кругами из сВN: окружная скорость круга — 25...30 м/с; скорость обкатки на черновых проходах — 186...370 мм/мин, на чистовых проходах — 76...150 мм/мин; число двойных ходов штосселя в

минуту — 50...140; глубина шлифования на черновых проходах — 0,05...0,15 мм; на чистовых проходах — 0,01...0,015 мм.

Главным преимуществом алмазного зубошлифования методом обкатки с использованием алмазных кругов из синтетических алмазов на органических связках является низкая температура обработанной поверхности, что исключает возможность появления прижогов и трещин.

Правка кругов необходима при первичной установке на шпиндель станка для устранения биения и перед чистовыми проходами для получения требуемой геометрии зуба. Выполняют ее алмазными карандашами электроэрозионным методом правки.

Для повышения эффективности зубошлифования разработаны специальные конструкции кругов с прерывистой рабочей поверхностью (рис. 11.18).

Круги с эксцентричным расположением рабочего слоя позволяют обрабатывать зубчатые колеса до 6 степени точности при периоде между правками круга 3 ч, что в 4,5 раза больше, чем при шлифовании кругами обычной конструкции 14ЕЕ1Х. Производительность процесса возрастает в 1,2 раза.

Круги с рабочим слоем в виде зубчатого диска характеризуются улучшенной динамикой и в 1,5–1,8 раза большей стойкостью, до 4 раз большим периодом между правками (рис. 11.18, б). Снижается температура шлифования, что положительно влияет на качество обработки.

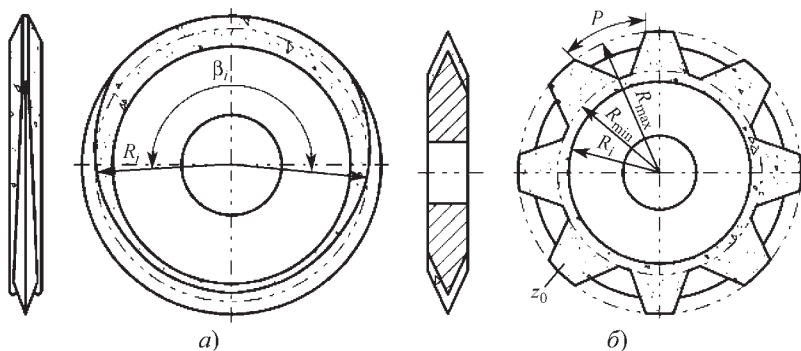
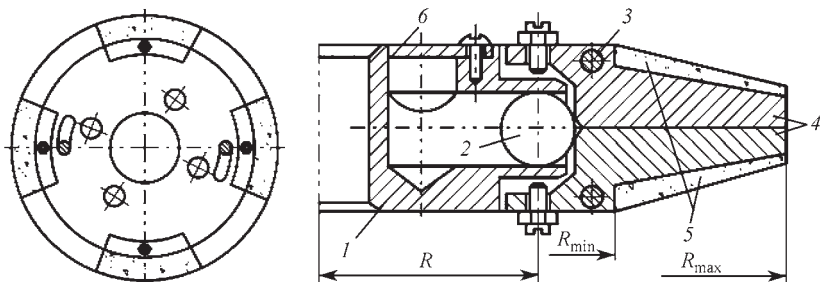


Рис. 11.18. Схемы зубошлифовальных кругов с эксцентричным расположением рабочего слоя (а) и с рабочим слоем в виде зубчатого диска (б)



**Рис. 11.19. Конструкция конического прерывистого шлифовального круга с механическим креплением рабочих элементов из СТМ:**

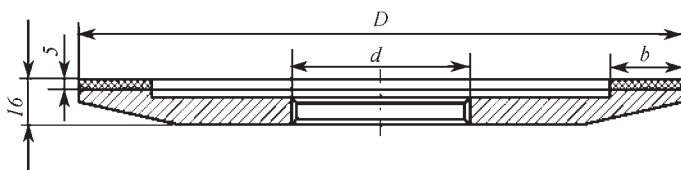
1 — корпус; 2 — шаровой элемент; 3 — ось; 4 — двуплечий рычаг; 5 — абразивный слой; 6 — поворотный диск

Разработана специальная конструкция конического шлифовального круга с прерывистой рабочей поверхностью, в котором рабочие элементы из СТМ закрепляются в корпусе механическим способом (рис. 11.19).

Для изготовления алмазосносного слоя алмазного тарельчатого круга (рис. 11.20) применяют алмазные шлифпорошки марок АСР и АСО зернистостью от 160/125 до 50/40 или микропорошки марки АСМ зернистостью от 60/40 до 28/20 и органическую связку марки Б1.

Относительная концентрация алмазов в объеме алмазосносного слоя 100 и 150. Ширина круга должна быть больше высоты шлифуемых зубьев (табл. 11.6).

Правку алмазного круга следует осуществлять кругом карбида кремния зеленого на керамической связке без охлаждения с помощью специальных приспособлений. Зернистость правящего круга должна быть в два роза больше зернистости алмазного круга.



**Рис. 11.20. Круг алмазный тарельчатый для зубошлифования**



### 11.6. Ширина алмазосносного слоя тарельчатого круга для зубошлифования

Модуль	2,5	2,75...3,25	3,5...5,5	6...7	8...10	11...12
Ширина алмазосносного слоя круга, мм	8	10	16	20	25	30

Режимы зубошлифования колес из закаленной стали тарельчатыми кругами из сВN: окружная скорость круга на черновых и чистовых проходах составляет 25...35 м/с; продольная подача — 0,5...1,0 м/мин; глубина шлифования на черновых проходах — 0,02...0,03 мм; на чистовых проходах — 0,0025...0,005 мм; число циклов выхаживания на черновых проходах 1–2, на чистовых проходах 2–3.

На рис. 11.21 показана зона шлифования при обработке зубчатого колеса двумя тарельчатыми кругами.

Тарельчатые круги из сВN обеспечивают производительность обработки в 1,5–2 раза выше по сравнению со шлифованием абразивными кругами, отсутствие «прижогов» на поверхности зуба и возможность получения зубчатых колес 4–5-й степени точности с отключенными механизмами компенсации износа кругов.

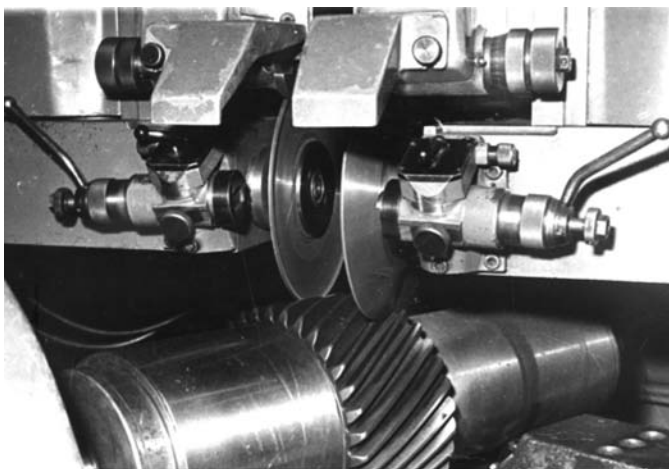


Рис. 11.21. Шлифование зубчатого колеса на станке типа MAAG

Мощность шлифования при использовании кругов из сВN меньше на 20...30 %.

Разработаны круги формы 12V9 со стальным корпусом, алмазосодержащий слой которых выполнен под углом  $5^\circ$ , что позволяет предотвратить «затираание» эвольвентной поверхности зуба при шлифовании зубчатого колеса и сократить период приработки круга.

Режимы зубошлифования колес из закаленной стали такими кругами: скорость стола на черновых режимах — 600 мм/мин; скорость стола на чистовых режимах — 170 мм/мин; подача на врезание на черновых проходах — 0,04 мм; на чистовых проходах — 0,005 мм.

Червячный шлифовальный круг фирмы Krebs представлен на рис. 11.22. В кругах использован сВN-содержащий керамический композит с высокопористой структурой, что обеспечивает инструменту высокую работоспособность.

Фирмой Карр разработана технология шлифования зубчатых колес профильными кругами из сВN (рис. 11.23) Инструмент представляет собой стальной корпус с точно отшлифованным базовым профилем, на который гальваническим способом нанесен рабочий слой, включающий единичный слой зерен сВN, закрепленный никелевой или иной связкой. Такая обработка не требует остановки процесса для правки круга, гарантирует постоянные высокую точность профиля зуба зубчатого колеса и структуру материала его поверхностного слоя. Использование кругов малого диаметра (до 25 мм) дает возможность шлифовать колеса с внутренними зубьями.

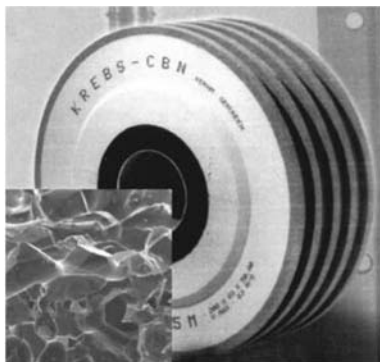


Рис. 11.22. Червячный шлифовальный круг фирмы Krebs



Рис. 11.23. Обработка зубчатого колеса инструментом фирмы Карр

## **11.7. ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СТМ ДЛЯ ВЫГЛАЖИВАНИЯ И НАКАТЫВАНИЯ**

Применение отделочно-упрочняющих методов, основанных на холодном поверхностном пластическом деформировании (ХППД), является эффективным способом повышения долговечности деталей машин. Образование микрорельефа с микронеровностями пологой «обтекаемой» формы, низкие значения их высоты, большие величины относительной опорной длины профиля, наличие слоя деформационного упрочнения повышают износостойкость и сопротивление усталостным нагрузкам.

Наибольшее распространение из методов ХППД в металлообработке получили выглаживание, основанное на взаимодействии инструмента с обрабатываемой поверхностью по схеме скольжения, и накатывание, где инструмент взаимодействует с обрабатываемой деталью по схеме качения. При выглаживании инструмент (выглаживатель) прижимается к поверхности детали фиксированной силой и перемещается по ней со скольжением. При накатывании рабочий элемент накатника (как правило, ролик или шарик) перемещается по обрабатываемой поверхности, совершая вращение вокруг своей оси.

Инструменты для ХППД подвергаются высоким контактным нагрузкам и температурам. Поэтому их материалы должны обладать большой твердостью, способностью сопротивляться истиранию, высоким пределом прочности на сжатие, низким коэффициентом трения и низкой склонностью к схватыванию с обрабатываемым материалом по металлу, большой термостойкостью.

Для изготовления выглаживателей широко применяются поликристаллические композиционные материалы на основе синтетических сверхтвердых материалов. Микроструктура таких композитов содержит каркас из частиц СТМ, между которыми находится связующее.

Разработана технология получения алмазного композиционного термостойкого материала (АКТМ) на основе алмаза и карбида кремния. Введение в композит нанопорошка алмаза увеличивает дисперсность карбида кремния, образующегося при взаимодействии пропитывающего шихту кремния с зёрнами алмаза, уменьшает количество несвязанного кремния в композите

и, таким образом, повышает прочность материала на сжатие. Полученный композит отличается от монокристаллов более высокой термостойкостью и свободен от такого недостатка, как анизотропия свойств.

По своим физико-механическим и эксплуатационным характеристикам АКТМ существенно превосходит известные синтетические поликристаллические алмазы:

- термостойкость АКТМ сохраняется неизменной практически до температуры 1200 °С, в то время как термостойкость аналогов (поликристаллов типа АСПК и природного алмаза)  $\leq 700$  °С;
- предел прочности при сжатии АКТМ превышает прочность поликристалла-аналога на 30 %.

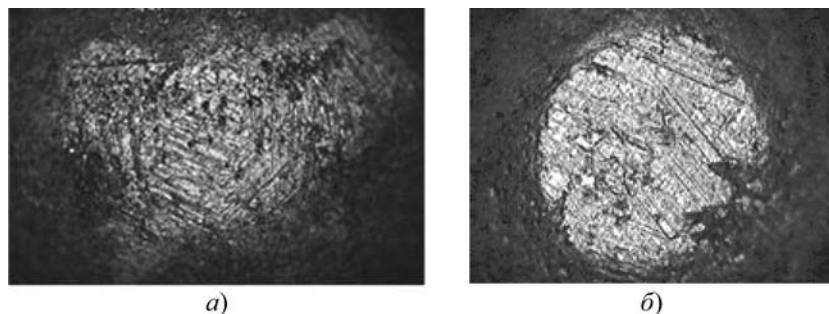
#### *Физико-механические характеристики АКТМ*

Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	3,45
Твердость по Кнупу, ГПа . . . . .	50...55
Трещиностойкость, МПа·м <sup>1/2</sup> . . . . .	10...12
Прочность на сжатие, ГПа . . . . .	2,2...3,1
Модуль Юнга, ГПа . . . . .	970
Теплопроводность, Вт/(м·К) . . . . .	250...300
Износостойкость при правке корундового круга, мг/кг . . . . .	~4,4
Термостабильность, К . . . . .	~1500

Указанные свойства позволяют эффективно применять данный композит в качестве материала рабочей части выглаживателей. Вставки  $\varnothing 4 \times 5$  мм из АКТМ после металлизации медью запаивают в стальной корпус.

Заточку рабочей части выглаживателя производят на заточном станке в приспособлении, обеспечивающем получение на вершине сферы шероховатость  $Ra$  0,044...0,048.

Алмазными выглаживателями могут обрабатываться как цветные металлы и незакаленные стали, так и стали, закаленные до высокой твердости. Применение СОТС положительно влияет на качество обработанной поверхности и на стойкость инструмента. Экспериментально установлено, что из наиболее доступных видов СОТС при выглаживании сталей наиболее эффективным является масло индустриальное И-20А.



**Рис. 11.24.** Вид изношенной поверхности выглаживателя из АКТМ (а) и АСПК (б)

Характер износа выглаживателей из АКТМ при обработке сталей — адгезионный; на изношенной поверхности видны «язвы» выкрашивания кристаллов алмаза (рис. 11.24).

Характер износа выглаживателя из поликристаллического алмазного материала АСПК отличается от АКТМ. На изношенной поверхности отсутствуют «язвы», характерные для адгезионного износа.

Повышение термостойкости выглаживателей за счет применения вставок из АКТМ позволяет повысить скорость выглаживания и производительность процесса при снижении силы трения.

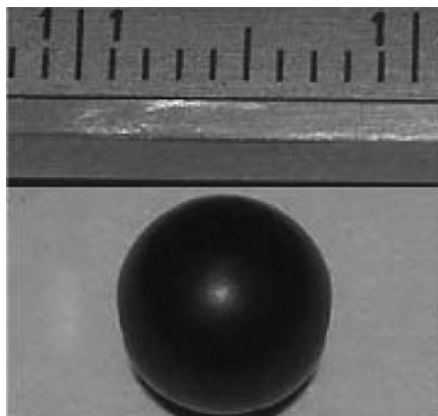
АКТМ является перспективным материалом для выглаживателей, применяемых для обработки изделий из стали. В то же время он не позволяет эффективно обрабатывать изделия из титановых сплавов, циркония, ниобия, что связано с повышенной склонностью к схватыванию алмаза с этими материалами.

Отделочно-упрочняющую обработку изделий из этих материалов целесообразно выполнять накатыванием шарами, т.е. методом, в котором трение скольжения сведено до минимума, а преобладает трение качения.

Разработана технология изготовления рабочих элементов накатников из АКТМ (рис. 11.25), после механической обработки шероховатость поверхности шара —  $Ra$  0,16.

Накатники с рабочим элементом из АКТМ показали высокую работоспособность при обработке изделий из титановых сплавов: при исходной шероховатости обрабатываемой поверхности  $Ra$  5...7 мож-

Рис. 11.25. Шар из АКТМ



но получить шероховатость  $Ra 0,15$  для титанового сплава ВТ1-0 и  $Ra 0,25$  — для титанового сплава ВТ22; при накатывании поверхности изделия из титанового сплава ВТ1-0 микротвердость увеличивается в 1,6 раза при глубине упрочненного слоя до 400 мкм, при накатывании поверхности изделия из титанового сплава ВТ22 — в 1,1 раза при глубине упрочненного слоя до 100 мкм; стойкость рабочего элемента из АКТМ при накатывании титановых сплавов как минимум в 5 раз превышает стойкость рабочего элемента из ШХ15.

Применение накатников с рабочим элементом из АКТМ позволяет существенно расширить технологические возможности процесса накатывания и снизить вероятность появления брака.

## 11.8. ДОВОДОЧНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

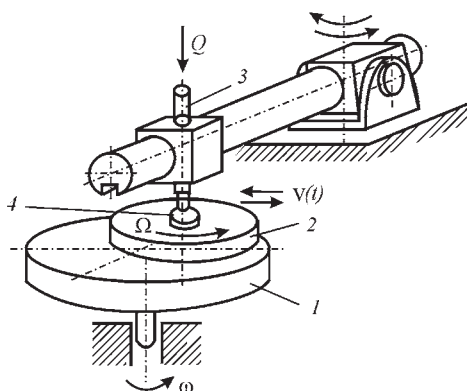
В зависимости от типа инструмента различают два вида доводки: свободным абразивом (суспензиями, пастами) и закрепленным абразивом (инструментом, шаржированным абразивами). Доводка свободным абразивом — менее совершенный процесс, требует больших затрат вспомогательного времени на нанесение абразива и промывку деталей. Доводка закрепленным абразивом обеспечивает более стабильные показатели производительности труда и качества поверхности.

По способу подачи доводочной смеси различают доводку с непрерывной подачей и с периодическим дозированным нанесением смеси на притир. В первом случае суспензия (жидкая паста) непрерывно перемешивается и подается на рабочую поверхность притира. Отработанную смесь пропускают через магнитный фильтр или сепаратор до тех пор, пока измельчение абразивных зерен не приводит к заметному снижению производительности процесса. При доводке с периодическим нанесением пасты на притир необходимо вмешательство оператора или создание специальных дозирующих устройств.

Одна из разновидностей процесса доводки — обработка шаржированными притирами. При этом предварительно шаржируют притир свободным абразивом для насыщения поверхностного слоя инструмента закрепленными абразивными зернами. В процессе доводки на поверхность притира наносят только слой смазки. Шаржированные притиры применяют, как правило, на финишных операциях с добавлением алмазного микропорошка зернистостью  $1/0...7/5$ . Доводка шаржированными притирами обеспечивает наиболее высокую точность (до  $0,1...0,3$  мкм) и минимальную шероховатость ( $Ra$   $0,01...0,04$ ) поверхности.

Актуальной проблемой является совершенствование методов алмазно-абразивной доводки и полирования прецизионных плоских поверхностей из тугоплавких материалов, в том числе конструкционной керамики. Как правило, финишную обработку плоских прецизионных поверхностей подобных деталей выполняют по методу свободной притирки при силовом замыкании кинематической пары «инструмент—заготовка» и соприкосновении ее звеньев по поверхности. Так, на полировально-доводочных станках типа ПД или ШП, имеющих поводковый исполнительный механизм (рис. 11.26), ведущее нижнее звено 1 (заготовка) вращается, а ведомое верхнее 2 (инструмент) совершает вместе с поводком 3 возвратно-поступательное движение подачи относительно нижнего, а также свободное вращательное движение, обусловленное трением в контакте звеньев 1 и 2. Самоустановка верхнего звена на нижнем под действием силы  $Q$  осуществляется благодаря шаровому шарниру 4, что не препятствует свободному перемещению верхнего звена. Управление процессом формообразования основано на представлении о линей-

Рис. 11.26. Схема обработки плоской поверхности по методу свободного притира



ной зависимости скорости съема материала от нагрузки на каждом участке заготовки и от относительной скорости звеньев 1 и 2 на этом же участке.

Многофункциональность связей между технологическими факторами процесса (к ним относятся угловая скорость  $\Omega$  свободного вращения верхнего звена, скорости движения его точек относительно нижнего звена, распределение контактного давления по обрабатываемой поверхности, момент сил сцепления ведомого и ведущего звеньев, изнашивание каждого из элементарных участков поверхностей звеньев и т.д.) обуславливает непрерывное изменение формы заготовки и инструмента в процессе их взаимной притирки, т.е. имеет место не эквидистантный съем припуска. Поэтому формообразование прецизионной плоской поверхности невозможно без периодического контроля ее формы и соответствующей корректировки настроечных параметров, из-за чего не удастся точно прогнозировать результат обработки.

Решить задачу эквидистантного съема припуска позволяет стабилизация скорости перемещения инструмента 2 (относительно заготовки 1) и времени контактирования, а также обеспечение равномерного распределения давления в зоне контакта заготовки с инструментом. Для стабилизации скорости перемещения инструмента 2 относительно заготовки 1 необходимы и достаточны следующие два условия:

$$|v(t) - \omega(t)A(t)| = \text{const}; \quad (11.4)$$



$$\Omega(t) = \omega(t), \quad (11.5)$$

где  $v(t)$  — скорость возвратно-поступательного движения подачи в функции времени, м/с;  $t$  — время, с;  $\omega$ ,  $\Omega$  — угловые скорости соответственно ведущего (заготовки) и ведомого (инструмента) звеньев, с<sup>-1</sup>;  $A(t)$  — расстояние между осями вращения инструмента и заготовки в функции времени, м.

Согласно условию (11.4), при изменении  $v(t)$  в любой момент времени должно обеспечиваться постоянство модуля векторной разности между нею и окружной скоростью ведущего звена. Выполнение условия (11.5) означает мгновенно-поступательное относительное перемещение звеньев.

Из анализа уравнения динамики движения ведомого звена при полировании или доводке по методу свободной притирки на станках ПД или ШП следует, что ни настройкой станка, ни выбором режима обработки обеспечить стабилизацию скорости относительного движения инструмента 2 и заготовки 1 в зоне их контакта не удастся. Эта скорость может быть стабилизирована в каждый момент времени и в любой точке указанной зоны лишь при условии введения дополнительной кинематической цепи от шпинделя заготовки к инструменту, которая благодаря своим упругим свойствам не препятствовала бы подаче инструмента вдоль поверхности заготовки.

Такая схема показана на рис. 11.27. Здесь вращение заготовки 2 с угловой скоростью  $\omega$  передается посредством упругой кинематической

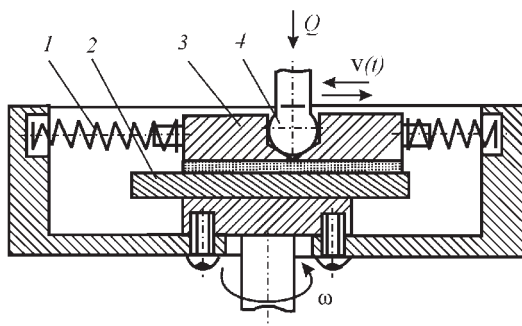


Рис. 11.27. Схема устройства для стабилизации скорости относительного движения инструмента и заготовки

ской связи  $I$  (винтовых пружин растяжения) инструменту  $3$  с передаточным отношением, равным единице, и в том же направлении, но вокруг собственной оси инструмента, т.е. оси шарового шарнира  $4$  поводка. Таким образом, вращение инструмента происходит с угловой скоростью заготовки, т.е. выполняется условие (11.5). Для выполнения условия (11.4) необходимо обеспечить вращение заготовки и инструмента с переменной по времени угловой скоростью. Учитывая, что угол качания поводка на полировально-доводочных станках рассматриваемого типа изменяется в функции времени по гармоническому закону, можно в первом приближении стабилизировать относительную скорость инструмента и заготовки при выполнении условия:

$$\omega = \frac{\omega_{\text{к max}}}{2 \sin(\psi_{\text{max}}/4)}, \quad (11.6)$$

где  $\psi_{\text{max}}$  — максимальный угол качания поводка, рад;  $\omega_{\text{к max}}$  — угловая скорость вращения привода качания,  $\text{с}^{-1}$ .

Предотвратить возникновение локальных погрешностей формы поверхности, обусловленных периодическим повторением траектории движения инструмента при его принудительном вращении, можно двумя способами. Во-первых, можно периодически (за каждый оборот заготовки) осуществлять смещение инструмента относительно поверхности заготовки. Во-вторых, можно обеспечить саморегулируемость вращения инструмента посредством введения упругой кинематической связи от шпинделя заготовки к вращающемуся поводку.

Для выравнивания контактного давления в рабочей зоне следует изменить действующую на инструмент пространственную систему сил (рис. 11.28, *а*) на центральную (рис. 11.28, *б*). Действительно, поскольку в первом случае (см. рис. 11.28, *а*) взаимодействие поводка  $3$  с инструментом  $2$  осуществляется через шаровую опору  $4$ , равнодействующая сил  $Q$  и  $F$  (соответственно прижима и подачи) приложена к центру опоры, который не лежит на обрабатываемой поверхности, где действуют элементарные силы  $p$  и  $f$  (соответственно, нормального давления и сцепления с вращающейся поверхностью заготовки  $I$ ).

Из условия равновесия инструмента как тела, вращающегося в горизонтальной плоскости с постоянной угловой скоростью, сле-

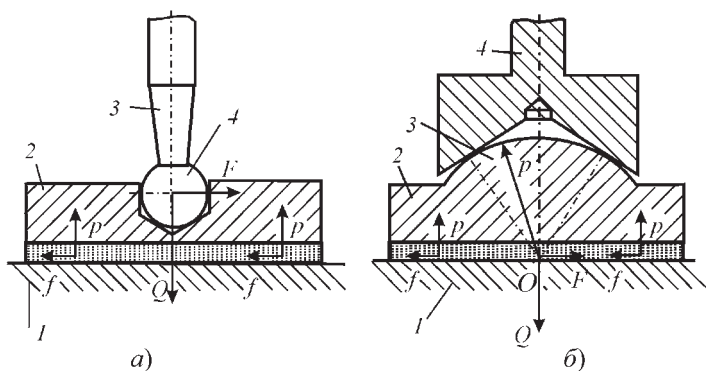


Рис. 11.28. Схема шаровой опоры инструмента при действии на него пространственной (а) и центральной (б) системы сил

дует, что момент равнодействующей сил трения относительно центра шаровой опоры должен быть уравновешен моментом равнодействующей элементарных сил нормального давления. Это говорит о неравномерном распределении контактного давления. Для его выравнивания необходимо использовать шаровую опору, радиус  $\rho$  кривизны которой выбирают из условия расположения центра  $O$  кривизны на поверхности обработки (см. рис. 11.28, б).

Принудительное вращение полировального или доводочного инструмента следует осуществлять с помощью симметричной упругой кинематической связи для исключения ее влияния на перераспределение контактного давления. Вместе с тем влияние несимметричности упругой связи (например, в виде винтовых пружин растяжения (см. рис. 11.27)), а также опрокидывающего момента силы  $Q$  прижима (возникающего при выходе части инструмента за край заготовки) и сил трения между ними на распределение контактного давления может быть устранено при расположении системы упругих связей в плоскости центра шарнира. При этом величину суммарной реакции упругой связи рассчитывают исходя из начала возможных перемещений инструмента под действием приложенных сил и реакций связей, а также их моментов или согласно теореме о минимуме потенциальной энергии системы сил и реакций связей, действующих на инструмент [17].

Выравнивание суммарного времени контактирования любого элемента поверхности заготовки с прерывистой поверхностью доводочного инструмента достигается благодаря тому, что последний имеет концентрические кольцевые выступы, радиусы ограничивающих окружностей которых выбраны из условия постоянства площадей, не заполненных выступами зон. Применение связанного абразива позволяет существенно снизить трудоемкость финишной обработки прецизионных плоских поверхностей в результате сокращения (или даже полного исключения) царапин, а также уменьшения глубины дефектного слоя. Кроме того, расход связанного абразива меньше, чем свободного.

## 11.9. ПАСТЫ И СУСПЕНЗИИ ИЗ ПОРОШКОВ СТМ

### 11.9.1. Структурные составляющие паст и суспензий

Для финишной обработки деталей из сталей, сплавов и неметаллических материалов широко применяются пасты и суспензии из СТМ. Они представляют собой сложные многокомпонентные структурированные системы, состоящие из порошков природного и синтетического алмаза, сВN и основы — композиционной связки.

Как абразивные составляющие в состав паст из СТМ входят шлифпорошки из синтетического алмаза марок АС2, АС4, АС6 зернистостью от 50/40 до 125/100, микропорошки марок АМ, АН, АСМ, АСН и др. зернистостью от 1/0 до 60/40, субмикропорошки марок АСМ1, АСМ5 зернистостью 0,1/0, 0,3/0, 0,5/0, 0,7/0,3, 1/0,5, микропорошки из сВN (кубонит марки КМ) зернистостью от 1/0 до 60/40. Суспензии изготавливаются из микропорошков алмаза и сВN зернистостью 1/0...10/7 и субмикропорошков.

В качестве основы используют такие вещества, как минеральные масла, поверхностно-активные вещества (ПАВ — смеси сложных эфиров, одно- и многоатомных спиртов, высокомолекулярные жирные кислоты и полимерные соединения), структурообразователи (воски, стеарины, парафины), смазочные материалы, присадки и др.

Химическая промышленность выпускает многочисленные группы и классы ПАВ, что позволяет широко использовать их в до-

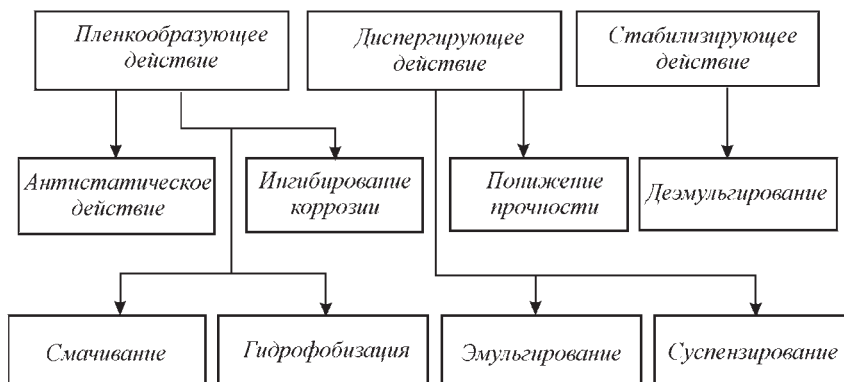


Рис. 11.29. Действие ПАВ в основах паст и суспензий

водочных и полировальных пастах, суспензиях, смазочно-полировальных жидкостях, водных моющих композициях, присадках, адгезионных составах и т.д. Использование высокомолекулярных полимерных ПАВ позволяет получить пасты мазеобразной и твердой консистенции с высокими физико-механическими свойствами, повысить диспергирующие показатели паст, улучшить в целом стабилизацию композиционной системы. На рис. 11.29 представлены некоторые процессы, обусловленные действием ПАВ в основах паст и суспензий.

### 11.9.2. Контроль качества паст и суспензий

**Консистенция паст.** Для определения пенетрации (числа проницаемости), характеризующей консистенцию паст, от каждой партии из любой части ее объема отбирают пробы мазеобразной пасты массой 110 г и твердой пасты массой 30 г. Пробой мазеобразной пасты заполняют специальный сосуд для испытаний, при этом в сосуде не должно быть пустот. Число проницаемости определяется с помощью пенетromетра, снабженного плунжером с конусом или иглой. Плунжер устанавливается на высоту не более 40 мм от пробы паст, затем определяется глубина погружения конуса или иглы в образец пасты.

**Абразивная способность паст** определяется на установке УАС-2М (рис. 11.30), представляющей собой настольный плоскошлифовальный станок с горизонтально расположенной планшайбой из высо-

**Рис. 11.30. Установка УАС-2М для определения абразивной способности алмазных паст**



котвердой керамики. По поверхности планшайбы с частотой вращения  $100 \text{ мин}^{-1}$  возвратно-поступательно перемещается блок с образцами ( $60 \text{ дв. ход/мин}$ ) в виде цилиндров из твердого сплава марки ВК6 или ВК8 с площадью основания  $100 \text{ мм}^2$  и высотой не более  $10 \text{ мм}$ . Испытываются одновременно три образца, укрепленных по краям стального диска на равном расстоянии друг от друга. Предварительно взвешенный блок с образцами прижимается к планшайбе грузом массой  $2 \text{ кг}$ . Шлифуют образцы навеской пасты ( $100 \text{ мг}$  из микропорошков и  $300 \text{ мг}$  из шлифпорошков), помещенной перед испытанием на середину планшайбы, с прибавлением  $10$  капель веретенного масла или дистиллированной воды (в зависимости от растворимости и смываемости пасты). После  $30 \text{ мин}$  шлифования блок с образцами промывают бензином или спиртом, сушат и взвешивают на аналитических весах для определения убыли массы. Абразивная способность пасты определяется по формуле  $A = M_1 - M_2$ , где  $M_1, M_2$  — масса блока с образцами до и после испытания, мг. При необходимости величину  $A$  делят на массу навески пасты, взятую для испытаний. После двух испытаний определяют среднеарифметическое. Расхождение между двумя определениями не должно превышать  $20 \%$ .

**Шероховатость поверхности, обработанной пастами и суспензиями.** При испытании применяется установка типа УАС-2М с

планшайбой из стали 10. Испытывают образцы из твердого сплава марки ВК6 и ВК8 в виде цилиндра или прямоугольной призмы с площадью основания  $100 \text{ мм}^2$  и высотой не более 10 мм. Обрабатывают одновременно три образца. При испытаниях ручным методом применяют притиры с размерами рабочей поверхности  $200 \times 100 \text{ мм}$  из серого мелкозернистого чугуна марки СЧ18-36. При испытаниях механическим способом на заранее подготовленную поверхность планшайбы наносят навеску пасты (суспензии) следующей массы: для зернистостей 20/14...60/40 — 0,002 г; для зернистостей 5/3...14/10 — 0,003 г; для зернистостей 1/0...3/2 — 0,004 г.

Навеску алмазной пасты помещают на планшайбу, добавляют одну–три капли разбавителя. В зависимости от пасты в качестве разбавителя используют дистиллированную воду или очищенный керосин. Алмазную суспензию равномерно распределяют по рабочей поверхности планшайбы с помощью твердосплавной пластины. Блок с образцами вставляют в обойму, на которую устанавливают груз, и соединяют с механизмом установки. Доводку образцов пастами проводят в течение 5 мин для зернистостей 14/10...60/40 и 2 мин для зернистостей 1/0...10/7. Шероховатость поверхности более  $Ra 0,32$  можно проконтролировать на микроскопе сравнения, а меньшую — с помощью микроинтерферометра по параметру  $Rz$ .

**Скорость съема пастами и суспензиями.** Для испытаний используют шлифовальный станок настольного типа с частотой вращения 80 об/мин. Навески пасты помещают между двумя стеклянными дисками, тщательно растирают, растертую пасту с обоих дисков переносят на ткань шлифовальника (искусственную замшу), распределяют равномерно по всей поверхности. Испытуемые образцы — пластины монокристаллического кремния марки КЭФ 4,5/0,1, ЭКЭС 0,01 диаметром 25...35 мм. Три образца кремния приклеивают к специальной головке по концентрической окружности на одинаковом расстоянии друг от друга. Головку с образцами устанавливают в направляющие ролики, создают давление  $12 \pm 2 \text{ кПа}$  и полируют  $30 \pm 0,5$  мин. В качестве разбавителя в зону обработки во время полирования прибавляют спирт со скоростью 60...80 капель/мин. Скорость съема определяют по величине снятого слоя кремния.

**Термостойкость паст** характеризуется наибольшей температурой, при которой паста сохраняет эксплуатационные свойства. Для определения термостойкости используют установку с нагреваемым

стержнем, на который наносится навеска пасты массой 0,3 г. При первых видимых изменениях состояния нагреваемого образца регистрируют показания термометра. Проба пасты может расплавиться и из нее начинает вытекать, испаряться или выгорать наименее термостойкий компонент. Температура нагрева, зарегистрированная при этом, и характеризует термостойкость пасты.

**Коллоидная стабильность паст.** Для определения коллоидной стабильности на специальную подставку прибора устанавливают емкость, заполненную навеской испытуемой основы пасты, накрывают фильтровальной бумагой, предварительно пропитанной испытуемой основой. Затем сверху помещают еще несколько слоев фильтровальной бумаги, устанавливают прижимное устройство с грузом массой 1 кг и выдерживают 30 мин при комнатной температуре. После этого взвешивают емкость с пробой основы и фильтровальной бумагой, через которую под давлением отпрессовывались жидкие ингредиенты, входящие в основу пасты.

Массовую долю отпрессованной жидкости вычисляют по формуле

$$x = \frac{(G_1 - G_2)100}{G} \%, \quad (11.7)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  — масса емкости с пробой основы и фильтровальной бумаги до и после испытания, г;  $G$  — масса пробы основы пасты, взятой для испытания, г.

### 11.9.3. Технические характеристики и назначение паст и суспензий

Пасты и суспензии из СТМ изготавливают с нормальной (Н), повышенной (П) и высокой (В) массовой долей порошка. Массовые доли порошка алмаза в пастах разных зернистостей приведены в табл. 11.7 (массовые доли микропорошков из cBN такие же, как и алмаза). Массовые доли микропорошков из СТМ в суспензиях соответствующих зернистостей те же, что и в пастах.

По консистенции пасты из СТМ подразделяются на мацеобразные (М) и твердые (Т). Для мацеобразных паст консистенция при температуре  $20 \pm 5$  °С должна находиться в пределах от 100 до 400 делений пенетрометра, твердых — от 20 до 80 делений.



## 11.7. Содержание порошка алмаза в пасте

Зернистость алмаза, мкм	Массовая доля порошка, %			Цвет пасты и этикетки
	Н	П	В	
125/100	40	60	—	Сиреневый
100/80	40	60	—	
80/63	40	60	—	
63/50	20	40	—	
50/40	20	40	—	
60/40	8	20	40	Красный
40/28	8	20	40	
28/20	6	15	30	Голубой
20/14	6	15	30	
14/10	6	15	30	
10/7	4	10	20	Зеленый
7/5	4	10	20	
5/3	4	10	20	
3/2	2	5	10	Желтый
2/1	2	5	10	
1/0	2	5	10	
0,7/0,3	2	5	10	Не окрашивается
0,5/0,1	2	5	10	
0,3/0	2	5	10	

Абразивная способность паст, изготовленных на основе шлифпорошков из синтетического алмаза, приведена в табл. 11.8, а нормы аб-

разивной способности паст из микропорошков по ГОСТ 25593–83 — в табл. 11.9.

### 11.8. Средняя абразивная способность алмазных паст из шлифпорошков

Зернистость алмаза, мкм	Абразивная способность пасты, мг, при массовой доле шлифпорошка			
	Н		П	
	Норма (не менее)	Фактически	Норма (не менее)	Фактически
125/100	160	200	220	250
100/80	150	190	200	240
80/63	140	180	190	210
63/50	130	150	180	200
50/40	125	140	175	190

### 11.9. Нормы абразивной способности паст из микропорошков алмаза

Зернистость алмаза, мкм	Абразивная способность пасты, мг, не менее, при массовой доле микропорошка		
	Н	П	В
60/40	30	50	75
40/28	30	50	75
28/20	28	45	65
20/14	26	42	62
14/10	22	40	54
10/7	18	27	47
7/5	13	24	42
5/3	9	15	30

Из табл. 11.10 следует, что значение абразивной способности паст из микропорошков кубонита по всем зернистостям в среднем в 2 раза ниже, чем микропорошков алмаза. Скорость съема материала (из образцов кремниевых пластин) при полировании пастами из субмикропорошков природного и синтетического алмаза приведена в табл. 11.11.

### 11.10. Абразивная способность паст из сВN

Зернистость сВN, мкм	Абразивная способность пасты, мг, при массовой доле микропорошка сВN					
	Н		П		В	
	Норма (не менее)	Фактически	Норма (не менее)	Фактически	Норма (не менее)	Фактически
60/40	30	35	50	76	75	80
40/28	30	32	50	75	75	79
28/20	28	30	45	60	65	72
20/14	26	28	42	56	62	68
14/10	22	25	40	50	54	63
10/7	18	20	27	35	47	60
7/5	13	18	24	30	42	48
5/3	9	12	15	20	30	41

### 11.11. Скорость съема материала при полировании пастами из субмикропорошков алмаза

Зернистость алмаза, мкм	Массовая доля алмаза, %	Скорость съема материала, мкм/мин, не менее, пастами из субмикропорошков алмаза марок	
		AM, ACM1	AM5, ACM5
0,7/0,3	2	0,60	0,45
	5	0,70	0,50
	10	0,80	0,60

Окончание табл. 11.11

Зернистость алмаза, мкм	Массовая доля алмаза, %	Скорость съема материала, мкм/мин, не менее, пастами из субмикropорошков алмаза марок	
		AM, ACM1	AM5, ACM5
0,5/0,1	2	0,40	0,35
	5	0,45	0,40
	10	0,50	0,45
0,3/0	2	0,30	0,25
	5	0,35	0,30
	10	0,40	0,35
0,1/0	2	0,10	0,05
	5	0,12	0,07
	10	0,15	0,10

При контроле шероховатости поверхности материалов, обработанных пастами из СТМ, образцы должны были иметь качество поверхности ниже на один разряд по сравнению с нормативной для данной зернистости пасты. В табл. 11.12 приведены значения достигаемой шероховатости поверхности, обработанной пастами из микropорошков алмаза (перед чертой) и из микropорошков сBN (кубонит) (после черты) зернистостью 1/0...60/40.

**11.12. Шероховатость поверхности, обработанной пастами из микropорошков алмаза (перед чертой) и из микropорошков сBN (кубонит) (после черты)**

Зернистость порошков СТМ	Ra, мкм, не более	
	До обработки	После обработки
60/40	0,400/0,400	0,200/0,320
40/28	0,200/0,320	0,160/0,250
28/20	0,160/0,250	0,125/0,200

Окончание табл. 11.12

Зернистость порошков СТМ	Ra, мкм, не более	
	До обработки	После обработки
20/14	0,125/0,200	0,100/0,160
14/10	0,100/0,160	0,080/0,125
10/7	0,080/0,125	0,063/0,100
7/5	0,063/0,100	0,050/0,080
5/3	0,050/0,080	0,040/0,063
3/2	0,040/0,063	0,032/0,050
2/1	0,032/0,050	0,025/0,040
1/0	0,025/0,040	0,020/0,032

Кубонитовые пасты изготавливаются из микропорошков кубонита (КМ) зернистостью 1/0...60/40. Массовая доля порошка в пастах из СТМ существенно влияет на эффективность обработки материалов. Пониженное содержание порошка в пастах приводит к снижению производительности обработки. Высокое содержание порошка в пастах, превышающее оптимальное значение, приводит к нарушению структуры пасты и накоплению шлама, что также значительно снижает работоспособность пасты.

Пасты и суспензии из СТМ по смываемости разделяются на смываемые органическими растворителями — тип «О», водой — «В», водой и органическими растворителями — «ВО» (универсальная паста).

Пасты, смываемые органическими растворителями, рекомендуются для обработки металлов и сплавов, применяются в основном при доводке и полировании. Они обеспечивают высококачественную зеркальную поверхность с чистым и ровным отражением. Разбавляются они различными маслами, керосином, их смесью, смываются керосином, бензином и другими органическими растворителями.

Пасты и суспензии, смываемые водой «В», рекомендуются для обработки неметаллических твердых материалов, а также металлов в

тех случаях, когда недопустимо применение огнеопасных жидкостей для промывки обработанных изделий. Они разбавляются и смываются 1 %-ным водным раствором тринатрийфосфата, слабыми растворами соды или дистиллированной водой. Применение жесткой воды ухудшает смываемость паст. Пасты типа «В» характеризуются высокими адгезионными свойствами, способствующими прочному удержанию абразивной прослойки на поверхности притира.

Пасты и суспензии из СТМ, смываемые водой и органическими растворителями «ВО», рекомендуются для обработки металлов, сплавов и неметаллических материалов. Они обладают хорошей смачивающей способностью, хорошо разбавляются и смываются дистиллированной водой, а также органическими растворителями.

Известно, что присутствие дополнительного абразивного материала в смеси улучшает качество обработанной поверхности. Дополнительно вводимый абразивный материал имеет зернистость меньше или равную зернистости основного абразивного порошка. Так, некоторые алмазные пасты содержат карбид кремния меньшей зернистости. Однако исследования показали, что в этом случае абразивная способность паст практически не изменяется. Для ее увеличения в качестве дополнительного абразива следует использовать порошок, зернистость которого больше зернистости основного порошка; прочность его должна быть меньше, а твердость зерен достаточно высокой.

Таким сочетанием свойств обладают порошки сВN и карбида бора. При использовании паст из смеси этих порошков съём материала вначале производят более крупные зерна карбида бора, облегчающие дальнейшую доводку. Когда разрушающиеся зерна уменьшаются до величины зерен сВN, съём осуществляется главным образом сВN, зерна которого изнашиваются значительно медленнее зерен карбида бора. Благодаря меньшим размерам последние обеспечивают требуемую шероховатость обрабатываемой поверхности.

Для снятия заусенцев, округления острых кромок в местах, недоступных для обычных методов обработки и снижения шероховатости поверхности каналов внутренних полостей деталей из труднообрабатываемых материалов, применяют эластичные шлифовальные пасты для экструзионной обработки под давлением.

Основой шлифовальной пасты служат различного рода каучуки, насыщенные абразивом. В качестве абразива используются порош-

ки карбида кремния, карбида бора, кубонита и алмаза. В пасту добавляют различного рода загустители (например, шефлон) или разбавители (олеиновая кислота, полисилоксановые жидкости).

Созданы алмазные пасты, обладающие одновременно повышенными коллоидной, механической и термической стабильностью. Пасты с повышенной термостойкостью оцениваются максимальной температурой, при которой они удерживаются в зоне обработки. Их целесообразно применять в случаях, когда процесс сопровождается выделением большого количества тепла. Разработан ряд высокоэффективных составов паст и суспензий на основе ПАВ, структурообразователей, термостойких соединений, обладающих смачивающими диспергирующими, адгезионными, антистатическими и другими свойствами, обеспечивающими высокую работоспособность последних.

Характеристика и назначение паст, изготавливаемых из различных компонентов, приведены в табл. 11.13.

### 11.13. Характеристика и назначение паст (суспензий) различных составов

Смываемость	Компоненты паст	Назначение
Органическими растворителями	Порошок алмаза, карбид бора, олеиновая кислота, стеарин, кремнийорганическая жидкость	Обработка поверхности металлов в условиях высоких температур
	Порошок алмаза, углеводороды метанового ряда, консистентная смазка	Обработка поверхностей точных металлических деталей при обычных и повышенных температурах
	Порошок алмаза, олеиновая кислота, стеарин, воск	Обработка труднообрабатываемых материалов
Водой	Порошок алмаза, моноалкилоамид, диалкилоамид	Обработка хрупких неметаллических материалов, например, кремния, германия, кварца
	Порошок алмаза, моноалкилоамид, алюмосиликат натрия, диалкилоамид	Обработка хрупких неметаллических материалов

Окончание табл. 11.13

Смываемость	Компоненты паст	Назначение
Водой (суспензия)	Порошок алмаза, сульфатол НП-3, спирт этиловый	Обработка хрупких неметаллических материалов
Водой с органическими растворителями	Порошок алмаза, стеарин, воск, блок-сополимер оксидов этилена и пропилена	Обработка металлов и хрупких неметаллических материалов
	Порошок алмаза, горчичное масло, воск, оксиэтилированный продукт (синтанол)	Обработка металлов, сплавов и неметаллических материалов
	Порошок алмаза, циклимид, стеарин, синтанол	Обработка неметаллических материалов, а также металлов в случаях, когда для промывки обработанных деталей недопустимо применение огнеопасных растворителей
	Порошок алмаза, вазелин, глицерина, синтанол	Финишные операции механической обработки деталей машин и приборов

#### 11.9.4. Технология и оборудование для производства паст и суспензий

Процесс изготовления паст (суспензий) из СТМ включает следующие стадии (рис. 11.31): приготовление компонентов основы пасты (подогрев, фильтрацию и взвешивание); подготовка порошков из СТМ (взвешивание и растирание мелкозернистых порошков в этиловом спирте до однородной суспензии); смешивание в емкостях соответствующих компонентов и порошков при нагреве до получения гомогенной массы и последующее охлаждение готовой пасты; контроль качества пасты (определение консистенции), абразивной способности и шероховатости поверхности образцов, обработанных пастой (суспензией); расфасовка паст (суспензий) в подготовленные емкости и тару; маркировка и упаковка готовой продукции.



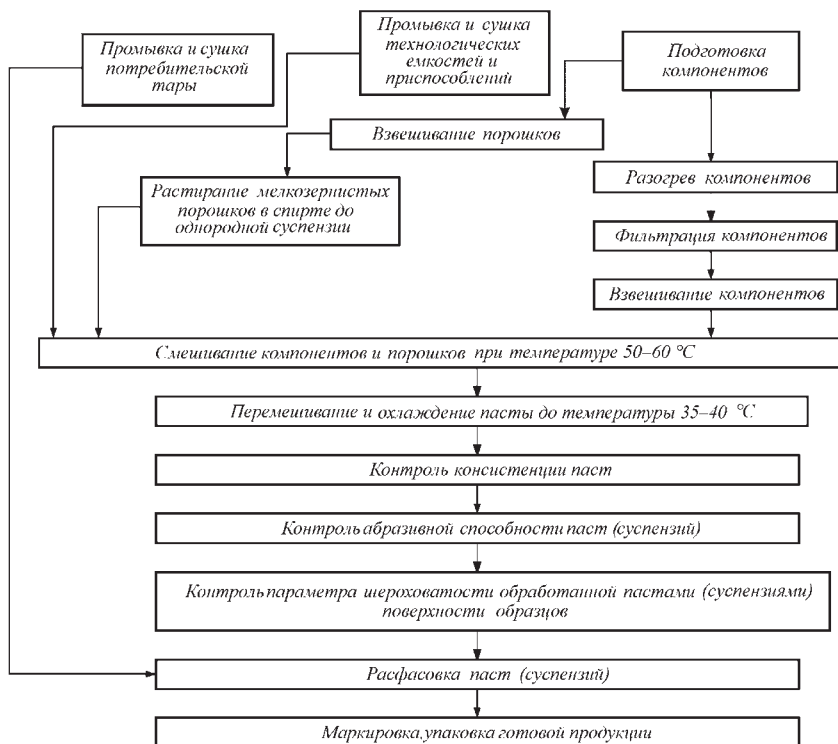
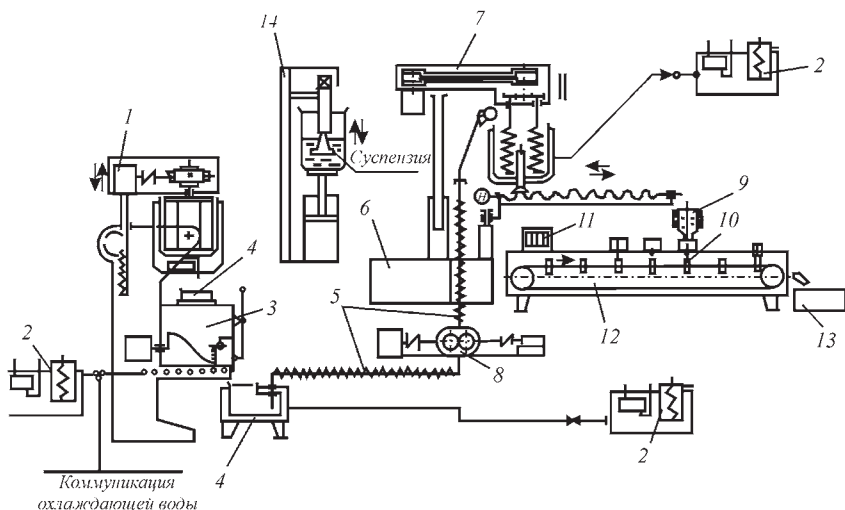


Рис. 11.31. Технологический процесс изготовления паст (суспензий)

В соответствии с ГОСТ 25593–83 одновременно может изготавливаться паста любой массы. Партией считается любое количество пасты идентичного состава, полученное за один технологический цикл из порошка алмаза одной марки и зернистости, одновременно поступающего на прием по одному документу.

Разработан механизированный процесс изготовления алмазных паст, предусматривающий использование специального оборудования (рис. 11.32).

Установка 1 включает в себя аппарат с обогревом для приготовления основы соответствующей пасты. В него загружают расчетные количества твердых компонентов и химических веществ, входящих в основы выпускаемых паст. При этом устанавливают



**Рис. 11.32. Схема механизированного процесса изготовления паст:**

1 — редуктор; 2 — терморегулятор; 3 — аппарат со шнековой мешалкой; 4 — фильтрующее устройство; 5 — линия; 6, 7 — емкость-накопитель; 8 — насос-дозатор; 9, 10 — приспособление для дозирования; 11 — тубы; 12 — дозировочная установка; 13 — тара; 14 — ультразвуковой диспергатор

температуру  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  на терморегуляторе 2 и нагревают смесь в течение  $20\pm 5$  мин до полного расплавления всех компонентов ( $80\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), после чего перекачивают в специальные емкости. Жидкие компоненты (химические вещества), входящие в основу пасты, в соответствующих количествах отбирают также в отдельные емкости, где подогревают на водяной бане до температуры  $50\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Пасту изготавливают в специальном аппарате 3 снабженном шнековой мешалкой, куда через фильтрующее устройство 4 загружают при перемешивании все необходимые компоненты и алмазный порошок, поддерживая температуру  $40\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Перемешивание продолжают до получения однородной гомогенной массы. По такой методике изготавливают алмазные пасты с порошками зернистости 14/10...60/40.

При изготовлении алмазных паст зернистостью 5/3...10/7 расчетное количество каждого из порошков вместе с жидкими компонентами, красителями и расплавленными твердыми компонентами

протирают специальным пестом через сито в аппарат, в котором готовят пасту.

При изготовлении алмазных паст зернистостью 1/0...3/2 порошок вместе с расчетным количеством разогретых жидких компонентов загружают в ультразвуковой диспергатор 14, где проводят диспергирование до получения однородной суспензии. Полученную суспензию передают в аппарат приготовления пасты 3, куда загружают остальные необходимые компоненты и продолжают перемешивание до получения однородной гомогенной массы (готовой пасты). После этого через промежуточную емкость насосом-дозатором 8 пасту перекачивают по транспортирующей линии 5 в емкость-накопитель 7, где дополнительно перемешивают в течение 2...3 мин. Загрузку емкости-накопителя контролируют по специальному поплавковому уровнемеру. Температуру пасты поддерживают с помощью верхнего терморегулятора 2 в пределах  $40 \pm 5$  °С. При соответствии всех параметров требованиям стандарта пасту передают на механическое дозирование в тщательно очищенные установки 9, 10, предварительно проверив работу на холостом ходу. Затем в гнезда установки помещают тубы 11, в которые автоматически производится дозировка пасты (по 40 г). После дозировки тубы с пастой поступают на герметизацию-зажим. На зажимной части указывают зернистость алмазного порошка в данной пасте, затем укладывают в тару 13 и передают на маркировку. На этикетки наносят следующие данные: товарный знак предприятия-изготовителя, наименование и условное обозначение пасты, массу в граммах, номер партии, дату изготовления, штамп технического контроля предприятия-изготовителя, условия хранения.

Ультразвуковой диспергатор, предназначенный для механизации процесса изготовления паст и суспензий, состоит из рабочего сосуда, где происходит ультразвуковая обработка суспензии, магнитострикционного преобразователя и ультразвукового генератора.

Изготавливается суспензия по следующей технологии: компоненты, входящие в основу суспензии, загружают при комнатной температуре в рабочий сосуд диспергатора, добавляют расчетное количество соответствующего алмазного порошка, после чего сосуд со смесью устанавливают в зону действия ультразвукового диспергатора. Ультразвуковую обработку производят с интенсивностью колебаний 18...20 кГц в течение 10...20 мин. Для обеспечения

постоянной акустической мощности имеется зазор 0,5 мм между ультразвуковым излучателем и дном рабочего сосуда. Зазор в процессе обработки автоматически увеличивается до 10 мм. Частота вращения рабочего сосуда — 3 мин<sup>-1</sup>, температура обработки — 60 °С, давление воды в системе охлаждения магнитостриктора, к которой подключена установка — 220 кПа.

На скорость ультразвукового диспергирования и качество алмазных суспензий при их изготовлении указанным методом существенно влияет химическая природа исходных компонентов. В состав алмазных суспензий входят химические вещества, соединения, которые не взаимодействуют с частицами алмаза. Процесс ультразвукового диспергирования основан главным образом на механическом воздействии кавитационных пузырьков, при котором происходит интенсивное смешивание всех составляющих. При этом зерна алмаза равномерно распределяются по всему объему суспензии, обеспечивая ее однородность и высокое качество.

С целью улучшения эксплуатационных характеристик, повышения производительности и качества обработки разработаны новые высокоэффективные составы суспензий из СТМ в аэрозольной упаковке. Основой являются специально подобранные ПАВ, совмещающиеся с используемым при аэрозольной упаковке пропеллентом, который создает давление в баллоне для суспензии. С целью улучшения экологической среды в настоящее время в качестве пропеллентов вместо фреонов используют пропан-бутановые смеси, которые совмещаются со многими органическими ПАВ. В аэрозольном баллоне, куда загружаются в расчетных количествах алмазная суспензия и пропан-бутановая смесь, возникают следующие фазы: газовая, которая занимает свободное пространство в баллоне; жидкая — смесь жидкого пропеллента с основой алмазной суспензии; твердая — частицы алмазного порошка в суспензии. Под давлением газовой фазы смесь жидкого пропеллента вместе с алмазной суспензией поднимается по сифонной трубке и через клапанное устройство попадает наружу, где пропеллент, бурно испаряясь, диспергирует жидкую фазу суспензии на мельчайшие частицы, увлекая вместе с ней частицы алмазного порошка. Расход суспензии легко регулируется в зависимости от внутреннего давления в аэрозольной упаковке и степени распыления. Аэрозольный способ экономически выгоден, так как в 2–3 раза уменьшается

удельный расход алмазного порошка, повышается эффект его действия и сокращается трудоемкость обработки. Алмазные суспензии в аэрозольной упаковке испытаны и применяются на ряде предприятий различных отраслей промышленности.

### 11.9.5. Области применения паст и суспензий из СТМ

К основным факторам, влияющим на эффективность использования алмазных паст и суспензий для обработки различных поверхностей, относятся физико-механические свойства обрабатываемого материала, составы и свойства алмазных паст, суспензий, СОТС, материал и форма притиров, режимы обработки. Органическая основа (несущая рабочая среда) пасты или суспензии может быть моно- или поликомпонентной, представляющей собой вязкопластичную среду или ньютоновскую жидкость.

Обработка различных поверхностей пастами и суспензиями из синтетического алмаза — сложный физико- и химико-механический процесс. Особенность взаимодействия системы обрабатываемая деталь — паста (суспензия) — притир заключается в том, что обрабатываемая поверхность и поверхность притира контактируют через сложную многокомпонентную систему — пасту (суспензию), которая состоит из твердых хрупких частиц алмаза и вязкой пластичной основы. При обработке зона контакта обогащается также мелкими частицами продуктов обработки, влияющими на качество поверхности.

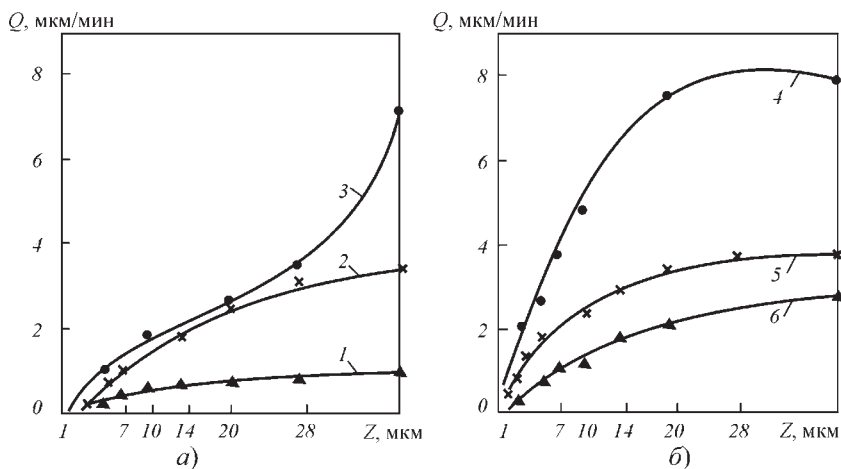
При взаимодействии обрабатываемой поверхности, поверхности полировальника и рабочей среды изменяются не только свойства и состояние трущихся поверхностных слоев, но и структурно-механические и физико-химические свойства рабочей среды. Макро- и микронеровности контактирующих поверхностей образуют зазор, размер которого соответствует толщине прослойки рабочей среды. Следовательно, величина зазора может изменяться от нуля (при непосредственном контакте двух поверхностей) до максимального значения толщины рабочей среды. Поскольку в состав рабочей среды входят алмазный порошок и несущая основа, зазор равен максимальному размеру зерен (если размер зерна превышает толщину пленки несущей основы) или толщине пленки (если зерна алмаза меньше толщины пленки несущей основы). Следует отме-

тить, что толщина пленки несущей основы зависит от физико-химических и структурно-механических свойств компонентов паст и разбавителя.

В зависимости от состава и свойств алмазной пасты (суспензии) алмазные частицы со слоем пасты, пребывая между обрабатываемой поверхностью и жестким притиром, вдавливаются в поверхность более мягкого материала, проникают в макро- и микронеровности притира, а также находятся во взвешенном состоянии в вязкопластичной основе пасты. При взаимном перемещении притира и обрабатываемой поверхности снимается поверхностный слой материала, испытывающего одновременно механическое (от прилагаемого усилия на притир) и дополнительное химическое (от действия химически активных компонентов основы пасты) воздействия, в результате чего и осуществляется доводка или полировка. Одновременно с поверхности обрабатываемого материала последовательно снимаются тончайшие оксидные пленки, образующиеся при взаимодействии различных химических веществ, составляющих композиционную систему, основу пасты (эффект Ребиндера).

В процессе обработки используемые химические вещества основы пасты и СОТС способствуют равномерному распределению алмазных зерен в зоне обработки, выходу из зоны осколков отработанных зерен и стружки, а также регулируют температурный режим процесса.

Существенное влияние на процесс обработки оказывает зернистость порошков СТМ и их массовая доля в пасте, суспензии. С увеличением зернистости съём обрабатываемого материала увеличивается, но шероховатость поверхности, как правило, возрастает и, наоборот, чем меньше зернистость, тем выше качество обрабатываемой поверхности. Результаты исследования влияния зернистости пасты на производительность доводки (материал притира — чугун СЧ 18-36,  $HV = 1770$  МПа), представленные на рис. 11.33, показывают, что производительность обработки всех исследуемых материалов зависит (при прочих одинаковых условиях) как от зернистости пасты, так и от твердости, физико-механических и структурных свойств обрабатываемых материалов. Изменение производительности доводки алюминиевого сплава имеет своеобразный характер, что, по-видимому, связано с резким отличием его физико-механических свойств от других исследуемых материалов.



**Рис. 11.33.** Зависимость производительности доводки  $Q$  от зернистости основной фракции порошка  $Z$  в суспензии (концентрация — 5 %, разбавитель — керосин):

$a$  — титан ВТЗ-1,  $HV = 3700$  МПа (1), серебро (2), алюминиевый сплав САС-1,  $HV = 1000$  МПа (3);  $b$  — латунь ЛС 59-1,  $HV = 1500$  МПа (4); сталь 18Н9Т,  $HV = 1700$  МПа (5), сталь У8,  $HV = 5800$  МПа (6)

Чтобы сократить время на доводку (притирку), алмазные пасты применяют только после тщательной предварительной обработки и очистки изделия. Твердые и хрупкие материалы предварительно обрабатывают под доводку шлифовальными алмазными кругами соответствующей зернистости. В тех случаях, когда форма обрабатываемой поверхности не позволяет применить плоское, круглое наружное, внутреннее и фасонное шлифование, пользуются алмазными притирами. Во всех остальных случаях используют тот метод обработки, который обеспечивает получение наилучшей поверхности под доводку.

Шероховатость обрабатываемой поверхности зависит в основном от зернистости пасты, обрабатываемого материала и его твердости, материала притира. Поэтому зернистость алмазной пасты и ее расход подбирают ориентировочно в зависимости от требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности (табл. 11.14, 11.15).

В качестве материала для притира используют чугун, сталь, латунь, медь, фибру, древесину, кожу, войлок, фетр и другие. Выбор

притира зависит от обрабатываемого материала, его твердости и требуемой шероховатости поверхности. Для осуществления доводки необходимо, чтобы поверхность притира была шаржирована абразивными зёрнами.

#### 11.14. Нормы расхода алмазных паст

Тип обработки	Зернистость алмаза, мкм	Шероховатость		Норма расхода алмаза, карат/см <sup>2</sup>
		До обработки	После обработки	
Черновая доводка	50/40...125/100	1,25	1,25	0,050...0,010
Получистовая доводка	14/10...60/40 10/7...40/28	0,200	0,200	0,030...0,007
Чистовая доводка	3/2...14/10 2/1...10/7	0,063	0,063	0,020...0,005
Полирование	0,1/0...2/1 0,1/0...1/0	0,020	0,020	0,010...0,003

#### 11.15. Рекомендуемые зернистости паст для получения требуемой шероховатости поверхности

Паста по ГОСТ 25593–83	Область применения	Припуск на обработку, мм	Параметр шероховатости, мкм
Из шлифпорошков алмаза зернистостью 50/40...125/100	Черновая доводка твердосплавных матриц и фильер, притирка поверхностей	0,0600...0,12000	<i>Ra</i> 0,32...2,50
Из микропорошков алмаза зернистостью 1/0...60/40	Доводка и полирование твердых сплавов, неметаллических, черных и цветных металлов	0,0005...0,0600	<i>Rz</i> 0,025...1,00
Из субмикроропорошков алмаза зернистостью 0,1/0...1/0,5	Окончательное полирование неметаллических материалов и цветных металлов	0,0001...0,0050	<i>Rz</i> 0,025...0,063



При выборе материала для изготовления притира руководствуются следующими правилами. Чем глубже риски на поверхности от предыдущей обработки, тем больший припуск снимают при доводке и тем крупнее должна быть зернистость применяемой алмазной пасты, тверже притир. Если имеются алмазные пасты мелких зернистостей и необходимо получить высокое качество обрабатываемой поверхности, применяют наиболее мягкие притиры. Используя притиры различной твердости, можно получить разные результаты при одной и той же зернистости.

Результаты обработки различных материалов алмазными пастами и суспензиями весьма существенно зависят от вида применяемых притиров. Так, например, производительность доводки при использовании стальных притиров выше, чем при доводке чугунными притирами; высококачественные поверхности из поликора получают при полировке только притирами из мелкозернистого чугуна; изделия из цветных металлов и их сплавов для обеспечения высокого качества поверхности полируют притирами (табл. 11.16).

### 11.16. Пасты и суспензии, применяемые для обработки различных материалов

Наименование	Зернистость СТМ, мкм	Обрабатываемые изделия, детали	Материал притира или полировальника	Параметр шероховатости, мкм
Пасты типа «О», мазеобразные, на органической основе, смываемые органическими растворителями:  О <sub>1</sub>	14/10...5/3	Детали из твердого сплава ВК6, нержавеющей и закаленной стали	Чугун СЧ18-36	Ra 0,04...0,08

Продолжение табл. 11.16

Наименование	Зернистость СТМ, мкм	Обрабатываемые изделия, детали	Материал притира или полировальника	Параметр шероховатости, мкм
O <sub>2</sub>	10/7... 5/3	Изделия из алюминиевых сплавов, бронзы БрОЦС5-5-5, вольфрама	Чугун СЧ18-36, бронза БрОЦС5-5-5, твердый сплав ВК6	Ra 0,04...0,06
	7/5...3/2	Детали из стали, медно-никелевых сплавов, латуни	Чугун СЧ18-36, алюминий АД1, медь М1, латунь ЛС59-1	Ra 0,03...0,05
	10/7... 5/3	Изделия из алюминиевых сплавов, бронзы БрОЦС5-5-5, вольфрама	Чугун СЧ18-36, бронза БрОЦС5-5-5, твердый сплав ВК6	Ra 0,04...0,06
	10/7...3/2	Детали из стали 36НХТЮ	Медь М1, чугун СЧ18-36	Ra 0,03...0,05
	1/0...0,5/0,1	Изделия из сплавов цветных металлов	Пекоканифольная смола	Ra 0,032...0,05
	14/10...3/2	Детали из твердого сплава ВК6, чугуна СЧ18-36, стали закаленной, ниобиевых сплавов	Чугун СЧ18-36, алюминий АД1, медь М1	Ra 0,032...0,063
	Пасты типа «ВО» универсальная, мажеобразные, смываемые органическими растворителями или водой:	10/7...3/2	Изделия из молибдена, сапфира	Твердый сплав ВК6, медь М1 или бронза БрОФ10-1

Продолжение табл. 11.16

Наименование	Зернистость СТМ, мкм	Обрабатываемые изделия, детали	Материал притира или полировальника	Параметр шероховатости, мкм
ВО <sub>1</sub>	7/5...1/0	Изделия из топаза, фианита	Замша техническая, войлок, пекоканифольная смола	Rz 0,04...0,08
ВО <sub>2</sub>	3/2...0,7/0,3	Изделия из золота, серебра, платины	Войлок технический, замша техническая, батист, шелк	—
ВО <sub>5</sub>	5/3...1/0	Изделия из нержавеющей стали, сплавов цветных металлов	Чугун СЧ18-36, алюминий АД1, медь М1	Rz 0,05...0,10
Пасты типа «ВО» универсальные, твердые	3/2, 2/1	Изделия из яшмы, янтара, изумруда	Изделия из яшмы, янтара, изумруда	Rz 0,04...0,08
	ВО <sub>3</sub>	5/3...2/1	Поликорковые поверхности, изделия из рубина, агата, аметиста, корунда и других камней-самоцветов	Rz 0,04...0,08
Пасты типа «В», мазеобразные, смываемые водой:				
	В <sub>1</sub>	3/2...1/0	Изделия из полупроводниковых материалов	Rz 0,032...0,063

Окончание табл. 11.16

Наименование	Зернистость СТМ, мкм	Обрабатываемые изделия, детали	Материал притира или полировальника	Параметр шероховатости, мкм
V <sub>1</sub>	5/3...1/0	Детали из азотированных сталей, сплавов цветных металлов	Замша техническая, пекоканифольная смола	Rz 0,03...0,06
Суспензии типа «В», смываемые водой и блескообразующие:	3/2...0,3/0	Детали из сплавов алюминия	Текстолит Б, алюминий АД1, пекоканифольная смола	Rz 0,032...0,063
	3/2...0,7/0,3	Изделия из полупроводниковых материалов	Замша техническая, пекоканифольная смола	Rz 0,025...0,040
	2/1...0,7/0,3	Детали из меди и ее сплавов, из сплавов других цветных металлов	Замша техническая, латунь ЛС59-1, пекоканифольная смола	

Важным фактором является также режим обработки пастами и суспензиями из СТМ. При этом в каждом конкретном случае необходимо определять давление притира на частицы алмаза, скорость его относительного перемещения, продолжительность обработки. При оптимальном давлении притира на алмазные зерна происходит их скалывание, т.е. самозатачивание, что способствует лучшему сглаживанию микронеровностей при обработке соответствующей поверхности. При дальнейшем повышении давления на притир

зерна алмаза могут более интенсивно разрушаться и терять свою работоспособность.

Скорость перемещения притира, полировальника по отношению к обрабатываемой поверхности и продолжительность обработки устанавливаются, как правило, опытным путем с учетом физико-механических характеристик обрабатываемого материала, требуемого качества деталей и производительности процесса обработки.

При использовании алмазных паст необходимо создать условия, исключающие возможность их загрязнения или попадания в данную пасту более крупных зерен. Любое более крупное зерно может оставить на обрабатываемой поверхности глубокие риски, что ведет к дополнительной затрате труда на повторную обработку деталей, а в некоторых случаях может привести к браку.

Притир применяют только для одной зернистости. Для этого его маркируют или окрашивают в цвет, присвоенный пасте данной зернистости.

Доводка проводится последовательно двумя-тремя алмазными пастами с постепенным переходом от более крупной к более мелкой. Количество последовательно применяемых паст зависит от припуска и требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности. При небольших припусках и малых рисках доводка осуществляется пастой одной зернистости.

Таким образом, для обеспечения высокого качества обрабатываемой поверхности и снижения удельного расхода алмазных паст и суспензий необходимо учитывать основные рекомендации: тщательная подготовка обрабатываемой поверхности (очистка, при необходимости промывка); выбор состава и зернистости паст (суспензий) исходя из требуемого качества обрабатываемой поверхности; правильный подбор притира, полировальника (для достижения высокого качества обрабатываемой поверхности необходимо применять мелкозернистые пасты, суспензии и более мягкие притиры); нанесение пасты на притир или обрабатываемую поверхность проводить в оптимальных количествах, так как скопление большой массы зерен алмаза затрудняет работу; подбор разбавителей и смывных жидкостей; применение соответствующего притира для каждой зернистости.

Пасты и суспензии из СТМ широко применяются для обработки микрошлифов, волок, часовых и точных технических камней,

пресс-форм, штампов, для окончательной доводки калибров, плоскопараллельных концевых мер, притирки особо точных деталей гидравлической, пневматической и топливной аппаратуры, в производстве приборов точной механики, для шлифовки и полировки драгоценных и полудрагоценных камней и т.д. При использовании алмазных паст взамен обычных абразивных материалов (электрокорунда, карбида кремния и др.) при той же зернистости производительность обработки увеличивается в 2–3 раза и более. Весьма успешно пасты из СТМ применяют на операциях доводки сложных деталей и некоторых видов инструмента из сталей и твердых сплавов, обработки поверхностей прецизионных пар, для доводки и притирки высокоточных деталей гидро- и пневмоаппаратуры, изготавливаемых из азотированных, цементированных и закаленных сталей марок 12ХНЗА, 15ХНВА, ШХ15.

Кремниевые пластины обрабатывают алмазными пастами с использованием вибродоводочных станков типа М-14. Вибродоводка проводится алмазными пастами зернистостью 1/0...3/2 на органической основе. Притиры изготавливают из электростатической замши. При таком способе обработки исследовались зависимости производительности и параметра шероховатости поверхности от продолжительности вибродоводки. При этом получают поверхность высокого качества с точными геометрическими параметрами.

Пастами из синтетического алмаза можно обрабатывать изделия из золота и серебра. Для них характерны высокая вязкость и малая твердость, что затрудняет обработку. Специальные исследования позволили разработать рекомендации по полировке серебряных контактов и поверхностей из золота. Для первоначальной обработки серебряных контактов в зависимости от состояния исходной поверхности можно использовать алмазные пасты зернистостью 20/14 и 28/20, для промежуточной обработки — зернистостью 5/3 и 7/5, для окончательной — зернистостью 3/2 и менее. В качестве притиров применяют вначале чугуны, затем войлок, замшу и притиры-полировальники, на которые натянуты бязь, батист или натуральный шелк.

Поверхности отражательных золотых зеркал полируют алмазными суспензиями с использованием мелкозернистых порошков из синтетического алмаза. Отражательное зеркало представляет собой пластину из закаленной стали ШХ15, на которую диффузион-

ным методом нанесен тонкий слой золота. Полируют золотой слой в несколько приемов: сначала в течение 5 мин полируют алмазной суспензией зернистостью 2/1, нанесенной на полировальник из тонкого сукна; затем в течение 3...5 мин — алмазной суспензией зернистостью 0,5/0,1 на офсетной ткани, жестко натянутой на чугунную плиту; окончательное полирование проводят без алмаза на сатине, натянутом на ту же плиту. Такой способ полирования позволяет получать поверхности высокого качества с высоким коэффициентом зеркального отражения.

Экструзионным хонингованием обрабатывают:

- инструменты: пресс-матрицы и пресс-формы-фильеры (волочильный инструмент), пресс-штампы;
- детали двигателей: лопатки турбин и компрессоров, рабочие колеса и крыльчатки;
- детали гидроаппаратуры;
- корпусные детали: гильзы и золотники, плунжерные пары и цилиндры, форсунки и сопла;
- детали станков и приборов;
- детали, полученные методом порошковой металлургии.

При проведении предварительных испытаний в качестве связующего для абразивных паст применялся синтетический диметилсилоксановый каучук и бутилкаучук.

На ряде предприятий алмазные пасты успешно заменили пасты из карбидов бора и кремния, электрокорунда, оксида хрома и др. Применение их при изготовлении запорной арматуры из различных материалов обеспечивает необходимое качество уплотнительных поверхностей. Перед притиркой уплотнительные поверхности обрабатываются до требуемой чистоты. Сопрягаемые поверхности притираются либо непосредственно друг с другом, либо каждую отдельно. Притиром в большинстве случаев служит ферритно-перлитный или перлитный чугун, а также специальные чугуны. В ряде случаев применяют медь, латунь и др. После притирки детали промывают в специально подобранной жидкости или керосине, проверяют на плотность прилегания уплотнительных поверхностей.

Применение алмазных паст для притирки арматуры в 1,6–2,4 раза повышает производительность труда, значительно увеличивает срок службы изделий, улучшает качество уплотнительных поверхностей, культуру производства. Весьма эффективно их используют при изго-

---

товлении формообразующих и рабочих элементов штампов пресс-форм, форм литья под давлением. Применение паст для изготовления технологической оснастки позволяет повысить качество обрабатываемых деталей и значительно увеличить производительность доводочных операций. Одним из важнейших достоинств алмазной обработки является обеспечение высокоэффективной обработки деталей из твердых неметаллических материалов, сплавов, закаленных сталей, а также доводка сопрягаемых поверхностей деталей.



## Глава 12

# ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ И ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### 12.1. СКАЛЬПЕЛИ С РЕЖУЩИМ ЛЕЗВИЕМ ИЗ АЛМАЗА И КЕРАМИКИ

#### 12.1.1. Алмазные скальпели

Сам по себе скальпель — это инструмент для разрезания биологических тканей, качество которого напрямую связано с остротой лезвия. В последнее время в хирургии, особенно в микрохирургии, находят применение скальпели, режущая часть которых выполнена из неметаллических материалов, в том числе из кристаллов натуральных и синтетических алмазов. Эти скальпели обладают очень высокими режущими свойствами, химической стойкостью и поддаются большинству видов стерилизации. Микрохирургические скальпели с алмазным лезвием нужны в первую очередь офтальмологам и врачам-косметологам. Швы, которые остаются после их использования, тонкие и быстро заживают.

Ширина скальпелей 0,8...3,6 мм, толщина лезвия 0,15...0,23 мм, радиус округления режущей кромки 250...600 Å.

Алмаз очень прочный, он не затупляется при операциях, легко дезинфицируется. Однако он довольно хрупкий и требует крайне аккуратного обращения. При правильном обращении одним скальпелем можно провести до 1000 операций. Скальпели, на которых при эксплуатации появились сколы, в большинстве случаев можно реставрировать.

При производстве инструментов кристаллы алмаза размечают и раскалывают при помощи лазера, затем заготовки сортируют и гранят до получения нужной формы. После огранки скальпели подвергаются термохимической заточке на дисках из малоуглеродистой стали в атмосфере аргона. В готовом виде режущая часть скальпеля весит 0,01...0,06 карата.

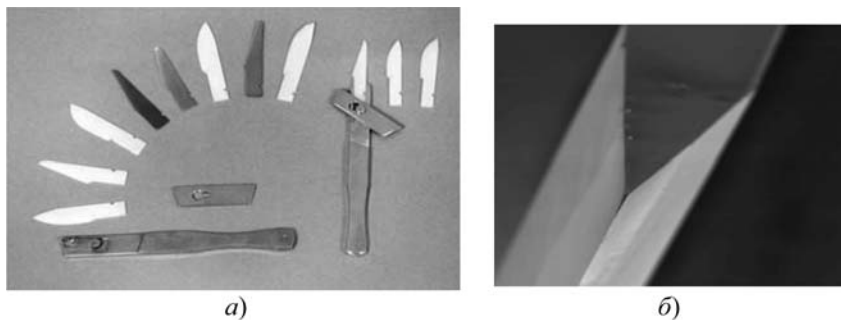
### 12.1.2. Алмазная заточка керамических скальпелей

Особое место среди неметаллических материалов, используемых в медицине, занимает монокристаллический или частично стабилизированный диоксид циркония, спеченный из наноразмерных порошков. Его основными преимуществами по сравнению с алмазом являются высокая трещиностойкость ( $19 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-1/2}$ ), прочность, низкая теплопроводность, химическая и биологическая инертность, рентгеноконтрастность, сравнительно низкая стоимость.

Отмеченный комплекс характеристик позволяет изготавливать из диоксида циркония скальпели для операции на коже, сухожилиях, мягких тканях, на внутренних органах и микрохирургических операций (рис. 12.1 [24]).

При изготовлении керамических скальпелей наиболее ответственной операцией является заточка лезвия, которая выполняется с использованием как универсального, так и специального алмазного инструмента:

- для формирования из заготовок блоков необходимой толщины используются алмазные круги формы 1A1;
- для получения необходимых размеров и качества поверхности скальпелей обработка проводится в несколько этапов с использованием алмазного инструмента формы 1A1, алмазных порошков или алмазных паст, характеристики которых устанавливаются на опытных партиях изделий;



**Рис. 12.1.** Скальпели из диоксида циркония:

- а* — общий вид инструмента с механическим креплением режущей части;  
*б* — режущая кромка

— при окончательной заточке лезвий обработка проводится на специальных планшайбах из чугуна и меди, шаржированных алмазным порошком.

Масса керамического лезвия не превышает 2,2 г.

## 12.2. СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЙ АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Одним из наиболее распространенных стоматологических инструментов являются боры.

Алмазные боры для турбинных наконечников и микромоторов представляют собой однослойные инструменты, изготовленные методом гальванопластики. Алмазные зерна прочно закрепляют на державке из нержавеющей стали, заравнивая промежутки между зернами металлом, осаждаемым из электролита. В процессе резания в части алмазного зерна, которая выступает над удерживающим слоем и осуществляет съем материала, происходят микроскопические акты разрушения, обеспечивающие инструменту формирование новых режущих кромок.

Для обеспечения работоспособности инструмента, алмазное зерно должно быть утоплено в связку на глубину до 40 % от диаметра. Это обеспечивает участие в процессе шлифования достаточно большого количества зерен и обеспечивает их прочное удержание.

Одним из признаков качественного алмазного инструмента является баланс между плотностью алмазосодержащего слоя и необходимого для поддержания эффекта самоочистки расстояния между зернами. Дистанция должна быть достаточна для обеспечения эвакуации отходов шлифования и предотвращения засаливания поверхности инструмента. В этом случае режущие кромки алмаза не блокируются, а инструмент работает эффективно — облегчается температурный режим в зоне препарирования и уменьшается вероятность перегрева обрабатываемого материала или зуба. При плотном расположении алмазных зерен, помимо их равномерного распределения, особенно важно получить максимально гладкую поверхность материала связки. Последний фактор усиливает эффект самоочистки, затрудненный при уменьшении расстояния между зернами, облегчает процессы дезинфекции и стерилизации инструмента. Отмеченное выше достига-

ется использованием специального покрытия, например из нитрида титана.

Разработаны алмазные боры различных форм и зернистости. Диаметр рабочей части алмазных боров составляет 0,9...3,3 мм, а зернистость используемого абразива подразделяется на 6 типов: ХС (черная маркировка) — очень крупная зернистость; С (зеленая маркировка) — крупная; М (синяя) — средняя; F (красная) — мелкая; XF (желтая) — очень мелкая; UF (белая) — ультрамелкая зернистость.

Наиболее распространенные формы рабочих поверхностей боров: круглый, или шаровидный бор; обратный конус; пламевидный бор; игловидный бор; конусовидный бор с плоским и закругленным концом и цилиндр.

Алмазные боры также отличаются размером наносимых частиц или степенью абразивности.

### **12.3. ОБРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЭНДОПРОТЕЗОВ ИЗ САПФИРА, КЕРАМИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

В настоящее время наиболее перспективными для изготовления пар трения эндопротезов суставов являются сапфир, керамика из стабилизированного диоксида циркония и металлические сплавы, в частности кобальтохромовые, полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы (хирулен).

Для изготовления компонентов пары трения тазобедренного эндопротеза, имеющих сферические поверхности трения, разработаны алмазный инструмент и технологии прецизионной алмазной обработки таких поверхностей из сапфира, керамики, обеспечивающие точность и качество обработки на уровне мировых требований. Для этого используют возможности многофункционального 4-координатного станда с числовым программным управлением.

Технология изготовления пар трения отмеченного типа предусматривает изготовление головки эндопротеза из диоксида циркония и вкладыша ацетабулярной чаши из сапфира (рис. 12.2).

Согласно требованиям рабочего чертежа, головки эндопротеза нужно обеспечить точность размера, формы и шероховатость двух



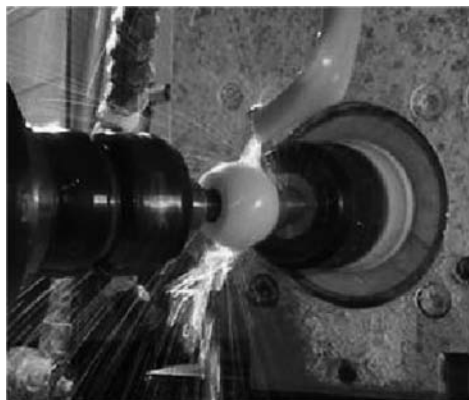
Рис. 12.2. Элементы пары трения «керамическая головка—вкладыш чаши из сапфира»

функциональных поверхностей: прецизионной сферической, которая является охватываемой поверхностью пары трения, а также прецизионной конусной поверхности посадочного отверстия, которое выполняет функцию базы для присоединения головки к ножке эндопротеза.

Маршрут алмазной обработки керамической головки состоит из следующих технологических операций:

- алмазное шлифование конусного отверстия, фаски, торца головки для последующего базирования;
- предварительное алмазное сферошлифование головки с припуском под последующую финишную обработку, который составляет 0,05...0,10 мм на диаметр;
- финишное алмазное сферошлифование головки.

Технологическая схема обработки сферической поверхности головки (рис. 12.3) предусматривает использование кольцевого алмазного инструмента и последовательное чередование его подачи на врезание и возвратно-колебательной подачи вдоль обрабатываемой поверхности. Преимущество такой схемы состоит в точном позиционировании алмазного инструмента относительно обрабатываемой поверхности, которое обеспечивает достижение нужного



**Рис. 12.3.** Алмазное сферошлифование керамической головки

радиуса сферической поверхности с высокой точностью, при которой отклонение от сферичности измеряется долями микрометра.

На операции алмазного сферошлифования обеспечиваются требования по точности диаметра головки, шероховатости полированной поверхности и отклонения от сферичности менее 1 мкм.

Согласно требованиям рабочего чертежа вкладыша ацетабулярной чаши из сапфира, нужно обеспечить точность размера, формы и шероховатости двух функциональных поверхностей: прецизионной сферической (охватывающей), а также прецизионной конусной, которая выполняет функцию базы для присоединения вкладыша к ацетабулярной чаше, а также плоской торцевой. Для механической обработки изделия из сапфира возможно использование только алмазного шлифовального инструмента.

Маршрут алмазной обработки вкладыша ацетабулярной чаши из сапфира состоит из следующих технологических операций:

- алмазное шлифование технологического конусного отверстия для последующего базирования заготовки;
- предварительное алмазное шлифование внешних поверхностей вкладыша с припуском под последующую финишную обработку, который составляет 0,02...0,05 мм, с базированием на технологическом конусном отверстии;
- финишное алмазное шлифование внешних поверхностей, торцевой поверхности вкладыша с обеспечением требований чер-



**Рис. 12.4.** Шлифование внешней конусной поверхности чаши алмазным кругом



**Рис. 12.5.** Кольцевой алмазный инструмент для шлифования сферической поверхности вкладыша из сапфира

тежа и с базированием на том же технологическом конусном отверстии;

— предварительное алмазное шлифование внутренней сферической поверхности вкладыша с припуском под последующую финишную обработку, который составляет  $0,02...0,05$  мм, и с базированием на прецизионной конусной поверхности;



*a)*



*б)*

**Рис. 12.6.** Внутренняя (*a*) и наружная (*б*) сферические поверхности вкладыша ацетабулярной чаши из хирулена

— финишное алмазное шлифование внутренней сферической поверхности вкладыша с обеспечением требований чертежа и с базированием на той же прецизионной конусной поверхности.

На рис. 12.4 показано финишное шлифование чашечным алмазным кругом внешней конусной поверхности чаши.

Технологическая схема обработки внутренней сферической поверхности сапфирового вкладыша предусматривает использование кольцевого алмазно-абразивного инструмента (рис. 12.5), а также последовательное чередование его подачи на врезание и возвратно-колебательной подачи вдоль обрабатываемой поверхности.

Точение алмазным инструментом является эффективной технологией обработки внутренних и наружных сферических поверхностей вкладыша ацетабулярной чаши из хирулена (рис. 12.6).

Ввиду особых упругопластических свойств хирулена на формирование шероховатости обработанной поверхности наибольшее влияние оказывает острота режущей кромки резца. Наиболее эффективными при обработке полиэтиленовых деталей являются резцы, оснащенные природным алмазом с радиусом округления режущей кромки 0,01 мкм, что обеспечивает обеспечение требуемых параметров качества и точности изделия.



## **Глава 13**

### **ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗИНЫ, ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **13.1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АЛМАЗНО- АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Механическая обработка резины, композиционных материалов, включающих стеклянные, углеродные, борные, органические высокопрочные волокна и древесную щепу, является обязательной, наиболее ответственной и самой трудоемкой операцией в технологическом цикле производства изделий из них.

Казалось бы, сравнительно «мягкие» стеклопластики, углепластики, органопластики и другие ПКМ не должны вызывать серьезных затруднений с точки зрения их обрабатываемости. Однако в производственных условиях механическая обработка ПКМ резанием создает значительные трудности. Прежде всего, в зоне резания при контактом взаимодействии технологической системы инструмент—деталь возникает высокая температура, достигающая в ряде случаев предела теплостойкости быстрорежущей стали, не говоря уже о теплостойкости термореактивной полимерной составляющей обрабатываемого материала. Кроме того, технологический процесс обработки сопровождается чрезвычайно интенсивным износом режущего инструмента, превышающим по интенсивности износ инструмента при обработке сталей и цветных сплавов, образованием токсичных газообразных веществ и мелкодисперсной стружки и пыли, ухудшающим санитарно-гигиенические условия труда, а также износом трущихся частей технологического оборудования. При резании ПКМ всегда образуется диспергированный, механодеструктурированный поверхностный слой, возникновение которого исключить практически нельзя, но управлять его возник-

новением и развитием можно. Это негативно сказывается на производительности и качестве механической обработки резанием ПКМ. Поэтому указанные выше особенности механической обработки резанием ПКМ необходимо учитывать не только при проектировании изделий из полимерных композиционных материалов, но и при разработке технологических процессов механической обработки, выборе эффективного режущего инструмента и назначения оптимальных режимов резания.

Одним из перспективных путей интенсификации технологических процессов и повышения эффективности алмазно-абразивной обработки ПКМ, которые включают в себя и нанодисперсные высокопрочные и высокомодульные волокна, является системно-аналитическая оптимизация технологической системы «станок-инструмент-деталь» с помощью направленного создания эффективных параметров контактных рабочих поверхностей инструмента, минимизации механических, механохимических и структурных физических явлений при контактном взаимодействии рабочей поверхности инструмента с обрабатываемым материалом.

Концепция интенсификации алмазно-абразивной обработки нанодисперсных ПКМ базируется на представлениях о регулируемом управлении контактным взаимодействием и тепловыми процессами в зоне обработки, которые минимизируют механические, механохимические, тепловые и структурные превращения в полимерной составляющей обрабатываемого материала. При этом контактные процессы направлены исключительно на поддержание высокой режущей способности алмазно-абразивного инструмента за счет создания контактных поверхностей рабочих элементов в инструменте с эффективными функционально-ориентированными параметрами, а теплофизические параметры процесса обработки ограничены требованием формирования бездефектного поверхностного слоя обрабатываемого изделия.

На рис. 13.1 приведена схема управления контактными взаимодействиями и тепловыми процессами в зоне резания, которая разработана на основе результатов экспериментально-аналитических исследований механического, физико-химического взаимодействия в технологической системе алмазно-абразивной обработки ПКМ.

Одним из перспективных путей повышения эффективности алмазно-абразивной обработки ПКМ является разработка высоко-



Рис. 13.1. Схема управления контактным взаимодействием при алмазно-абразивной обработке ПКМ

производительной технологии на основе алмазных инструментов. Размещение зерен алмаза на поверхности корпуса инструмента в один слой и закрепление их методом гальваностегии обеспечивают инструменту высокие эксплуатационные свойства в технологических процессах механической обработки ПКМ.

Созданы надежные, долговечные и производительные конструкции однослойных алмазно-абразивных инструментов со сплошной и прерывистой рабочей поверхностью.

Применение таких инструментов позволяет интенсифицировать процессы резки (разрезания), шлифования (зачистки), сверления отверстий и зенкования цилиндрических и конических углублений в деталях и изделиях из ПКМ по сравнению с применением других инструментальных материалов. Сплошная рабочая поверхность инструментов обеспечивает более низкую шероховатость обработанной поверхности, но при этом наблюдается высокая тепло-

напряженность процесса в зоне контакта инструмента с деталью. Применение прерывистой рабочей поверхности позволяет снизить нагрев, улучшить условия удаления срезанного слоя обрабатываемого материала, повысить работоспособность инструмента.

Алмазно-абразивные инструменты для резки (разрезания), шлифования (зачистки), сверления и зенкования поверхностей изделий из ПКМ, в частности, углепластиков, органопластиков, стеклопластиков, сотовых наполнителей и конструкций из них, должны эксплуатироваться при температуре окружающей среды не выше 40 °С и относительной влажности воздуха не более 80 %.

В качестве критерия затупления алмазно-абразивных инструментов при разрезании и шлифовании ПКМ принят технологический признак — линейный радиальный износ зерен алмаза в инструменте. Из-за сравнительно малой величины допустимого радиального износа алмазных зерен в инструменте и явно неравномерного в радиальном направлении износа связки перед передней и вдоль боковых поверхностей зерна за срок службы инструмента, а также из-за «закрытости» зоны резания критерием износа алмазно-абразивного инструмента в производственных условиях являются прижоги обработанной поверхности, изменение эффективной мощности резания, изменение скорости подачи, что легко контролируется по времени прохождения детали в зоне обработки.

Из-за низкой теплостойкости обрабатываемых материалов на основе синтетических полимерных матриц, склонности их к деструкции, особенно органических волокнистых наполнителей, рациональные режимы резания следует назначать в следующей последовательности:

- 1) рассчитывается скорость резания

$$v = \pi Dn,$$

где  $D$  — диаметр инструмента, м;  $n$  — число оборотов,  $\text{с}^{-1}$ ;

- 2) выбирается подача, исходя, главным образом, из условия максимальной производительности и выполнения технологических требований к качеству и чистоте обработанной поверхности;

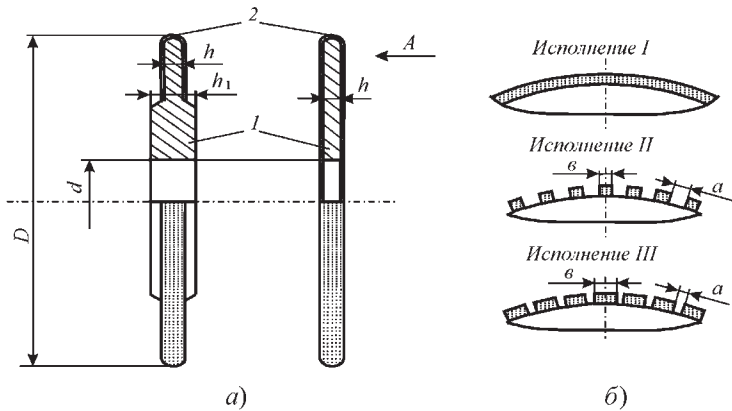
- 3) назначается глубина резания (в большинстве случаев ее следует выбирать такой, чтобы весь припуск был снят за один проход, если это допускается технологическими требованиями или другими условиями обработки).

Широкий круг экспериментальных исследований и практический опыт реализации процессов алмазно-абразивной обработки изделий из полимерных и металлополимерных композиционных материалов и позволил оптимизировать гамму прогрессивных конструкций однослойных алмазно-абразивных инструментов со сплошной и прерывистой рабочей поверхностью, которые по сроку службы, долговечности и надежности значительно превосходят режущие инструменты из обычных абразивов. Переход на новую высокоэффективную технологию алмазно-абразивной резки, шлифования, зачистки, сверления и зенкования отверстий в изделиях из полимерных и металлополимерных материалов алмазно-абразивными инструментами вместо традиционно применяемых серийно выпускаемых режущих инструментов позволяет повысить производительность обработки полимерных композиционных материалов за счет увеличения срока службы инструмента и его размерной стойкости, интенсификации режимов резания, улучшить качество обрабатываемых деталей и санитарно-гигиенические условия труда работающих.

### 13.2. АЛМАЗНЫЕ ОТРЕЗНЫЕ КРУГИ

Алмазный отрезной круг с наружной режущей кромкой (рис. 13.2) состоит из корпуса 1, изготовленного из стали марки 9ХФ или сталей марок 50ХФА, 65Г, с наружным диаметром  $D$ , диаметром посадочного отверстия  $d$  и толщиной  $h$  в виде диска с утолщенной  $h_1$  центральной частью (рис. 13.2, а) и без нее (рис. 13.2, б). Основные конструктивные и геометрические параметры однослойных кругов приведены в табл. 13.1.

На наружной периферийной части круга гальваническим методом закреплен алмазосодержащий слой 2. Для его изготовления применяют шлифпорошки синтетического алмаза АС15-Н, АС32-Н или АС15, АС20, АС32 зернистостью 200/160...500/400. Выбор марки и зернистости шлифпорошков проводится исходя из физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого материала, режимов резания. Принимаются во внимание и требования к качеству поверхности обрабатываемых деталей. Закрепление зерен алмаза на корпусе круга проводится электролитическим осаждением никеля. При этом обеспечивается выступание зерен алмаза  $H = (0,33...0,67)d$ , где  $d$  — средняя величина зерна. В условиях шли-



**Рис. 13.2. Алмазный отрезной круг:**

*a* — с утолщенной центральной частью; *б* — без утолщения; *в* — варианты исполнения алмазных кругов

фования полимерных композиционных материалов под действием силы резания, температуры, ударных нагрузок, вибраций и износа эта величина обычно изменяется до  $H = (0,45...0,55)d$ . Для каждой зернистости порошка алмаза существует оптимальная высота выступания зерен в круге, при которой допустимому его износу соответствует наибольшая производительность процесса обработки.

Наружная рабочая поверхность алмазных отрезных кругов выполняется как сплошной (исполнение *I*), так и прерывистой (исполнение *II* и *III*), представляющей собой чередование выступов шириной *b* и впадин шириной *a* (рис. 13.2, *б*).

Алмазный отрезной круг устанавливается на оправку станка или ручной пневматической машины и крепится на ней при помощи шайбы и гайки. Круги должны эксплуатироваться совместно с прижимными фланцами, диаметр которых должен составлять 0,6...0,8 диаметра круга. Торцевое биение круга, измеренное на расстоянии 10 мм от периферии круга, не должно превышать 0,05...0,10 мм.

Пример записи обозначения алмазного отрезного круга формы 1A1R со сплошной рабочей поверхностью диаметром 125 мм, тол-

### 13.1. Основные конструктивные и геометрические параметры, мм, однослойных алмазных кругов и их рабочей поверхности

D	h	E	Зернистость порошка алмаза				Число выступов n, штук	
			200/160	315/250	400/315	500/400	Четное	Нечетное
90	12	1,0	1,58	1,82	1,99	2,21	—	47
							—	71
							94	—
125	32	1,2	1,78	2,02	2,19	2,41	36	—
							72	—
							—	131
160	32	1,2	1,78	2,02	2,19	2,41	50	—
							84	—
							100	—
							—	131
							62	—
200	32	1,8	2,38	2,62	2,79	3,01	60	—
							120	—
							62	—
							—	209
250	32	1,8	2,38	2,62	2,79	3,01	—	53
							174	—
320	32	2,2	2,72	3,07	3,24	3,47	—	67
							—	223

шиной корпуса 1,2 мм, диаметром посадочного отверстия 32 мм, оснащенного шлифпорошками синтетического алмаза марки АС 15–Н, зернистостью 400/315, закрепленных электролитически осажденным никелем: круг 1А1R 125×1,2×32 АС15–Н 400/315; то же, с прерывистой рабочей поверхностью: круг 1А1RSS/С2 125×1,2×32 АС15–Н 400/315.

Эффективность механической обработки резанием ПКМ алмазно-абразивными инструментами в большей мере зависит от технологического оборудования, надежности и удобства его эксплуатации. Специальные станки для алмазно-абразивной резки ПКМ в настоящее время отсутствуют. Имеющееся технологическое оборудование и ручные пневматические машины отечественного производства с учетом их постоянной модернизации не позволяют в полной мере решать проблемы механической обработки резанием ПКМ. Поэтому при эксплуатации алмазно-абразивных инструментов используются, как правило, модернизированные металло- и деревообрабатывающие станки, которые по кинематике основных и вспомогательных движений наиболее полно соответствуют рассматриваемым технологическим процессам.

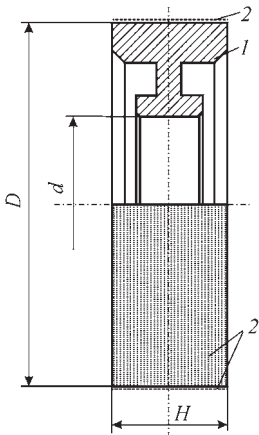
Модернизированные станки и ручные пневматические машины для разрезания ПКМ должны иметь регулируемую частоту вращения шпинделя в диапазоне 3000...6000 мин<sup>-1</sup> и 4000...10 000 мин<sup>-1</sup> соответственно, регулируемую подачу в диапазоне 0,01...0,20 м/с, возможность перемещения стола станка или шпиндельной бабки по высоте ручным и механическим приводом.

Модернизация серийно выпускаемых станков и ручных пневматических машин должна включать в себя изготовление специальных устройств для удаления стружки и пыли. Расход воздуха, удаляющего отходы обработки, должен быть в пределах 2000...3000 м<sup>3</sup>/ч при скорости воздушного потока 20...22 м/с.

### 13.3. АЛМАЗНЫЕ КРУГИ И БАРАБАНЫ

Алмазные круги (рис. 13.3) состоят из стального незакаленного цилиндрического корпуса  $I$  диаметром  $D$  и высотой  $H$ . В алмазносном слое, закрепленном на наружной поверхности кругов, при-





**Рис. 13.3. Однослойный алмазный круг со сплошной рабочей поверхностью:**

1 — корпус; 2 — алмазосодержащий слой

меняют шлифпорошки синтетического алмаза марок АС15, АС20 зернистостью 200/160...400/315.

Алмазный барабан — это алмазный круг в виде полого цилиндра, на наружную поверхность которого нанесен рабочий слой.

Наружная рабочая поверхность кругов (барабанов) может быть выполнена как сплошной (см. рис. 13.3), так и прерывистой (рис. 13.4). Совокупность алмазно-абразивных элементов 2 образуется пересекающимися между собой винтовыми канавками 3 левого  $n_2$  штук и правого  $n_1$  штук направлений. Они выполняются под углами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (обычно  $30...35^\circ$ ) соответственно к оси инструмента.

В случае прерывистой рабочей поверхности ее действительная длина в различных осевых (I, II, III) и нормальных сечениях (IV, V, VI) неодинакова (рис. 13.5, а). Непостоянство величины действительной рабочей

поверхности в осевых сечениях вызывает соответствующее изменение силы резания во время шлифования и приводит к увеличению вибраций и снижению качества обработки, а в нормальных сечениях — к различным условиям резания вдоль линии контакта инструмента с заготовкой. Соответственно, вдоль нее возникают различные температуры нагрева, что снижает качество обработки и ограничивает величину допустимых режимов резания.

В некоторых случаях для уменьшения диапазона изменения действительной длины рабочей поверхности в различных сечениях, формирующие рабочие элементы винтовые канавки левого и правого направлений выполняют с разным шагом (т.е.  $n_1 \neq n_2$ , рис. 13.5, б) либо с разными углами наклона  $\omega_1 \neq \omega_2$  (рис. 13.5, в). При этом, как правило, появляется заметная осевая составляющая силы резания. Целесообразность и возможность применения инструментов такой конструкции и соответствующие геометрические характеристики (табл. 13.2) определяются в каждом конкретном случае с учетом всех параметров и особенностей процесса обработки.

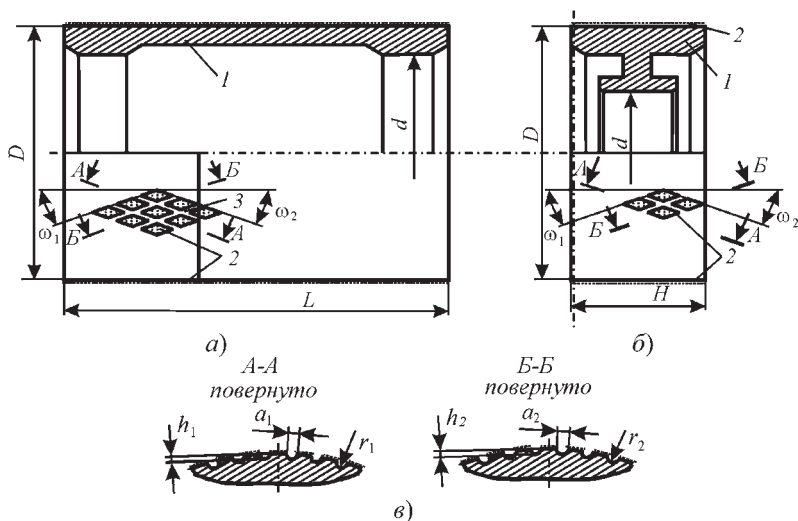


Рис. 13. 4. Алмазные барабан (а) и круг (б) с прерывистой рабочей поверхностью; сечения рабочих поверхностей алмазного круга (в)

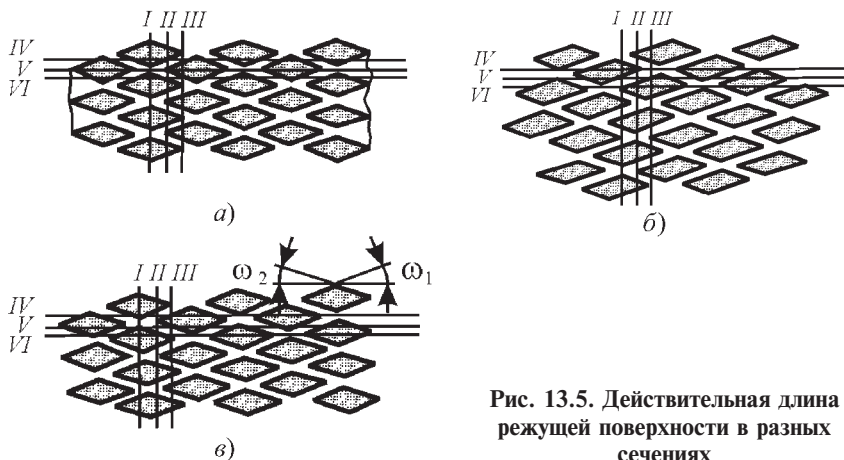


Рис. 13.5. Действительная длина режущей поверхности в разных сечениях

Модернизация технологического оборудования и ручных пневматических машин для шлифования ПКМ и сотовых наполнителей включает в себя возможность регулирования скорости резания и подачи: частота вращения шпинделя — в диапазоне  $2550 \dots 5000 \text{ мин}^{-1}$  и

### 13.2. Оптимальные конструктивные и геометрические параметры, мм, однослойных алмазных кругов (барабанов) для шлифования ПКМ

$D$	$L$	$d$	Длина винтовой канавки $M$	Ширина канавок левого направления $a_1$	Ширина канавок правого направления $a_2$	Глубина канавок левого направления $h_1$	Глубина канавок правого направления $h_2$	Радиус округления канавок $r_1 = r_2$	Число канавок левого направления $n_1$ , шт.	Число канавок правого направления $n_2$ , шт.
60	20	12	326	0,7	1,0	1,0	1,0	0,8	63	75
	70	20								
200	640	60	1100	5,0	4,0	1,3	1,6	1,0	54	44

8000...15000 мин<sup>-1</sup>, скорость резания — 30...50 м/с, подача — 0,05...0,35 м/с (3...21 м/мин); возможность перемещения стола станка по высоте ручным и механическим приводом.

Модернизация серийно выпускаемых продольно-фрезерных станков рейсмусового типа должна включать в себя конструктивные изменения механизмов узлов главного движения и движения подачи; изготовление специальных устройств для эффективного удаления стружки и пыли.

Конструктивное изменение узла резания включает в себя замену ножевого вала специальной оправкой для монтажа алмазно-абразивного круга-барабана.

Конструкция пылеотсоса должна обеспечивать местный отсос пыли и стружки с коэффициентом эффективности не менее 0,95. Расход воздуха удаляющего отходы шлифования, должен быть 3000...4000 м<sup>3</sup>/ч при скорости воздушного потока 20...22 м/с.

### 13.4. АЛМАЗНЫЕ ГОЛОВКИ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ

Алмазная головка шлифовальная (рис. 13.6) состоит из стального незакаленного корпуса 1 диаметром  $D$  и длиной  $L$  и алмазосодержащего слоя 2. Алмазосодержащий слой закреплен на наружной

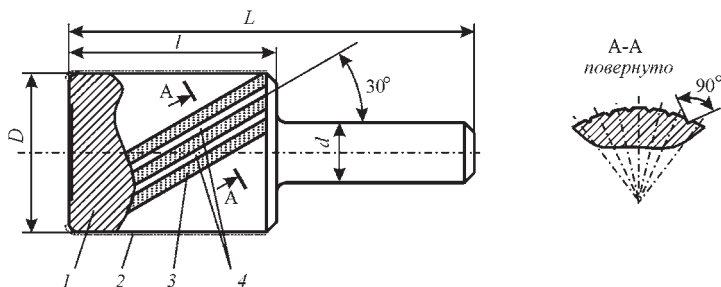


Рис. 13.6. Алмазная головка шлифовальная

поверхности корпуса головки на длине  $l$ , для его изготовления применяют шлифпорошки синтетического алмаза марок АС15, АС20 зернистостью 200/160...400/315.

Наружная рабочая поверхность шлифовальных головок может быть выполнена как сплошной, так и прерывистой. В качестве типовой конструкции на рис. 13.6 показан фрагмент прерывистой рабочей поверхности шлифовальной головки. Совокупность алмазно-абразивных элементов 3 образована винтовыми канавками 4 левого направления, выполненными под углом  $30^\circ$  к геометрической оси инструмента.

Основные геометрические параметры однослойных алмазных шлифовальных головок приведены в табл. 13.3.

### 13.3. Основные конструктивные параметры, мм, однослойных алмазных головок шлифовальных

$D$	$d$	$l$	$L$	Число винтовых канавок $n$ , штук
6	6	40	80	8
8				11
10	8	40	80	14
12				16
16	10	40	80	22
20				27

Модернизированные станки и ручные пневматические машины для выполнения зачистных и других работ при обработке ПКМ алмазными шлифовальными головками должны иметь регулируемую частоту вращения шпинделя в диапазоне  $12000...20\,000\text{ мин}^{-1}$ . Для удаления из зоны обработки стружки и пыли необходимо использовать пневмоэжекторные пылесосы типа ППВ или аналогичные.

### 13.5. АЛМАЗНЫЕ НОЖОВОЧНЫЕ ПОЛОТНА

Алмазные ножовочные полотна (рис. 13.7) состоят из стального корпуса *I* в виде пластины длиной 100 мм, шириной 10 и 15 мм и толщиной 1,2 мм. На одной из торцевых поверхностей *A* и примыкающих к ней боковых поверхностей *B* закреплен сплошной (исполнение *I*) и прерывистый (исполнения *II* и *III*) алмазосодержащий слой *2*, для изготовления которого применяют шлифпорошки синтетического алмаза марок АС20 зернистостью 200/160...630/500.

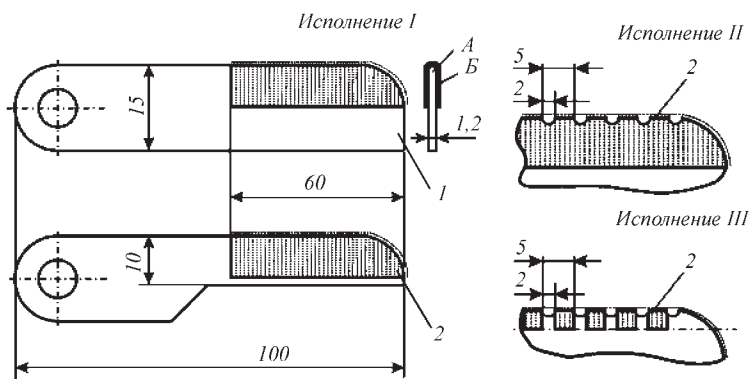


Рис. 13.7. Конструкция однослойных алмазных ножовочных полотен

### 13.6. АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫЕ СВЕРЛА

При обработке внутренних отверстий, сверлении отверстий в деталях из полимерных и металлополимерных (МПКМ) композиционных материалов, с целью обеспечения возможности врезания алмазно-абразивных отрезных кругов и ножовочных полотен, по-

лучения отверстий под сборочные работы, изготовления образцов-«свидетелей» материалов, необходимых для определения их физико-механических характеристик, эффективно применять алмазно-абразивные сверла.

Разработаны конструкции стержневых и кольцевых алмазно-абразивных однослойных сверл диаметром от 2 до 60 мм, предназначенных для сверления отверстий в листовых и плиточных полимерных и металлополимерных композиционных материалах (рис. 13.8 и 13.9). Оптимальные режимы резания: скорость резания 5...20 м/с; продольная подача 0,01...0,10 мм/об.

Применение однослойных алмазно-абразивных сверл на никелево-гальванической связке в технологии обработки отверстий в изделиях из ПКМ и МПКМ позволяет повысить срок службы инструмента по сравнению с базовой технологией, основанной на применении

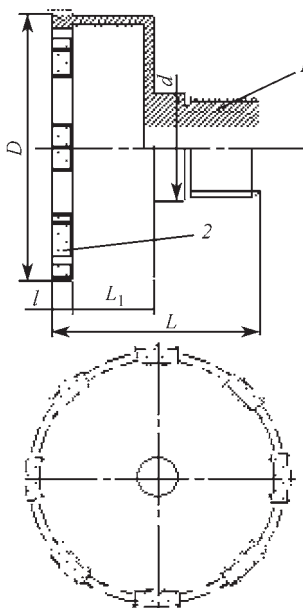


Рис. 13.8. Конструкция алмазно-абразивного кольцевого сверла:

1 — корпус;  
2 — алмазосодержащий слой

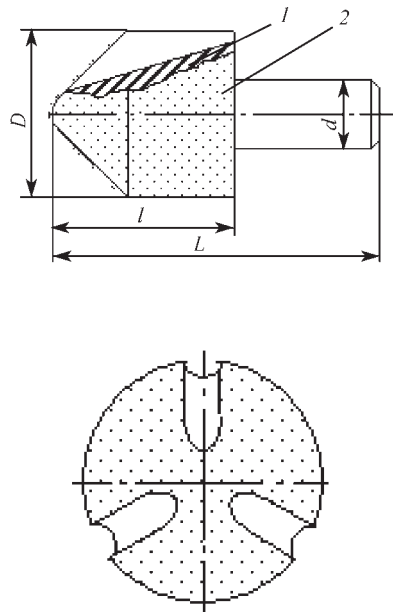


Рис. 13.9. Конструкция алмазно-абразивного стержневого сверла:

1 — корпус;  
2 — алмазосодержащий слой

лезвийного быстрорежущего и твердосплавного инструмента: при сверлении отверстий в угле-, стекло- и органопластиках в 5–10 раз, в металлополимерном композиционном материале типа АЛОР (гибридный материал «алюминий-органопластик») в 9–10 раз; увеличить производительность обработки в 3–9 раз; улучшить качество обработанной поверхности: свести к минимуму действие термической деструкции полимерной составляющей, прижоги, расслоения, ворсистость, выкрашивание кромок и другие дефекты на обработанной поверхности изделий, обеспечивая шероховатость в пределах  $Rz$  20...40; повысить точность обработки в 2,0–2,5 раза, обеспечивая получение отверстий по точности не ниже 10 квалитета.

### 13.7. ЗЕНКОВКИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

При изготовлении клепанных элементов конструкций, состоящих из пакетов ПКМ, например, углепластик-углепластик, органопластик-углепластик, а также гибридных смешанных пакетов, состоящих из углепластика и металла (сплавы на основе алюминия и титана), необходимо выполнять зенкование цилиндрических или конических углублений в отверстиях под заклепки с углом конуса  $2\varphi = 90^\circ$  и  $120^\circ$ . Толщина листовых ПКМ и МПКМ, используемых в соединениях, не превышает 6 мм.

Разработаны однослойные алмазно-абразивные и лезвийные, оснащенные пластинами АТП, зенковки, а также научно-обоснованные практические рекомендации по их рациональной эксплуатации (рис. 13.10 и 13.11).

Оптимальные режимы резания: скорость резания 3...20 м/с; продольная подача 0,01...0,12 мм/об; глубина резания 0,5...5,0 мм.

Применение однослойных алмазно-абразивных зенковок на никелево-гальванической связке и лезвийных, оснащенных пластинами АТП, в технологии зенкования конических и цилиндрических углублений в отверстиях изделий из ПКМ и МПКМ позволяет повысить срок службы инструмента по сравнению с базовой технологией, основанной на применении лезвийного быстрорежущего и твердосплавного инструмента: при зенковании углепластиков — в 7–8 раз, боропластиков — в 4–5 раз, органопластиков — в 10–12 раз; увеличить производительность обработки в 3–5 раз; улучшить качество обработанной поверхности: исключить поверх-

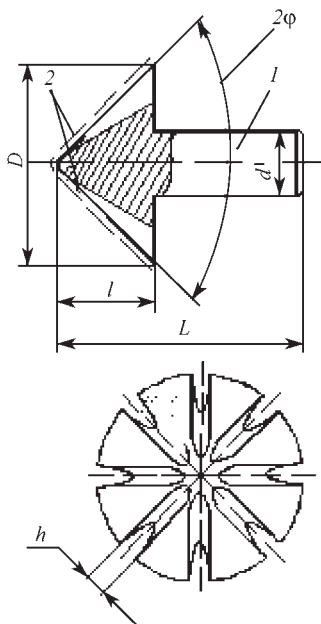


Рис. 13.10. Конструкция алмазно-абразивной конической зенковки:

- 1 — корпус зенковки;  
2 — алмазосодержащий слой

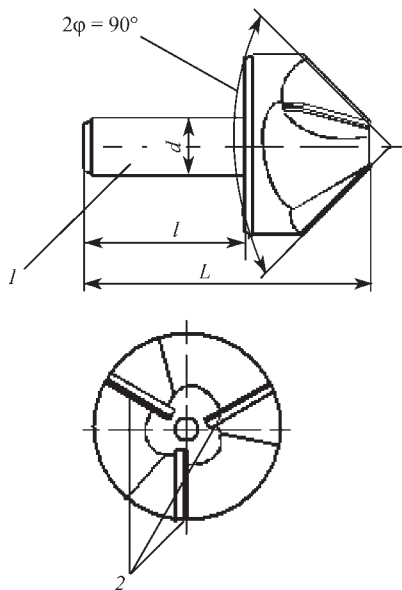


Рис. 13.11 Конструкция конической зенковки, оснащенной пластинами АТП:

- 1 — корпус зенковки;  
2 — режущие пластины АТП

ностные дефекты в зоне кромок — выкрашивание и скругление, наружные трещины; исключить отслоения и внутренние дефекты — расслоения, растрескивание и прижоги; свести к минимуму действие термической деструкции полимерной составляющей, обеспечивая шероховатость обработанной поверхности  $Rz\ 20...40$ .

В производстве товаров народного потребления, строительной индустрии, судостроении и других отраслях промышленности широко используются древесностружечные плиты, слоистые пластики, резина и другие композиционные материалы.

Несмотря на относительно низкую плотность и малую механическую прочность этих материалов в сравнении с металлами, механическая обработка их резанием вследствие высокой абразивной способности и низкой теплопроводности приводит к интенсивному износу инструмента.



### **13.8. РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ, СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ И РЕЗИНЫ**

Наиболее эффективными материалами инструментального назначения для механической обработки резанием изделий из таких композитов являются сверхтвердые материалы, в частности, синтетические алмазы и поликристаллические материалы на их основе.

#### **13.8.1. Алмазные барабаны**

Древесностружечные и резинопластиковые композиционные материалы, слоистые пластики выпускают, главным образом, в виде плит и листов. Основными технологическими операциями их механической обработки резанием являются шлифование плоскости с целью выравнивания поверхности плиты по толщине и разрезание последней на детали заданных размеров.

С целью повышения долговечности и надежности абразивного инструмента для калибрования полноформатных древесностружечных плит разработаны крупногабаритные алмазно-абразивные барабаны (рис. 13.12).

Одним из преимуществ алмазно-абразивного инструмента по сравнению со шлифовальными лентами является то, что зерна синтетического алмаза, используемые в качестве режущих элементов в алмазных барабанах, отличаются от абразивных зерен (электрокорунда и карбида кремния) более развитой формой поверхности и высокой теплопроводностью. Поэтому теплота, образующаяся в процессе шлифования, не аккумулируется в тонких поверхностных слоях контактирующих поверхностей инструмента и обрабатываемой детали, а отводится благодаря высокой теплопроводности синтетического алмаза и никелевой связки в стальной корпус алмазного барабана, что позволяет снизить теплонапряженность процесса резания, уменьшить тепловое воздействие на поверхностный слой обрабатываемой детали, исключить термическую деструкцию полимерной составляющей и «засаливание» рабочей поверхности инструмента продуктами шлифования. Это в конечном итоге позволяет интенсифицировать технологические режимы ре-

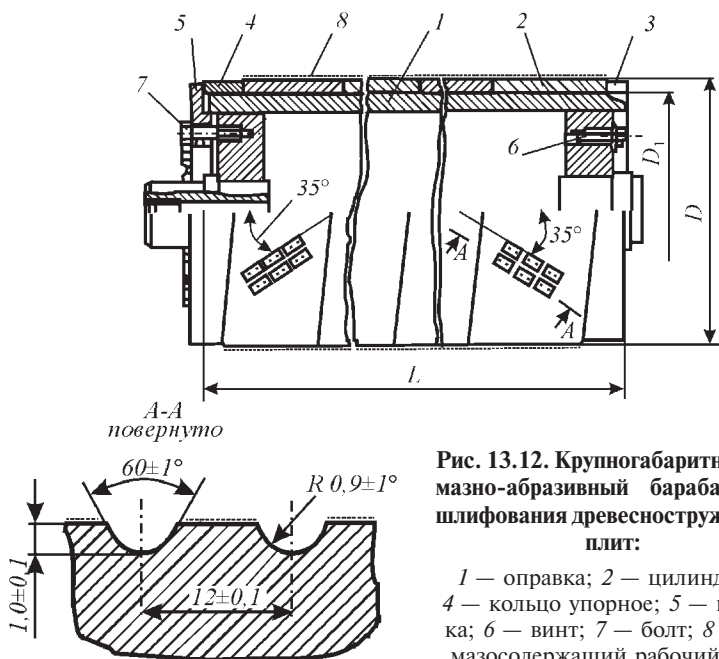


Рис. 13.12. Крупногабаритный алмазно-абразивный барабан для шлифования древесностружечных плит:

1 — оправка; 2 — цилиндр; 3, 4 — кольцо упорное; 5 — крышка; 6 — винт; 7 — болт; 8 — алмазосодержащий рабочий слой

зания и повысить производительность обработки древесностружечных плит и резинопластиковых композиционных материалов.

На рис. 13.12 показана конструкция алмазно-абразивного барабана, состоящего из алмазных модулей, выполненных в виде тонкостенных цилиндров, пустотелой оправки, на которую они устанавливаются, и крепежных деталей (числовые значения  $L$ ,  $D$ ,  $D_1$  см. в табл. 13.4). Алмазно-абразивные цилиндры выполнены со скошенными торцами с наружным и внутренним конусами, благодаря которым обеспечиваются надежное соединение модулей на оправке и передача крутящего момента при вращении барабана в процессе работы.

Закрепление алмазосодержащего слоя на металлическом модуле может выполняться двумя методами: гальваническим, методом гальваностегии никелево-гальванической связкой, а также с применением вакуумной технологии и адгезионно-активных связок. Использование адгезионно-активных связок позволяет увеличить величину выступания зерен алмаза над уровнем связки, повысить

## 13.4. Основные размеры алмазных барабанов, мм

Номер рисунка	$L$	$D$		$D_1$		Примечание
		Номинальный	Предельное отклонение	Номинальный	Предельное отклонение	
13.12	1920	360	-0,360	338	+0,057	Количество алмазных модулей — 6 (3 с правым и 3 с левым наклоном)
		380		355		
		400		375		
13.13	640	160	-0,148	100	+0,040	—
	810	200	-0,185			
13.14	640	200	-0,185	60	+0,030	Количество алмазных брусков — 12
	810					

прочность закрепления их в связке и тем самым обеспечивает более эффективное использование режущих свойств алмаза.

Оптимальная величина закрепления алмазных зерен в связке или, другими словами, толщина никелево-гальванической связки  $h$ , обеспечивающая надежное закрепление алмазных зерен с металлической основой модуля и прочное удержание их до максимально возможного износа, составляет  $h = (0,5...0,6)d$ , где  $d$  — средний размер зерна основной фракции.

Другой наиболее прочной связкой является адгезионно-активная титано-медно-оловянистая связка, закрепление алмазосодержащего слоя которой проводится в вакуумных печах при вакууме  $5 \cdot 10^{-5}...5 \cdot 10^{-6}$  Па и температуре 920 °С. Величина заделки алмазных зерен высокопрочной адгезионно-активной связкой меньше, чем никель-гальванической, и составляет  $h = (0,2...0,3)d$ , что обеспечивает большее выступание зерен над уровнем связки и способствует повышению эффективности использования режущих свойств алмазного инструмента.

Для снижения энергетических затрат и температуры в зоне резания при контактном взаимодействии режущих элементов алмазно-

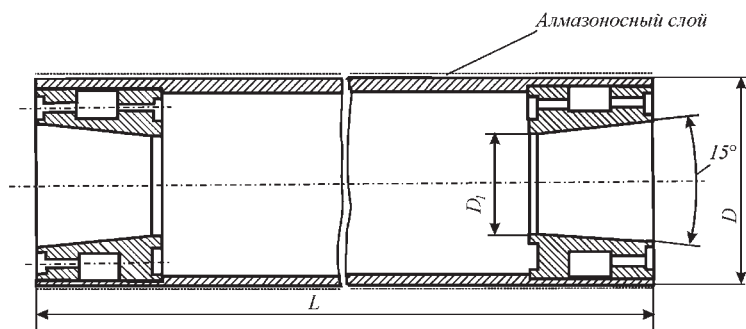
абразивного инструмента с обрабатываемым материалом рабочая поверхность алмазного барабана выполнена прерывистой. Она состоит из режущих элементов — площадок в виде параллелограммов размерами  $6 \times 10$  мм, оснащенных порошками синтетического алмаза марок АС15 (АС20, АС32) зернистостью 500/400, и стружечных канавок шириной 2 мм и глубиной 1 мм, расположенных по спирали под углом  $35^\circ$  к образующей цилиндра. Геометрические размеры режущих элементов, их форма и угол наклона выбраны из условия равномерного контакта с обрабатываемым материалом в зоне резания в любом сечении по диаметру, перпендикулярном к продольной оси алмазного барабана.

Алмазно-абразивные модули разработаны в двух исполнениях — с правым и левым наклоном алмазосодержащих площадок. При сборке модули устанавливаются на оправке поочередно, т.е. один с правым, другой с левым наклоном и т.д. в зависимости от ширины обрабатываемого материала. Для обработки древесностружечных плит шириной 1850 мм на оправке устанавливается шесть алмазно-абразивных модулей по 320 мм каждый, общая ширина которых составляет 1920 мм. Установленные на оправке модули фиксируются упорными кольцами с помощью крепежных деталей.

Другой не менее важной задачей алмазно-абразивной обработки полимерных композиционных материалов является шлифование щитовых элементов из древесностружечных плит, заготовок из слоистых пластиков и деталей листовой резины, ширина которых, как правило, не превышает 800 мм.

Для решения этой технологической задачи разработаны две разновидности алмазно-абразивных барабанов, одна из которых выполнена в виде цельного цилиндра, а другая представляет собой сборную конструкцию, состоящую из рабочих деталей в виде алмазно-абразивных брусков и корпуса, в котором они установлены.

Алмазный барабан в виде цельного цилиндра с прерывистой поверхностью, оснащенной порошками синтетического алмаза АС15 400/315, показан на рис. 13.13 (числовые значения  $L$ ,  $D$ ,  $D_1$  см. в табл. 13.4). Недостатком этой конструкции является то, что установка на станок и снятие в случаях проверки и контроля технического состояния алмазного барабана требуют демонтажа и последующей сборки узла резания с подшипниковыми опорами, что вызывает значительные трудности при его эксплуатации.

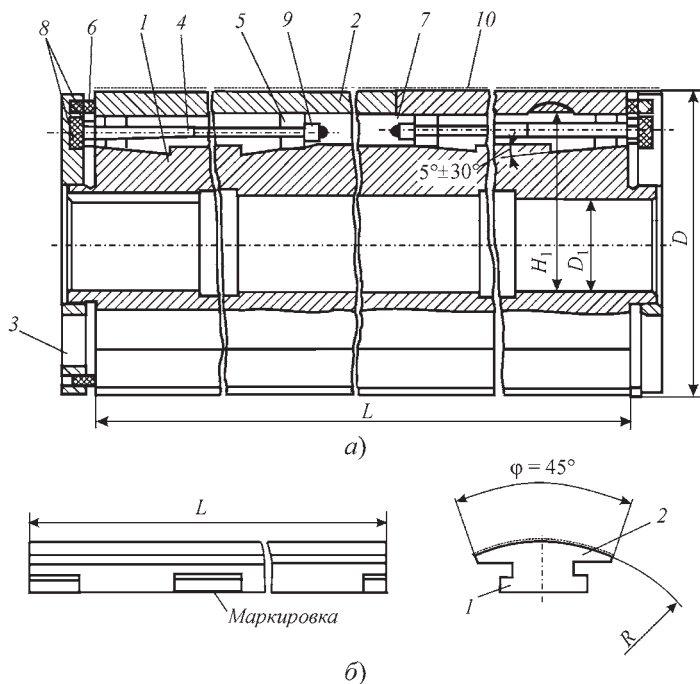


**Рис. 13.13.** Алмазный барабан для шлифования заготовок из древесностружечных плит и полимерных материалов

На рис. 13.14 приведена сборная конструкция алмазно-абразивного барабана, на периферийной части которого выполнены продольные пазы с базовыми направляющими выступами. Алмазно-абразивные бруски с прерывистой рабочей поверхностью в своем основании также имеют базовые выступы (рис. 13.14, б), которые вставляются в продольные пазы корпуса барабана и, смещаясь вдоль пазов, легко устанавливаются по базовым направляющим в рабочее положение. Такое конструктивное решение позволяет проводить переустановку алмазно-абразивных брусков непосредственно на станке, что не требует демонтажа и последующей сборки механизма резания станка.

При разработке сборных конструкций алмазно-абразивных барабанов был применен принцип нормализации базовых элементов и унификации основных геометрических параметров (см. табл. 13.4) инструмента, в результате чего алмазные модули и бруски взаимозаменяемы. Это дает возможность в случаях неравномерного износа или аварийного выхода из строя отдельных рабочих деталей заменять их полностью или частично.

Алмазно-абразивные инструменты с использованием в качестве режущих элементов шлифовальных порошков синтетического алмаза, закрепленных на металлической основе никелегальваническими и адгезионно-активными связками, способны выдерживать большие силовые нагрузки, что позволяет интенсифицировать технологические процессы механической обработки древесных материалов.



**Рис. 13.14. Барабан с алмазными брусками для шлифования щитовых элементов и панелей из древесностружечных плит:**

*a* — общий вид; 1 — корпус; 2 — брусок алмазно-абразивный; 3 — фланец; 4 — винт; 5 — ролик; 6 — ролик-гайка; 7 — втулка; 8 — кольцо; 9 — шплинт; 10 — алмазосодержащий слой; б — алмазный брусок

Так, например, при шлифовании на станке ДКШ-1 древесностружечных плит шириной 1750 мм алмазно-абразивным барабаном диаметром 380 мм и длиной рабочей поверхности 1920 мм, оснащенной шлифовальными порошками синтетического алмаза АС15 500/400, за один проход срезается слой в среднем 2,0 мм. Тогда как шлифовальной лентой замкнутого контура на тканевой основе размерами 2620×1920 мм с абразивными зернами из карбида кремния зернистостью 50 срезаемый за один проход слой древесностружечной плиты не превышает, как правило, 1,2 мм. Исходя из этого, производительность шлифования алмазно-абразивными барабанами в 1,6 раза выше, чем шлифовальными лентами.

Использование алмазно-абразивных барабанов в промышленных условиях показало, что одним барабаном обрабатывается около 1 млн 200 тыс. погонных метров древесностружечных плит. Это позволяет за срок его службы заменить более 100 комплектов шлифовальных лент. Расчет экономической целесообразности применения алмазно-абразивных барабанов при шлифовании древесностружечных плит показал, что только за счет повышения производительности шлифования и снижения затрат по заработной плате себестоимость механической обработки древесностружечных плит алмазно-абразивными барабанами в сравнении с шлифованием абразивными лентами снижается на 40...50 %.

### 13.8.2. Алмазные отрезные круги

Доминирующее место в технологии резки плитных и листовых древесных и полимерных материалов занимают режущие инструменты в виде отрезных кругов и круглых пил.

Для изготовления режущей части по внешней окружности диска и боковым его поверхностям используются шлифпорошки синтетического алмаза марок АС15...АС32 зернистостью 315/250...630/500 на металлической (никелегальванической) связке, осаждаемой способом гальваностегии. Режущая часть может быть выполнена в двух вариантах: сплошной (рис. 13.15) и прерывистой (рис. 13.16).

Алмазные отрезные круги со сплошной режущей частью изготавливаются диаметром до 250 мм и применяются, главным образом, на переносных электро- и пневмомашинках для обработки слоистых пластиков толщиной до 10 мм и ручной подаче не более 6 м/мин.

Применение алмазных отрезных кругов с прерывистой режущей частью позволяет снизить до 30...40 % теплонапряженность в зоне резания и повысить их устойчивость в работе. Это имеет большое значение в технологии обработки стеклопластиков и текстолитов на повышенных режимах резания.

Периферийная зона диска алмазного отрезного круга с прерывистой рабочей частью состоит из алмазосодержащих выступов длиной  $l$  и впадин с шагом  $t$ , величина которых зависит от толщины диска  $b$  и находится в пределах  $t = (4...8)b$ , при этом  $l/t = 0,6...0,8$ , а высота режущего элемента  $h = (0,3...0,4)t$  (табл. 13.5).

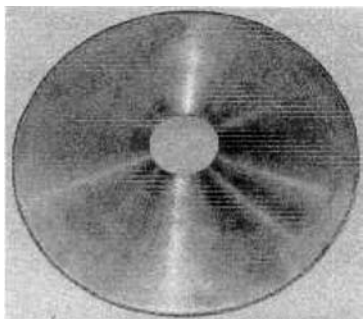


Рис. 13.15. Алмазный отрезной круг со сплошной режущей частью

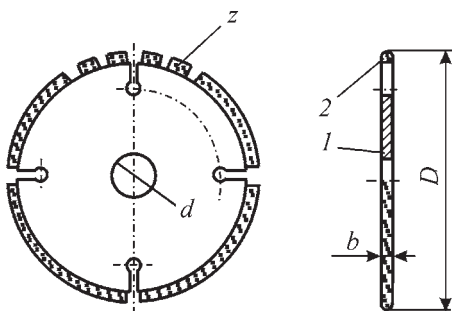


Рис. 13.16. Алмазный отрезной круг с прерывистой режущей частью:

1 — корпус диска;  
2 — алмазоносный слой

### 13.5. Основные размеры алмазных отрезных кругов, мм

Наружный диаметр $D$	Диаметр посадочного отверстия $d$	Толщина $b$	Количество выступов $z$
160	32	1,2; 1,4	36
200		1,2; 1,4; 1,6	48
250		1,4; 1,6; 1,8	60
315	50,8	1,8; 2,0; 2,2	76
355		2,0; 2,2; 2,5	86
400		2,2; 2,5; 2,8	96

Кроме этого, в дисках алмазных отрезных кругов с прерывистой режущей частью вырезаны радиальные прорезы длиной 25...30 мм и шириной 2...3 мм, которые выполняют роль температурных компенсаторов.

#### 13.8.3. Дисковые пилы с алмазно-твердосплавными пластинами

В технологии обработки полимерных композитов применяют также дисковые пилы с режущими зубьями. По конструктивному



признаку дисковые пилы могут быть цельными, изготовленными из стального диска с паяными режущими зубьями, и сборными, состоящими из стального корпуса и вставных режущих зубьев.

Зубья дисковых пил оснащаются твердосплавными или алмазно-твердосплавными пластинами пайкой серебряным припоем ПСр 40.

Дисковые пилы цельной конструкции (рис. 13.17) представляют собой тонкие диски, число режущих зубьев которых для обычной обработки составляет 18...36, а для более ответственных чистовых операций 48...60.

Одной из важнейших характеристик такого лезвийного инструмента являются форма и угловые параметры режущих элементов, которые определяются в зависимости от физико-химических свойств инструментального и обрабатываемого материалов, требований к качеству изделий и кинематики резания. На рис. 13.18 приведены основные формы режущих элементов, наиболее часто встречающихся в практике лезвийной обработки древесностружечных плит и других полимерных композитов.

Поликристаллические алмазы наряду с высокой твердостью обладают и повышенной хрупкостью, что привело к необходимости повышения прочности лезвия зуба путем увеличения угла заострения  $\beta$  до  $70...75^\circ$ , при этом величина заднего угла была принята равной  $\alpha = 10...12^\circ$ , переднего  $\gamma = 0...10^\circ$ . Что касается дополнительных

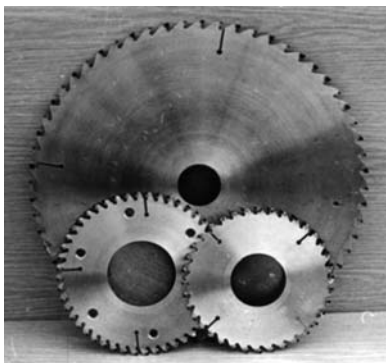


Рис. 13.17. Дисковые пилы, оснащенные АТП

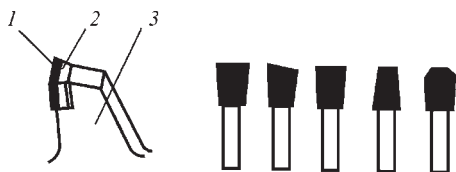


Рис. 13.18. Формы режущих элементов:  
1 — поликристаллический алмаз; 2 — твердосплавная подложка; 3 — корпус зуба

углов, то они составили: угол наклона режущей кромки  $\lambda$  и главной задней поверхности  $\lambda_1 — 10^\circ$ , а вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  и задний вспомогательный угол  $\alpha_1 — 1^\circ 30'$  и  $2^\circ 30'$  соответственно (рис. 13.19).

Одним из параметров, обеспечивающих условия нормальной работы дисковых пил, является зазор  $S$  между вспомогательной режущей кромкой и боковой поверхностью пилы, необходимый для исключения трения и заклинивания круглой пилы в пропиле. Этот зазор является нормированной величиной и при раскросе и резке древесностружечных плит, слоистых пластиков и резины находится в пределах  $0,4...0,7$  мм. Наибольшая величина  $S$  принимается для больших диаметров круглых пил.

Сборные дисковые пилы (рис. 13.20) состоят из режущих зубьев, оснащенных АТП, и ступицы с напрессованным на нее стальным корпусом с кольцевым пазом и резьбовыми отверстиями в основании, а также базовыми вырезами на внешней цилиндрической стенке кольца. Зубья дисковых пил в хвостовой части выполнены ступенчатыми с отверстиями, базовые поверхности которых по размерам и форме конструктивно согласованы с корпусом пилы, поэтому они с достаточной точностью размещаются в кольцевом пазе и закрепляются винтами с втулкой и пружинными шайбами.

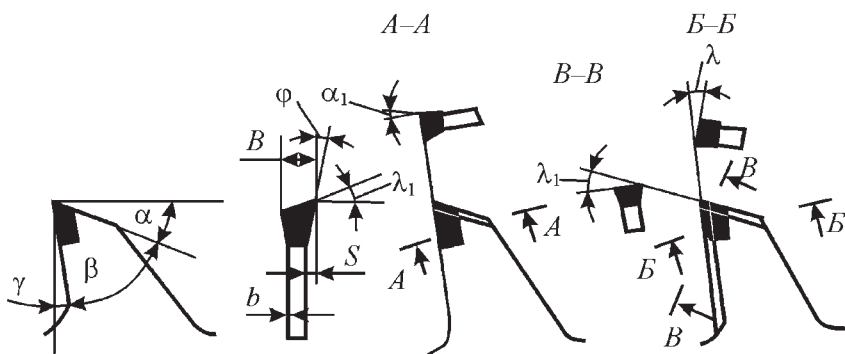


Рис. 13.19. Угловые параметры режущих элементов зубьев пилы, оснащенной АТП:

$b$  — ширина корпуса пилы;  $B$  — ширина зуба пилы

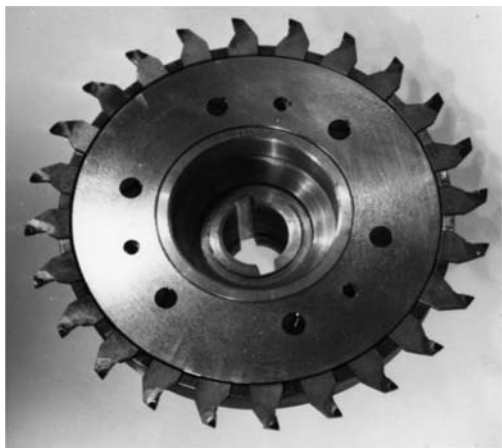


Рис. 13.20. Дисковая пила со вставными режущими зубьями, оснащенными АТП

Угловые параметры режущих элементов сборной конструкции аналогичны подобным параметрам пил с цельным диском. Основные размеры дисковых пил приведены в табл. 13.6.

13.6. Основные размеры дисковых пил с АТП, мм

Наружный диаметр $D \pm 2$	Диаметр посадочного отверстия $d$	Толщина корпуса $b$	Ширина зубьев $B$	Число зубьев $Z$ , штук
160	32	2,2; 2,4	3,4	18, 24, 30, 36
180	30, 32, 65			
200	32, 80			24, 30, 36, 48
250	32, 80, 130	2,4; 2,6	3,6	30, 36, 48
315	32, 50		3,4...4,0	36, 42, 48
355	50, 80	2,4; 2,6; 2,8	3,4...4,2	36, 42, 48, 56
400		2,6; 2,8; 3,0	3,8...4,6	36, 48, 56, 60

Сборные дисковые пилы имеют ограничение по толщине пропила, массе и назначению. В конструктивном отношении они раз-

работаны трех типоразмеров диаметром 180, 200 и 250 мм, и могут применяться для подрезки и обрезки облицовочных древесностружечных плит толщиной не более 25 мм.

Деревообрабатывающие станки, на которых устанавливаются дисковые пилы с АТП, должны соответствовать нормам точности, предусмотренным в паспорте станка.

При установке дисковых пил с АТП на валы пильных узлов и снятии их с валов не допускаются удары твердыми (металлическими) предметами по режущим элементам. Также категорически запрещается обрезка и раскрой древесностружечных плит с металлическими включениями.

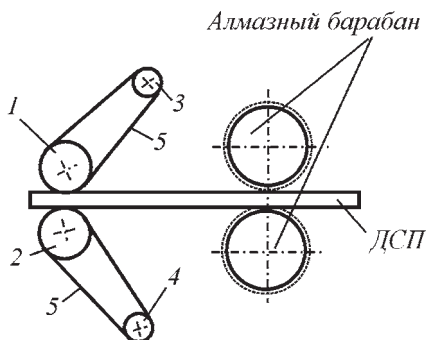
### **13.9. ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА**

#### **13.9.1. Алмазно-абразивная обработка древесностружечных плит, пластиков и резины**

При изготовлении изделий из древесных материалов, отделке и оформлении интерьеров внутренних помещений общественных зданий и других объектов культурно-бытового назначения широкое применение получили древесностружечные плиты (ДСП), промышленные форматы которых выпускаются размерами 1750×3500; 1830×2850 мм и номинальной толщиной 16 и 19 мм с допуском ±0,15 мм. Однако отклонения плит по толщине, или их разнотолщинность доходит до 2 мм, что требует дополнительной механической обработки резанием.

Устранение разнотолщинности проводится механической обработкой способом калибрования абразивными инструментами. Крупногабаритные алмазные барабаны с шириной рабочей поверхности 1920 мм успешно применяют для калибрования полноформатных древесностружечных плит. Они обеспечивают снятие разнотолщинности за один проход, при этом параметр шероховатости обработанной поверхности находится в пределах  $R_z$  80...120, что отвечает техническим требованиям к поверхностям, предназначенным для отделки облицовочными покрытиями.

Специальное оборудование для алмазно-абразивной обработки древесностружечных плит, слоистых пластиков и резины не выпуска-



**Рис. 13.21.** Схема калибровально-шлифовального станка:

1, 2 — контактные вальцы; 3, 4 — натяжные вальцы; 5 — шлифовальная лента

ется, поэтому крупногабаритные алмазные барабаны применялись на широколенточных шлифовальных станках с частичной модернизацией калибровальных агрегатов. На рис. 13.21 показана схема калибровально-шлифовального станка для обработки древесностружечной плиты шириной 1830 мм. Станок имеет два калибровальных агрегата, расположенных один напротив другого на верхней и нижней станинах, которые установлены на поперечных сварных траверсах.

Каждый калибровальный агрегат установлен под углом  $45^\circ$  к направлению подачи обрабатываемых плит и имеет по одному контактному и одному натяжному вальцу. Для обеспечения равномерной толщины срезаемого слоя с обеих сторон, обрабатываемая плита центрируется подпружиненными верхним и нижним роликовыми столами.

Крупногабаритные алмазные барабаны устанавливают на станке вместо контактных вальцов (см. рис. 13.21), которые демонтируются вместе со шлифовальной лентой с калибровального агрегата. Установленная мощность — 213,5 кВт, масса станка — 19,2 т.

Для производства плит повышенной точности по толщине и шероховатости  $R_z < 60$  применяют широколенточные станки с двумя парами абразивных агрегатов, расположенных последовательно, один из которых — калибровальный, и второй — шлифовальный, при этом в шлифовальном агрегате применяют алмазно-абразивные инструменты зернистостью на 1...2 номера меньше, чем в калибровальном.

Наряду с полноформатными плитами в производстве мебели, столярно-строительных изделий, товаров народного потребления в больших объемах используют заготовки из древесностружечных

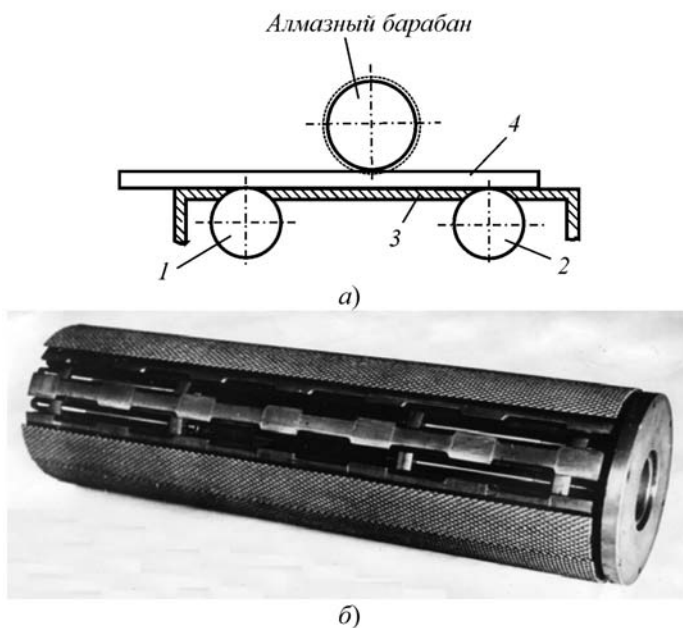
плит, слоистых пластиков и резины в виде щитовых и листовых элементов, панелей, поверхности которых подвергают шлифованию или шерохованию.

Для абразивной обработки этой номенклатуры заготовок шириной в пределах 800 мм предназначены алмазные барабаны, рабочая поверхность которых равна 640 и 810 мм. Применение этих типоразмеров алмазных барабанов на модернизированных продольно-фрезерных станках рейсмусового типа мод. СР6 и СР8 обеспечивает шлифование заготовок из древесностружечных, столярных плит, слоистых пластиков и резины, параметр шероховатости поверхности которых  $Rz \leq 100$ , в соответствии с техническими требованиями для последующей облицовки заготовок ножевой фанерой, декоративно-слоистым пластиком и ламинированными пленками на бумажной основе. Разработка алмазных барабанов привела к традиционной кинематической схеме абразивной обработки плоских поверхностей плитных и листовых материалов на станках цилиндрического типа, которые в сравнении с широколенточными шлифовальными станками являются более простыми и компактными, менее металлоемкими и более удобными в обслуживании и эксплуатации.

На рис. 13.22 показана схема калибрования щитовых деталей мебели из древесностружечных плит алмазными барабанами на модернизированном рейсмусовом станке мод. СР8. В механизме резания модернизированного станка был демонтирован ножевой вал и вместо него установлен алмазный барабан на прецизионных шарикоподшипниковых опорах. Установлен электродвигатель главного привода повышенной мощности, увеличена жесткость и точность станины станка, улучшена конструкция приемного устройства для удаления шлифовальной стружки.

Габариты станка (длина  $\times$  ширина  $\times$  высота) — 1800 $\times$ 1600 $\times$ 1400 мм, мощность — 47,5 кВт, масса — 1,3 т, производительность — 2,6 м<sup>3</sup>/ч.

Практика калибрования щитовых деталей мебели из древесностружечных плит на рейсмусовом станке алмазными барабанами (табл. 13.7) в сравнении с ножевыми валами, оснащенными твердосплавными ножами, на рекомендуемых режимах обработки показала, что наработка алмазных барабанов диаметром 200 мм и длиной 810 мм составляет в среднем 370 тыс. пог. м, тогда как твердосплавными ножами до полного износа обрабатывается 160 тыс. пог. м. Таким образом, по сроку службы алмазные барабаны в 2,3 раза превосходят твердосплавные ножи длиной 810 мм.



**Рис. 13.22.** Схема рейсмусового станка (а) и вид алмазного барабана с вынутым из корпуса бруском и снятым с левого торца кольцом (б):

1, 2 — контактные вальцы; 3 — стол; 4 — заготовка ДВП

Себестоимость алмазного калибрования за счет повышения долговечности алмазных барабанов в 2 раза ниже по сравнению с калиброванием лезвийными твердосплавными инструментами.

Другой технологической операцией, выполняемой алмазными барабанами, является шерохование заготовок из резинопластиковых каучукосодержащих композитов. Целью этой операции является подготовка поверхности обрабатываемой детали к последующему склеиванию. При шероховании деталей обуви из резины, кожи и ее заменителей, листового пластика и блоков монолитной резины специального назначения регламентируемая величина микронеровности склеиваемых поверхностей по параметру  $R_z$  120...140 может быть получена при использовании алмазных барабанов, оснащенных порошками синтетического алмаза зернистостью 500/400...630/500.

**13.7. Режимы шлифования алмазно-абразивными барабанами, зернистость синтетического алмаза и шероховатость обработанной поверхности ДВП**

Глубина шлифования $t$ , мм	Продольная подача $S_{пр}$ , м/мин	Зернистость алмаза основной фракции	Параметр шероховатости $R_z$ , мкм
0,5...1,0	16...24	400/315	60
1,0...1,5	12...16	400/315...500/400	100
1,5...2,0	8...12	500/400...630/500	140

Примечание. Скорость резания  $v = 25...30$  м/с; алмаз марки АС15, АС20.

Алмазно-абразивный инструмент, который выполняет практически три вида механической обработки резанием: шлифование, калибрование и шерохование, отличается стабильностью формы рабочей поверхности инструмента, которая за весь срок службы практически остается неизменной. Износ алмазных барабанов настолько мал, что не выходит за пределы допуска номинальной толщины обрабатываемых древесностружечных плит, слоистых пластиков и резины, благодаря чему исключается поднастройка технологического оборудования в процессе работы. Практика алмазно-абразивной обработки показала, что прерывистость рабочей поверхности повышает режущие свойства инструмента, улучшает теплоотвод и удаление срезаемой стружки из зоны резания, устраняя тем самым возможность засаливания алмазосодержащего слоя инструмента.

Одной из трудоемких технологических операций абразивной обработки является резка стеклопластика, текстолита, гетинакса, монолитной резины и других резинопластиковых композитов. Среди режущих инструментов для выполнения этой операции эффективными являются алмазные отрезные круги. Они применяются как на стационарном оборудовании для резки промышленных форматов указанных материалов, так и в ручных пневмоэлектромашинках для сборных и пригоночных работ на монтажных и строительных площадках.

Механическая обработка (обрезка) листовых и плитных композитов на промышленные форматы и резка их на заготовки и детали



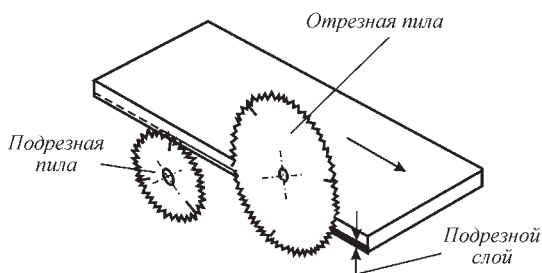
заданных размеров чаще всего проводится на деревообрабатывающих станках мод. ЦА-2 с нижним расположением отрезного круга или на модернизированных металлорежущих станках мод. 6М82ГБ с верхним расположением отрезного круга. Условия обработки на станках мод. ЦА-2 с точки зрения кинематики резания и техники безопасности более предпочтительны.

Применение алмазно-абразивных отрезных кругов обеспечивает точность и прямолинейность разрезания. Они просты и надежны в эксплуатации, не нуждаются в заточке и доводке, которая необходима при работе лезвийным инструментом. Резка слоистых пластиков, каучукосодержащих полимерных композитов толщиной до 30 мм осуществляется со скоростью резания 30...40 м/с и продольной подачей 2...6 м/мин. Алмазно-абразивные отрезные круги обладают высокими режущими свойствами и износостойкостью. Срок службы их в 20–30 раз выше твердосплавного лезвийного инструмента.

### **13.9.2. Дисковые пилы с алмазно-твердосплавными пластинами для обработки древесностружечных плит**

Эффективной областью применения дисковых пил с режущими зубьями, оснащенными алмазно-твердосплавными пластинами (АТП), является подрезка, обрезка и раскрой необлицованных древесностружечных плит и облицованных натуральным и синтетическим шпоном, слоистым пластиком и ламинированной пленкой.

Основным показателем качества обработки облицованных плит и заготовок из них являются отсутствие сколов облицовочного слоя, величина которых, принятая в производственной практике, не должна превышать 0,3 мм. С целью улучшения качества и уменьшения сколов облицовочного покрытия в технологии лезвийной обработки применяется дополнительная операция подрезки на глубину 2...4 мм наружной поверхности облицовочных плит. В образовавшийся подрезной слой вводится отрезной инструмент и осуществляется окончательная обработка плит и заготовок на заданные размеры. Дисковые пилы диаметром 160...250 мм с трапециевидной формой режущих элементов из АТП, углом наклона задней поверхности  $\lambda_1 = 10^\circ$  и вспомогательным углом  $\alpha_1 = 2^\circ 30'$  являются наиболее рациональным режущим инструментом для под-



**Рис. 13.23.** Схема подрезки и обрезки щитовых деталей мебели из древесностружечных плит

резки и обрезки заготовок из облицовочных древесностружечных плит. На рис. 13.23 показана схема подрезки и обрезки щитовых деталей мебели из древесностружечных плит с отделочными покрытиями на автоматических линиях МФК (Россия), Homag (Германия), Kanima (Канада) и др.

Дисковые пилы диаметром 355...400 мм, оснащенные АТП, применяют, главным образом, в технологических процессах раскроя и подрезки полноформатных как необлицованных, так и облицованных древесностружечных плит на круглопильных станках для форматной обработки и угловых установках.

В последнее время все больший объем древесностружечных плит раскраивается на однопильных станках с нижним расположением пильного агрегата, которые отличаются широкой универсальностью, наибольшей точностью и прямолинейностью пропила, наименьшим уровнем шума и хорошей пылезащищенностью. На базе таких однопильных станков созданы угловые установки для раскроя, состоящие из двух и более станков, расположенных под углом  $90^\circ$  и соединенных транспортно-передаточными средствами.

Технологический процесс раскроя древесных плит на угловых установках включает в себя следующие операции: автоматический ввод пакета плит на загрузочный роликовый конвейер, автоматическая подача плит на пильный агрегат, продольный раскрой плит на полосы, передача полос на промежуточный роликовый конвейер и поворот их на  $90^\circ$ , поперечный раскрой плит на заготовки, автоматическая разгрузка и укладка раскроенных плит.

Угловые установки отличаются между собой количеством одно-пильных станков, размерами обрабатываемых листовых и плитных древесных материалов, уровнем автоматизации и производительности. На рис. 13.24 приведена схема раскроя пакета древесностружечных плит, угловой установки мод. НРЛ фирмы Holzman (ФРГ), состоящей из двух пильных станков с вариантами раскроя и расположения пильного агрегата с одной основной пилой для раскроя пакета древесностружечных плит (подрезная пила в раскрое не участвует, а выполняет роль чистовой подрезки небольшого слоя глубиной 2...4 мм в нижней поверхности плиты, в который входит основная пила). На угловой установке раскраивается пакет плит толщиной до 140 мм, длиной и шириной соответственно 5660×3100 мм с бесступенчатой скоростью подачи каретки пильного агрегата до 70 м/мин при скорости резания 50...80 м/с. Подача на зуб пилы должна быть в пределах 0,06...0,012 мм. Мощность электродвигателей пильного агрегата — 20,2 кВт. Производительность обработки древесностружечных плит на угловой установке в зависимости от режимов резания и размеров пакета плит 10...23 м<sup>3</sup>/ч.

Дисковые пилы с АТП, используемые в технологии раскроя, подрезки и обрезки древесностружечных плит, по стойкости в

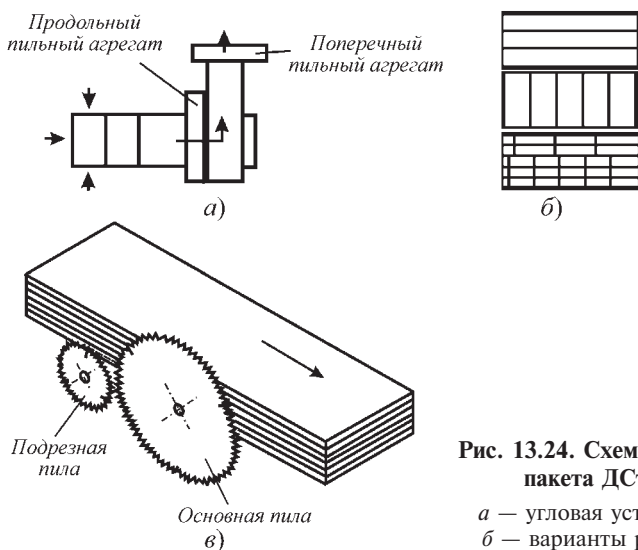


Рис. 13.24. Схема раскроя пакета ДСП:

а — угловая установка;  
б — варианты раскроя

40–60 раз превосходят твердосплавные пилы. За свой срок службы круглая пила с АТП заменяет до 30 твердосплавных пил. За счет сокращения затрат на переустановку и заточку инструмента, наладку и настройку оборудования себестоимость обработки деталей и заготовок из древесностружечных плит дисковыми пилами с АТП в 1,4–1,7 раза ниже, чем с твердосплавными пилами аналогичного назначения.

Дисковые пилы изготавливают из легированной листовой стали 50ХФА или 9ХФ, 9ХФМ. Из этой стали вырезают заготовки в виде многогранника и подвергают их термической обработке для придания заготовкам твердости 39...44 НРС, затем выполняется сверление посадочного отверстия. Заготовка обтачивается по наружному диаметру. Фрезеруются зубья, шлифуются боковые стороны в размер по толщине. Полученный таким образом корпус представляет собой диск постоянной толщины с зубьями, к которым крепят алмазно-твердосплавные пластины способом пайки серебряным припоем ПСр-40. Используется пайка в поле токов высокой частоты, толщина паяного шва обычно около 0,1 мм. АТП имеют вид таблеток диаметром 13,5 мм и толщиной 3,5 мм, разрезка их на прямоугольные режущие элементы заданных размеров проводится на электроэрозионных и электроискровых станках.

Наиболее ответственными и трудоемкими операциями при изготовлении дисковых пил с АТП являются операции заточки зубьев пилы. Их выполняют шлифованием и доводкой шлифовальными кругами из синтетических алмазов на универсально-заточных станках. Для того чтобы главные режущие кромки были одинаково удалены, не выступали за рабочий радиус диска, проводится шлифование зубьев по наружному диаметру алмазными кругами формы 1А1. Формирование боковых поверхностей и зазора между вспомогательной режущей кромкой и боковой стороной диска выполняется шлифовальными кругами 12А2-45°. Используют шлифпорошки марок АС6 160/125, АС6 125/100 на металлических связках М2-01 с относительной концентрацией 100. Для доводки режущих элементов используют те же формы алмазных кругов, но в их рабочем слое применяют шлифпорошки меньшей зернистости — АСН 40/28. Это обеспечивает снижение параметра шероховатости поверхности поликристаллического алмаза до  $Ra\ 0,1...0,32$ .

Потеря режущих свойств затупившихся зубьев пилы в процессе эксплуатации определяется по фаске износа задней поверхности зуба, которая не должна быть более 0,25 мм. При такой величине износа зубьев они подлежат заточке по задней поверхности алмазными кругами формы 1А1 125×10×3×32 АС6 125/100 М2-01-4 со скоростью резания 25...30 м/с, продольной подачей 1...2 м/мин и поперечной подачей 0,01...0,03 мм с последующим выхаживанием на универсально-заточном станке.

Все операции шлифования и доводки при заточке дисковых пил с АТП выполняют обязательно с применением охлаждения 1,5...2 %-ным водным раствором кальцинированной соды.

Дисковые пилы должны быть статически уравновешены, допустимое значение дисбаланса для пил диаметром 250...315 мм не более 250 г·мм, а для пил диаметром 355...400 мм — 300 г·мм.

Алмазно-абразивные и лезвийные инструменты с рабочими элементами из сверхтвердых материалов по режущей способности, надежности и долговечности в десятки раз превосходят режущие инструменты аналогичного назначения из легированных, быстрорежущих сталей и твердых сплавов.

### **13.10. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Меры, направленные на удаление стружки и пыли из зоны обработки.* При механической обработке резанием абразивных ПКМ в зоне резания образуется мелкодисперсная стружка и особенно пыль, что создает проблему в отношении безопасности для здоровья операторов-станочников. Кроме того, это приводит к тому, что вся режущая рабочая часть инструмента забивается образуемой стружкой и пылью и это служит источником снижения эффективности резания и сокращения долговечности инструмента.

Установка пылеотсосов в зоне обработки частично обеспечивает удаление образуемой пыли, и поэтому желательно место обработки ПКМ полностью обеспечить пылеотсосной системой.

В случае обработки ПКМ, армированных углеродными волокнами, включая и нанодисперсные частицы, образующиеся в про-

цессе резания мелкие частицы углерода, которые обладают способностью проводить электрический ток, могут пагубно влиять на работу электрических машин, систем и регистрирующих устройств, а также интенсифицировать износ трущихся поверхностей технологического оборудования, находящегося в помещении цеха или участка, где выполняются работы по механической обработке ПКМ. Поэтому все электроприводы, электромеханизмы и регистрирующие приборы необходимо снабжать защитными экранами. В равной мере эти требования должны соблюдаться и при применении СОТС.

Наиболее эффективными способами удаления образуемой пыли и стружки, а также способствующие предотвращению теплообразования в зоне резани, являются применение СОТС: вода, раствор на ее основе (мыльная вода и др.), а также применение в качестве охлаждающей среды «холодного» воздуха. Применение охлаждающих жидкостных технологических сред обеспечивает также наряду с эффективным удалением пыли повышение долговечности режущего инструмента. Однако это может создать определенные проблемы при последующей сборке, так как необходимо выполнить последующую промывку деталей и затем их высушивание.

Высокоэффективными методами обработки резанием ПКМ алмазно-абразивными инструментами, предотвращающими термоокислительную деструкцию их поверхностного слоя при одновременном повышении режима резания и производительности обработки, является применение предварительно охлажденного сжатого воздуха. Получение такого воздуха с помощью вихревой трубки позволяет получить охлажденный поток воздуха с температурой от  $-20$  до  $-33$  °С при давлении воздуха в воздушной пневматической магистрали  $0,3...0,5$  МПа. Вихревая трубка с диаметром входного отверстия  $14$  мм расходует  $0,025...0,033$  м<sup>3</sup>/с воздуха при давлении  $0,5$  МПа и температуре  $20$  °С.

Система индивидуального отсоса пыли и стружки от станка должна состоять из приемника-пылеулавливателя, отводящей системы с вентилятором и агрегата для очистки воздуха. Скорость движения воздуха в приемнике-пылеулавливателе должна быть не менее  $17$  м/с. Расход воздуха, удаляемого отходы обработки, должен быть в пределах  $1,0...2,0$  тыс. м<sup>3</sup>/ч при варьировании диаметра отводной трубы от  $100$  до  $200$  мм.

**Проблемы, связанные с использованием инструмента с механическим приводом (ручные пневматические машины и др.).** Технологические операции разрезания, резки, шлифования, зачистки поверхностей изделий, а также другие виды обработки (обработка по периметру, сверление отверстий, зенкование конических и цилиндрических углублений) выполняют большей частью при получении изделий или деталей из ПКМ со сложной криволинейной поверхностью, а также в процессе механосборочных и достроечных работ. В последнее время все большее применение находят автоматизированные системы с ЧПУ, но в значительно большей степени на таких работах применяются ручные пневматические и электрические инструменты. Существующий инструмент с механическим приводом предназначен, как правило, для обработки металлов и не предназначен для обработки ПКМ. В то же время существующие модели ручного инструмента применяются в технологии механосборочных работ, где используются изделия из ПКМ, армированных различными волокнами, поэтому возникает острая необходимость его усовершенствования в отношении изменения числа оборотов шпинделя, подачи, мощности, жесткости шпинделя и системы пылеулавливания.

В частности, для выполнения операций разрезания, шлифования и зачистки изделий из ПКМ ручные пневматические инструменты должны иметь мощность привода 2,5...3,5 кВт; возможность варьирования числа оборотов шпинделя от 6 до 25 тыс. мин<sup>-1</sup>; варьирование подачи на один оборот шпинделя от 0,001 до 0,300 мм/об.

**Средства и мероприятия, предотвращающие расслоение и ворсистость.** Если выбранные геометрические параметры и характеристики рабочей поверхности применяемых алмазно-абразивных инструментов, в частности, отрезных кругов, кругов плоских прямого профиля, кругов-барабанов, шлифовальных головок и др. не позволяют полностью предотвратить явления расслоения и ворсообразования, которые особенно характерны при обработке вязкоупругих органических ПКМ типа СВМ, то необходимо применять опорные пластины из материала, который имеет хрупкий характер разрушения при резании. Зарубежный опыт рекомендует наклеивать по обеим сторонам обрабатываемого полимерного композиционного материала клейкую ленту («скотч»), акриловый лист и др. Процесс наклеивания вспомогательных средств и их удаление требует достаточно много времени.

Еще с большими трудностями приходится сталкиваться при обработке материала, в котором органические волокна используются совместно с другими волокнами или металлами. Это так называемые гибридные полимерные или металлополимерные композиционные материалы. В этих случаях невозможно одновременно учесть специфику обработки всех типов волокон и материалов одновременно.

Анализ результатов исследований по установлению закономерностей изменения составляющих силы резания и температуры в зоне резания, а также определения обрабатываемости ПКМ позволяют сделать вывод о том, что верхние слои обрабатываемого материала, подвергаемого резанию, оказывают наибольшее влияние на качество обработки. Поэтому в производственных условиях необходимо стремиться к тому, чтобы геометрические параметры и характеристика рабочих поверхностей инструмента, а также режимы резания подбирались в соответствии с верхними слоями обрабатываемого материала.



## Глава 14

### ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТЕКЛА И КАМНЯ

Многообразие технологических операций, выполняемых при механической обработке деталей из стекла, высокие требования к производительности обработки и качеству обработанных поверхностей, а также специфика обработки различных видов стекла обуславливают необходимость использования алмазных инструментов различных форм, характеристик и типоразмеров. В зависимости от требований, предъявляемых к деталям из стекла, их назначения и вида обрабатываемого материала (строительно-архитектурное стекло, пеностекло, стеклянные трубы, кварцевое, светотехническое, оптическое и закаленное листовое стекло, триплекс и гнутое стекло, химико-лабораторное, термометрическое, медицинское, электродное и художественное стекло, тарное и сортовое стекло и т.п.) выполняются различные операции механической обработки (резка, сверление, грубое, тонкое и супертонкое шлифование, полирование и др.) при помощи алмазных инструментов различных конструкций.

#### 14.1. КОНСТРУКЦИИ АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

В зависимости от конструкции алмазные инструменты для обработки стекла распределяются на группы:

- отрезные круги;
- сверла;
- шлифовальные круги и головки;
- гибкие и эластичные инструменты.

Корпуса алмазных шлифовальных кругов изготавливают из стали марок Ст3, 20, 25, 30 или из алюминиевого сплава марок АК6, АК7, АК5М2, Д16. Корпуса отрезных кругов изготавливают из листовой холоднокатаной стали, стали 9ХФ или 50Г, 60Г, 65Г. При из-

готовлении отрезных сегментных кругов сегменты паяют на корпус серебряным припоем ПСр 45.

Характеристика алмазносного слоя инструмента определяется маркой, зернистостью и концентрацией алмазных порошков, а также связкой. Для изготовления алмазного инструмента, применяемого для обработки стекла, обычно применяют шлифпорошки из синтетического алмаза АС4, АС6 и АС15, а также микропорошки АСМ и АСН. Зернистость используемых в инструменте алмазных порошков определяется операцией обработки. Обработку деталей из стекла целесообразно осуществлять в два и более переходов (операции черногового и чистового шлифования; декоративного полирования; при обработке оптического стекла — операции грубого шлифования, тонкого алмазного шлифования (ТАШ), супертонкого алмазного шлифования (СТАШ)). Поэтому зернистость алмазного порошка в алмазносном слое инструмента устанавливается в зависимости от требований к шероховатости обработанных поверхностей. Концентрация алмазов в инструменте обычно составляет 25...100 % — для грубых операций обработки, 5...25 % — для ТАШ и СТАШ.

Инструменты для обработки стекла выпускают на металлических, органических, керамических и эластичных (каучукодержащих) связках. Наиболее широкое распространение в инструментах для обработки стекла нашли металлические связки М2—01, М1—04, М3—01, органические В2—01, В1—02, В3—01 и керамические К2—01, К3—01. Сравнительная оценка свойств некоторых металлических связок приведена в табл. 14.1.

Алмазные круги выполняют в виде 17 основных типовых форм более 200 различных типоразмеров.

Основные формы кругов:

- алмазные отрезные круги с наружной режущей кромкой формы 1А1R;
- алмазные отрезные сегментные круги формы 1А1RSS;
- алмазные отрезные круги с внутренней режущей кромкой формы АКВР;
- сверла алмазные кольцевые АКС;
- круги плоские прямого профиля формы 1А1;
- круги плоские прямого профиля без корпуса формы А8;
- круги плоские прямого профиля трехсторонние формы 14U1;

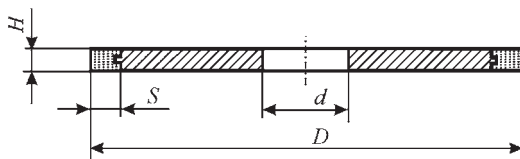
- круги плоские с двусторонним коническим профилем формы 14EE1;
- круги плоские с полукругло-выпуклым профилем формы 1FF1;
- круги плоские с выточкой формы 6A2;
- круги плоские формы 6A2T;
- круги алмазные кольцевые формы 2A2;
- круги чашечные конические формы 12A2 с углом 45°;
- круги плоские с полукругло-вогнутым профилем формы 2F6V и 2FF6V;
- алмазные эластичные диски формы ДО;
- алмазные эластичные круги для обработки экранов кинескопов формы АЭТ;
- алмазные сборные таблеточные инструменты (из алмазных таблеток АТб) для обработки оптических деталей.

#### 14.1. Антифрикционные свойства связок и показатели работоспособности инструментов для обработки стекла

Марка связки	Антифрикционные свойства связок		Показатели работоспособности	
	Коэффициент трения	Относительная износостойкость	Производительность шлифования $Q \cdot 10^7$ , м <sup>3</sup> /с	Удельный расход алмаза, кг/м <sup>3</sup>
М6-14	0,26	0,75	1,05	0,048
М1-04	0,28	1,12	1,30	0,058
М6-15	0,33	0,60	0,93	0,068
М2-01	0,34	1,00	0,75	0,073
М1-05	0,42	0,38	0,83	0,200

#### 14.2. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТЕКЛА

При изготовлении деталей различного назначения и конструктивного исполнения (автомобильное стекло, зеркальное стекло,



**Рис. 14.1.** Алмазный круг с наружной режущей кромкой формы 1A1R:

$H$  — ширина;  $S$  — толщина алмазного слоя;  $D$  — наружный диаметр;  $d$  — диаметр посадочного отверстия

стеклянные трубы, химическая посуда, блоки оптического стекла и оптические детали и т.д.) значительное место занимает операция резки, которая может выполняться как вручную при помощи алмазного стеклореза, так и на специальных отрезных станках при помощи алмазных отрезных кругов (рис. 14.1).

Особенности ручной резки стекла стеклорезом, состоящим из корпуса и алмазного резца (в виде четырехгранной пирамиды или с криволинейной режущей кромкой), заключаются в том, что процесс резания должен осуществляться при вертикальной установке резца при скорости его перемещения 0,3...0,4 м/с и величине силы прижима порядка 10 Н.

Резка полуфабрикатов для получения заготовок, а также резка кускового стекла и разделка кусков резанием осуществляются при помощи отрезных кругов диаметром от 50 до 500 мм с прямоугольным и трапецеидальным профилями рабочей поверхности. Толщина режущей части отрезных кругов в зависимости от диаметра и вида профиля составляет 0,15...2,44 мм. Характеристики алмазного слоя кругов (порошки синтетического алмаза АС6, АС15, АС32, АС50, зернистость 100/80...160/125, 400/315 и 500/400, относительная концентрация 25...100, связка М2-01, М1-03) выбираются в зависимости от вида разрезаемого материала, его размеров и требований к качеству поверхности пропила. При установке отрезного круга на шпиндель станка его радиальное биение не должно превышать 0,04 мм (для диаметра до 100 мм), 0,05 мм (для диаметра до 400 мм) и 0,10 мм (для диаметра 450 и 500 мм), а торцевое биение регламентируется в зависимости от высоты круга и точности (нормальной или повышенной) и может составлять величину от 0,03 до 0,25 мм. При «засаливании» рабочей поверхности круга следует

проводить его правку, обычно шлифованием брусками из карбида кремния. В качестве СОТС при резке алмазными кругами используются эмульсии на основе стандартных эмульсолов при обязательном обеспечении условия обильного поступления жидкости в зону обработки. Наиболее употребительные режимы резки: скорость резания 25...35 м/с, скорость продольной подачи 100...630 мм/мин в зависимости от вида разрезаемого материала и характеристики инструмента. В отдельных случаях, например при резке утолщенного технического стекла (15...20 мм) кругами диаметром 400 мм с порошками природного (А1) или синтетического (АС6, АС15) алмаза зернистостью 400/315, рекомендуется использование скоростей резания 55...60 м/с и подачи 0,2...0,7 м/мин при расходе СОТС не менее 30 л/мин.

Для получения отверстий в деталях из стекла и вырезания круглых заготовок из пластин применяют алмазные сверла диаметром от 0,5 до 450 мм. Используются кристалльные (кристалл алмаза, запаянный в корпус), стержневые (цилиндрический алмазонасный слой, закрепленный на хвостовике), трубчатые (алмазная кольцевая коронка на цилиндрическом корпусе) и сегментные кольцевые алмазные сверла. Наибольшее распространение при сверлении стекла получили трубчатые алмазные сверла. Эти инструменты обеспечивают съем обрабатываемого материала только на кольцевом участке, что позволяет снизить осевую нагрузку на инструмент и улучшить условия подачи СОТС в зону резания, а значит, дают высокую производительность и качество обработки.

Для изготовления стержневых сверл используют алмазные порошки марки АСН зернистостью 28/20...60/40 (метод гальваностегии) и марок АС15...АС32 зернистостью от 50/40...100/80 (метод порошковой металлургии). Для изготовления кольцевых коронок применяют алмазные порошки АС6...АС32 с относительной концентрацией алмазов 75 %. Сегменты для сверл большого диаметра изготавливают на связке М2-01 из алмаза АС32 зернистостью 400/315 при относительной концентрации 75 %. Режимы алмазного сверления стекла выбирают в зависимости от типа, размеров и характеристики сверла, физико-механических свойств обрабатываемого материала (коэффициента обрабатываемости, микротвердости) и требований, предъявляемых к шероховатости обработанной поверхности. Рекомендуемые значения механической подачи при

сверлении назначают с учетом коэффициента обрабатываемости  $K$  и микротвердости обрабатываемого стекла по сравнению со стеклом марки К8 ( $K = 1$ ). Частота вращения сверла может быть от 500 до 24 000 мин<sup>-1</sup>, а величина подачи от 10 до 60 мм/мин. В качестве СОТС при алмазном сверлении используется техническая вода, различные водные растворы эмульсолов Э2, Э3, «Эмус». Расход СОТС устанавливается в зависимости от диаметра сверла (от 1 л/мин для сверл диаметром менее 5 мм до 15 л/мин для сверл большого диаметра).

В тех случаях, когда из кускового стекла изготавливают круглые заготовки линз или обрабатывают цилиндрические боковые поверхности стержней оптических квантовых генераторов (ОКГ), исполнительные поверхности цилиндрических линз и других изделий, а также внутренние цилиндрические поверхности, на операции круглого шлифования в качестве инструмента применяют алмазные круги плоского профиля формы 1А1 диаметрами от 50 до 280 мм на металлической связке. Круглое внутреннее шлифование применяется для обработки внутренних цилиндрических поверхностей отверстий больших диаметров после сверления или расточки. При изготовлении оптических деталей этот процесс можно использовать для массовой обработки отверстий лимбов и изделий с достаточно большими точными отверстиями. Для внутреннего шлифования применяют алмазные круги формы 1А1 небольших размеров, а для обработки отверстий относительно малых диаметров (не менее 10 мм) — круги формы А8.

При обработке заготовок оптических деталей плоское шлифование выполняется торцом алмазного круга. Для этой цели используют алмазные круги на металлической связке стандартных форм.

При необходимости применения инструмента диаметром более 280 мм пользуются сборными алмазными кругами, рабочая поверхность которых состоит из отдельных алмазных элементов в виде сегментов, таблеток и т.п., закрепленных на корпусе инструмента.

Получение плоских базовых поверхностей у прессованных заготовок из стекла возможно с применением операции шлифования по методу «жестких осей», что обеспечивает производительную обработку больших партий деталей. При обработке точных поверхностей оптических деталей по методу притира используют сборные алмазные шлифовальные круги.

Эффективность работы алмазного инструмента определяется интенсивностью съема обрабатываемого материала и износостойкостью алмазосодержащего слоя и может изменяться в зависимости от его характеристики, состава, конструкции, режимов процесса обработки, качества алмазного порошка и свойств обрабатываемого материала. Для оценки работоспособности алмазного инструмента при обработке стекла определяют величины, характеризующие его производительность и износостойкость, а также эффективность использования алмазного порошка.

Производительность работы алмазного инструмента характеризуется количеством материала, удаляемого за единицу времени (интенсивностью съема обрабатываемого материала), и измеряется в граммах в минуту или кубических сантиметрах в минуту.

В отдельных случаях при выполнении операций, осуществляемых определенным видом инструмента, производительность его работы может выражаться и в других величинах, косвенно характеризующих количество материала, удаляемого в единицу времени. Так, при алмазной резке стекла в качестве единиц производительности принято пользоваться величинами площади распила в единицу времени. При сверлении производительность процесса врезания определяется скоростью врезания в сантиметрах в минуту. В условиях массового производства при обработке одних и тех же изделий инструментом определенного типоразмера производительность его работы определяют количеством изделий, обрабатываемых в единицу времени. Во всех приведенных случаях можно перейти к выражению производительности в массовых или объемных единицах.

Стойкость алмазного инструмента зависит непосредственно от износостойкости алмазосодержащего слоя и свойств обрабатываемого материала и определяется количеством удаленного материала, приходящимся на единицу массы израсходованного алмазного порошка. Выражается стойкость в единицах массы или объема обрабатываемого материала на единицу массы алмазного порошка. Для практических целей при обработке изделий из различных марок стекла более удобно пользоваться величиной, обратной стойкости, — удельным расходом алмазного порошка.

Удельный расход алмазного порошка определяется массой алмазного порошка, который израсходован на удаление единицы

массы или объема обрабатываемого материала, может быть массовым или объемным. При обработке оптических материалов принято выражать удельный расход алмазного порошка в каратах на кубический дециметр. При резке и сверлении удельный расход алмазного порошка выражается, соответственно, в каратах на квадратный метр площади распила и в каратах на сантиметр длины или глубины отверстия. Нормы удельного расхода обычно относятся к оптическому стеклу марки К8.

В некоторых случаях в качестве критерия для оценки эффективности использования алмазного порошка применяется величина, называемая коэффициентом шлифования. Коэффициент шлифования представляет собой отношение объема сошлифованного материала к объему израсходованного алмазоносного слоя  $k = W_m/W_a$ . Для инструментов с одинаковой концентрацией алмазного порошка по величине этого коэффициента можно судить об эффективности его использования. При сравнении инструментов с различными концентрациями алмазного порошка целесообразно пользоваться показателем удельного расхода, так как при этом определяется расход непосредственно алмазных зерен на единицу снятого материала независимо от характеристики инструмента.

При обработке оптического стекла удельный расход алмаза принято выражать в каратах на кубический дециметр снятого материала. Испытания алмазного инструмента для обработки оптического стекла, как правило, проводят на образцах или изделиях из стекла марки К8. К стеклу этой марки относятся также нормы удельного расхода алмазного порошка при выполнении различных операций обработки. Поэтому для перехода от удельного расхода, отнесенного к стеклу марки К8, к расходу при обработке стекла другой марки, необходимо учитывать твердость его по сошлифовыванию или другой показатель обрабатываемости относительно стекла К8.

При торцевом шлифовании обрабатываемая деталь вращается на нижнем шпинделе, а алмазный инструмент — на верхнем, и перемещается при осевой подаче. Соотношения между скоростями вращения изделия и инструмента, а также величиной подачи определяют величину съема стекла в единицу времени.

В зависимости от скорости вращения изделия при постоянных значениях скорости вращения инструмента и величины осевой подачи возможны следующие варианты.



При *малой* скорости вращения изделия, т.е. когда за один его оборот снимается слой сравнительно большой толщины, основную работу разрушения стекла совершают зерна, находящиеся на боковой цилиндрической поверхности алмазосносного слоя, площадь которого достаточно велика. Алмазные зерна, работающие по торцевой поверхности изделия, по существу, совершают ее зачистку. При таком врезании алмазный инструмент и стекло сильно нагреваются, процесс часто сопровождается появлением искр. При нагреве могут происходить сгорание алмазного порошка, размягчение стекла и расплавление связки в поверхностных слоях, заполнение этими веществами промежутков между зернами, «затупление» зерен алмазного порошка и, в результате — «засаливание» инструмента и потеря стабильности процесса диспергирования стекла.

При *средней* скорости вращения изделия контакт между зернами и стеклом на боковой поверхности инструмента уже значительно меньше, и зерна, расположенные на его торцевой части, несут более значительную нагрузку, чем в предыдущем случае. Условия работы зерен несколько улучшаются, но все еще имеют место явления, перечисленные выше, хотя и в меньшей степени.

При *большой* скорости вращения изделия основную работу диспергирования совершают алмазные зерна, находящиеся на торцевой части инструмента. Между поверхностями стекла и связки инструмента образуется зазор, поэтому продукты износа беспрепятственно отводятся, интенсивно охлаждается и смазывается зона контакта, связка изнашивается в основном в результате абразивного воздействия на нее частиц диспергированного стекла. Благодаря этому создаются благоприятные условия самозатачивания инструмента, режущие свойства зерен алмазного порошка используются наиболее эффективно. Такой процесс можно назвать свободным резанием, потому что непосредственный контакт со стеклом имеют только зерна алмазного порошка, которые при этом работают как маленькие резцы.

Сравнивая рассмотренные схемы врезания зерен алмазного порошка и износа связки инструмента, можно прийти к выводу, что оптимальные условия работы инструмента возникают при режиме свободного резания. Для обеспечения такого режима нужно установить требуемое значение величины глубины резания при работе

инструментов с различным по зернистости и концентрации алмазного порошка алмазоносным слоем. Для этого необходимо знать площадь контакта рабочей поверхности инструмента, количество зерен алмазного порошка на площади контакта, величину выступающих частей зерен, объем, занимаемый ими на площади контакта и объем снятого стекла в пределах площади контакта. Площадь контакта алмазоносного слоя с изделием зависит от формы и размеров инструмента. Максимальная величина выступающих частей зерен алмазного порошка, в соответствии с данными различных авторов, составляет в среднем 0,3 характерного размера зерна.

Закономерность любого вида абразивной обработки, заключается в том, что с увеличением зернистости свободного или связанного порошка растет интенсивность съема материала и увеличивается степень шероховатости обработанной поверхности. Для алмазного инструмента эта зависимость объясняется тем, что с увеличением размера закрепленного в связке алмазного зерна соответственно возрастает величина его выступающей части, и благодаря этому происходит более интенсивное разрушение обрабатываемого материала, проявляющееся в повышении производительности съема и увеличении разрушенного и рельефного слоев шлифованной поверхности.

При обработке стекла, с увеличением концентрации алмазного порошка вследствие увеличения количества работающих зерен, снижаются величина составляющих сил резания, сила трения, температура в зоне шлифования и линейный износ рабочей поверхности инструмента. Уменьшение износа способствует снижению удельного расхода алмазного порошка. Для кругов из алмазного порошка малых и крупных зернистостей, а также низких и высоких концентраций наблюдаются различные закономерности влияния изменения величины концентрации на производительность съема материала и глубину микронеровностей обработанной поверхности. При обработке мелкозернистыми кругами (с размером алмазных зерен до 50 мкм) любой относительной концентрации, а также кругами из алмазных зерен любых зернистостей при относительной концентрации до 50, с увеличением концентрации производительность съема материала растет и увеличивается шероховатость обработанной поверхности. При зернистостях алмазного порошка свыше 50 мкм и относительной концентрации более 50, с увеличением concentra-

ции уменьшаются производительность съема материала и степень шероховатости обработанной поверхности.

Особое место среди инструментов для алмазной обработки стекла занимают инструменты для ТАШ и СТАШ точных поверхностей оптических деталей. К инструментам такого типа предъявляют очень жесткие требования по точности геометрической формы и размерной стойкости. Интенсивность износа рабочего слоя инструмента и характер его износа по круговым зонам оценивают по изменению коэффициента заполнения, который характеризует плотность заполнения алмазоносным слоем поверхности инструмента в каждой ее круговой зоне. За коэффициент заполнения принята величина, показывающая протяженность алмазоносного слоя на поверхности инструмента по concentрическим окружностям разных радиусов и определяемая по формуле

$$k_i = \frac{l_{ac}}{2\pi r}, \quad (14.1)$$

где  $l_{ac}$  — протяженность алмазоносного слоя инструмента на окружности радиуса  $r$ .

Интегральный коэффициент заполнения  $K_i$ , показывающий общую протяженность алмазоносного слоя в радиальном направлении инструмента в долях  $(R - r_0)$ , определяется по формуле

$$K_i = \frac{1}{(R - r_0)} \int_{r_0}^R k_i(r) dr, \quad (14.2)$$

где  $R$  — радиус инструмента;  $r_0$  — радиус центрального отверстия инструмента;  $k_i$  — коэффициент заполнения.

Характер износа алмазоносного слоя инструмента оценивается коэффициентом равномерности износа  $\sigma$ , определяемым по формуле

$$\sigma = \left| 1 - \frac{v(r_0)}{v(R)} \right|, \quad (14.3)$$

где  $v(r_0)$  и  $v(R)$  — интенсивности износа алмазоносного слоя в центре инструмента и на его краю соответственно.

Данный коэффициент имеет смысл только в том случае, когда зависимости интенсивности износа алмазоносного слоя инструмента от радиусов его круговых зон  $r$  являются монотонными функциями. Чем

меньше величина этого коэффициента, тем равномернее в процессе обработки плоских поверхностей оптических деталей изнашивается алмазосный слой инструмента (при равномерном износе  $\sigma = 0$ ).

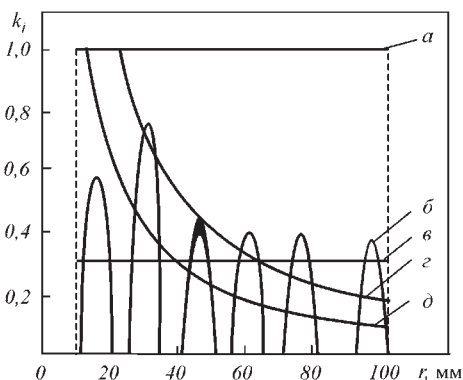
Конструкция и характеристика алмазосного слоя инструмента в значительной степени влияют на его работоспособность при плоском шлифовании оптических деталей из стекла, в частности, на величину и характер его износа, что является главной особенностью процессов прецизионного формообразования поверхностей оптических деталей инструментом из синтетических алмазов.

Качественная оценка износостойкости алмазного инструмента с различными конструкциями алмазосного слоя осуществляется путем анализа кривых распределения коэффициентов заполнения  $k_i$  по радиусу круговых зон  $r$  (рис. 14.2). Скорость износа алмазосного слоя в центре инструмента будет самой высокой у инструмента с алмазосным слоем, выполненным в виде спирали Архимеда, а самой низкой — у инструмента со сплошным слоем.

В отличие от сферического инструмента, наиболее высокую размерную стойкость которого можно достигнуть при уменьшении значения коэффициента заполнения по мере приближения к центру инструмента, у плоского инструмента максимальная износостойкость достигается в том случае, когда коэффициент заполнения уменьшается по мере удаления от центра инструмента. На основе этого можно заключить, что наиболее износостойкими бу-

**Рис. 14.2.** Кривые распределения коэффициентов заполнения  $k_i$  по радиусам круговых зон инструмента  $r$  с различной конструкцией алмазосного слоя:

сплошной слой (*a*), слой в виде спирали Архимеда (*б*), логарифмической спирали (*в*), в виде лучей, исходящих из центра инструмента (*д*), состоящий из дискретно расположенных алмазных таблеток (*б*) с их расположением по косинусоиду в полярной системе координат или в точках пересечения астроида с концентрическими окружностями



дут сплошной инструмент и инструменты, алмазонасные слои которых выполнены в виде логарифмической спирали и в виде лучей, исходящих из центра инструмента.

Инструменты со сплошным алмазонасным слоем и слоем, выполненным в виде архимедовой спирали, с постоянным в направлении от центра к краю инструмента коэффициентом заполнения, будут изнашиваться в процессе работы наиболее неравномерно (в центре инструмента — больше, на краю — меньше), что в конечном итоге приведет к снижению размерной стойкости и износостойкости инструмента. Износостойкость инструмента с алмазонасным слоем, выполненным в виде архимедовой спирали, можно существенно повысить, увеличивая ширину алмазонасного слоя и уменьшая шаг спирали.

Интегральный коэффициент заполнения характеризует общую протяженность алмазонасного слоя инструмента в его радиальном направлении, а значит, и величину площади алмазонасного слоя на рабочей поверхности инструмента. В связи с этим, величина износа алмазонасного слоя инструмента тем меньше, чем больше интегральный коэффициент заполнения.

Для обеспечения равномерного износа алмазонасного слоя инструмента необходимо, чтобы коэффициент заполнения в зависимости от радиуса изменялся по закону

$$k_i = \frac{\text{const}}{r |(\omega_2 - \omega_1)r + \omega_1 l|},$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  — угловые скорости вращения обрабатываемой детали и инструмента;  $l$  — расстояние между центрами инструмента и детали.

Наиболее близкими к вышеприведенной зависимости распределениями коэффициента заполнения характеризуются инструменты с алмазонасным слоем, выполненным в виде логарифмической спирали и в виде лучей, исходящих из центра инструмента (см. рис. 14.2). Инструменты с такой конструкцией алмазонасного слоя изнашиваются в процессе шлифования наиболее равномерно.

Более равномерного износа алмазонасного слоя инструмента можно достичь и путем изменения концентрации алмазных зерен. Можно рассчитать необходимую концентрацию алмазного порошка для расположенных в различных круговых зонах элементов. Однако необходимость применения элементов с целой гаммой кон-

центраций алмазного порошка для обеспечения равномерного износа инструмента обуславливает разработку и производство неоправданно большого количества алмазных таблеток с различной концентрацией алмазного порошка, усложняет технологию изготовления инструмента и увеличивает его стоимость. В связи с этим обеспечение равномерности износа инструмента путем изменения концентрации алмазного порошка вдоль его радиуса является нецелесообразным.

Размерная стойкость инструмента характеризуется периодом его работы между правками. В процессе шлифования поверхность алмазоносного слоя инструмента изменяет свою первоначально плоскую форму, срабатывается, образуя выпуклую («бугор») или вогнутую («яма») поверхность, что исправляется периодической правкой его рабочей поверхности. Износостойкость инструмента в таких условиях целесообразно оценивать по интенсивности износа алмазоносного слоя в зоне, величина износа в которой максимальна, так как именно эта максимальная интенсивность износа алмазоносного слоя определяет число необходимых правок за время работы инструмента и, соответственно, его размерную стойкость. На рис. 14.3 приведена экспериментальная зависимость максимальной интенсивности износа алмазоносного слоя инструмента от величины его интегрального коэффициента заполнения. С увеличением интегрального коэффициента заполнения поверхности инструмента алмазоносным слоем интенсивность его износа

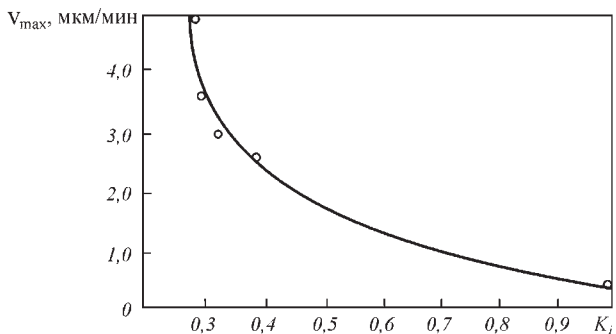


Рис. 14.3. Зависимость максимальной интенсивности износа алмазоносного слоя инструмента от величины интегрального коэффициента заполнения

уменьшается. Полученную зависимость можно аппроксимировать следующей эмпирической формулой:

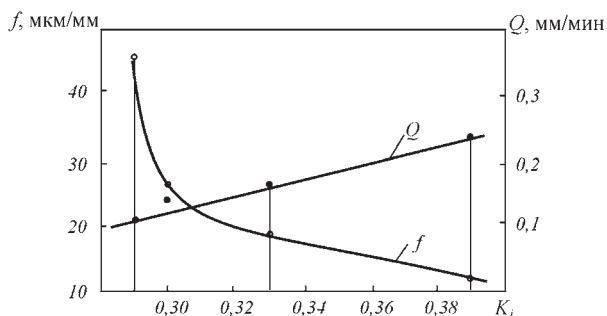
$$v_{\max} = \frac{a}{(K_i - B)}, \quad (14.4)$$

где  $a$  и  $B$  — численные коэффициенты, значения которых зависят от условий обработки, зернистости алмазов в инструменте и т.п.

По этой формуле при известной величине интегрального коэффициента заполнения  $K_i$  рассчитывается максимальная интенсивность износа алмазоносного слоя и определяется износостойкость инструмента. Для различных конструкций алмазоносного слоя инструмента, зная величину интегрального коэффициента заполнения, без проведения экспериментальных исследований по формуле (14.4) можно прогнозировать его износостойкость. С другой стороны, задаваясь необходимой величиной износостойкости инструмента, вычисляют величину интегрального коэффициента заполнения, которую можно обеспечить при помощи выбора определенной конструкции алмазоносного слоя, что весьма важно при разработке новых видов инструмента.

Исследование влияния конструкции алмазоносного слоя инструмента на его производительность позволило найти экспериментальную зависимость производительности шлифования  $Q$  от величины интегрального коэффициента заполнения  $K_i$ , (рис. 14.4), которая и представляет собой линейную функцию, т.е. производительность шлифования плоской поверхности оптической детали алмазным инструментом пропорциональна величине его интегрального коэффициента заполнения.

Оценка величины коэффициента относительного износа при алмазном шлифовании плоских поверхностей оптических деталей из стекла инструментами с различной конструкцией алмазоносного слоя позволяет сделать вывод о том, что между величиной коэффициентов относительного износа инструментов и величиной их интегральных коэффициентов заполнения существует обратно-пропорциональная зависимость (см. рис. 14.4). Отсюда следует, что инструменты с алмазоносным слоем, выполненным в виде логарифмической спирали, обладают наибольшей производительностью шлифования при минимальной величине коэффициента относительного износа.



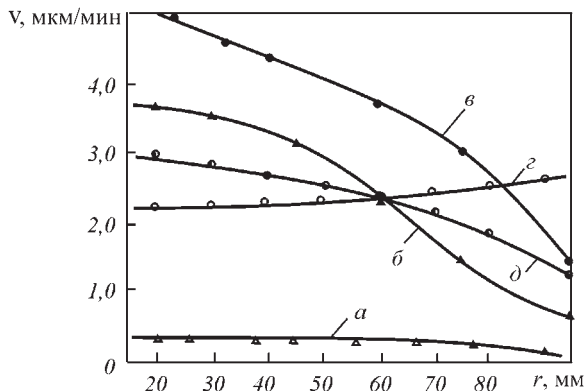
**Рис. 14.4.** Зависимость производительности алмазного шлифования ( $Q$ ) и коэффициента относительного износа ( $f$ ) от величины интегрального коэффициента заполнения

На рис. 14.5 приведены экспериментальные данные определения интенсивности износа алмазоносного слоя инструментов с различной конструкцией по круговым зонам радиуса  $r$ . Анализ приведенных зависимостей показывает, что инструменты с алмазоносным слоем, выполненным в виде логарифмической спирали, срабатываются в процессе работы на «бугор», инструменты же с другой конструкцией алмазоносного слоя срабатываются на «яму». Коэффициенты равномерности износа  $\sigma$  для различных конструкций алмазоносного слоя инструментов составляют 2,0 (рис. 14.4, *a*); 3,6 (*b*); 1,5 (*в*); 0,14 (*г*); 1,0 (*д*). Применение коэффициентов равномерности износа для оценки характера износа инструментов в данном случае правомерно, поскольку зависимости интенсивности износа инструментов от их радиуса  $r$  являются монотонными.

Минимальным значением коэффициента равномерности износа  $\sigma = 0,14$  обладают инструменты с алмазоносным слоем, выполненным в виде логарифмической спирали.

Таблеточные инструменты в процессе работы изнашиваются неравномерно, интенсивность износа в центре больше, чем на краю. Расположение таблеток на поверхности инструмента по концентрическим окружностям приводит к неравномерному износу алмазоносного слоя и не может быть рекомендовано для процесса плоского шлифования оптических деталей из стекла.





**Рис. 14.5. Зависимость интенсивности износа алмазного слоя инструментов с различной конструкцией от радиуса круговых зон  $r$ :**

сплошной слой ( $a$ ), слой в виде спирали Архимеда ( $в$ ), логарифмической спирали ( $z$ ), в виде лучей, исходящих из центра инструмента ( $д$ ), состоящий из дискретно расположенных алмазных таблеток ( $б$ ) с их расположением по косинусоиде в полярной системе координат или в точках пересечения астронд с концентрическими окружностями

Сплошные инструменты и инструменты с алмазоносным слоем, выполненным в виде спирали Архимеда, коэффициент заполнения которых по всей поверхности одинаков, также не обеспечивают равномерного износа, а значит, и высокой точности формы обрабатываемых поверхностей оптических деталей.

Несколько равномернее (интенсивность износа алмазоносного слоя в центре инструмента и на краю отличаются в 2 раза) в процессе плоского шлифования изнашиваются инструменты, алмазоносный слой которых выполнен в виде лучей, исходящих из центра.

Наиболее равномерно в процессе шлифования изнашиваются инструменты с алмазоносным слоем, выполненным в виде логарифмической спирали.

Стабильная работоспособность алмазного инструмента существенно зависит от характеристики его алмазоносного слоя — размера алмазного зерна и концентрации алмазного порошка, твердости связки и т.п. Производительность шлифования, износ алмазоносно-

го слоя инструмента, шероховатость обработанной поверхности изменяются также в зависимости от продолжительности обработки и определяются режимами работы инструмента («самозатачивания» или «засаливания»).

Свойства связки алмазного инструмента определяют производительность шлифования и стабильность его работы. На диаграмме (рис. 14.6) указаны численные значения производительности шлифования плоских поверхностей оптических деталей из стекла инструментами на различных связках. Из диаграммы следует, что наименьшей производительностью шлифования обладает инструмент на связке M17-01. Инструменты на металлических связках M17-08, M015, а также производимые фирмами Dama и Rodenschток (Германия), показывают при испытаниях приблизительно одинаковые результаты. Отклонения значений производительности шлифования этими инструментами сравнимы с погрешностями их определения.

Существенной является зависимость производительности алмазного шлифования оптических деталей из стекла от продолжительности процесса обработки. На рис. 14.7 представлена зависимость  $Q/Q_0$  ( $Q_0$  — производительность шлифования за первый цикл обработки) от продолжительности обработки для инстру-

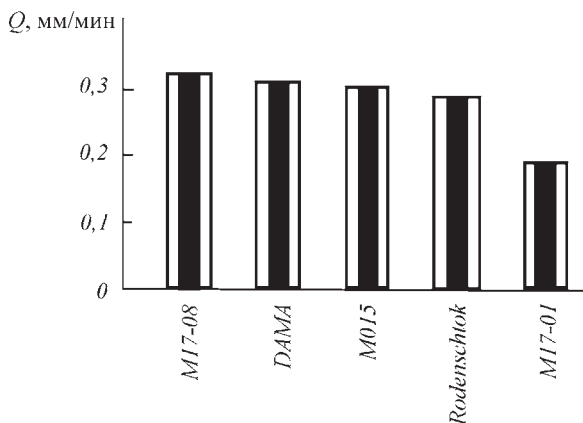
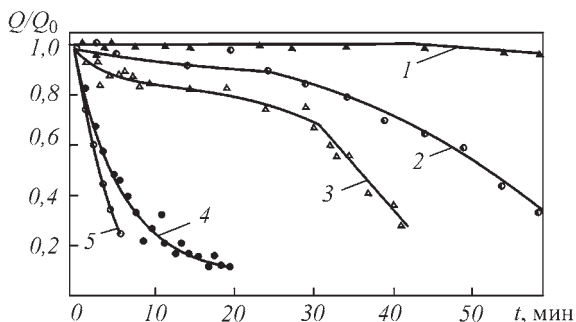


Рис. 14.6. Производительность шлифования оптических деталей из стекла инструментами на различных связках



**Рис. 14.7. Зависимость производительности алмазного шлифования от продолжительности обработки для инструментов на различных связках:**

1 — M17-08; 2 — Лой; 3 — Rodenschtok; 4 — Dama; 5 — M015

ментов на различных связках. Производительность алмазного шлифования различна для инструментов на разных связках и уменьшается с увеличением его продолжительности. Качественно оценивая работоспособность инструментов с точки зрения потери производительности при плоском шлифовании стекла («засаливания»), следует отметить, что инструменты на металлических связках, обладая значительной величиной производительности шлифования за первый цикл обработки, довольно быстро теряют свои режущие свойства.

Зависимость производительности алмазного шлифования оптических деталей из стекла от продолжительности процесса обработки выражается экспоненциальной функцией, а работоспособность инструмента оценивается коэффициентом засаливания, представляющим собой производную производительности шлифования по времени. Однако, как следует из рис. 14.7, введенный таким образом коэффициент засаливания зависит от времени обработки. В связи с этим для оценки работоспособности инструмента пользуются величиной времени засаливания  $\tau$  (времени, в течение которого производительность шлифования уменьшается в  $e$  (основание натуральных логарифмов) раз).

Обычно строят зависимости производительности процесса шлифования  $Q$  от его продолжительности  $t$  в полулогарифмическом масштабе, из которых и определяется величина  $\tau$ .

Уменьшение производительности шлифования с увеличением продолжительности обработки для инструментов с различной характеристикой алмазоносного слоя описывается уравнением

$$Q(t) = nQ_0 \exp(-\xi t), \quad (14.5)$$

где  $n$  и  $\xi$  — постоянные коэффициенты.

Шероховатость поверхностей оптических деталей, обработанных инструментами на различных связках, оценивается высотными параметрами микропрофиля, которые в случае использования алмазных порошков одинаковой зернистости (20/14) составляют:  $Ra$  0,25...0,28,  $R_{max}$  1,25...1,63.

При алмазной обработке оптических деталей, в частности, при ТАШ и СТАШ прецизионных поверхностей, огромное влияние на работоспособность инструмента и точность формообразования обрабатываемых поверхностей оказывают режимные и кинематические параметры процесса обработки. При неправильной настройке оборудования по указанным параметрам никакая оптимизация конструкции и характеристики рабочего слоя алмазного инструмента не обеспечивают возможности обработки поверхности деталей точной оптики с требованиями «по цвету».

В зависимости от вида деталей из стекла, их назначения и операции механической обработки (резки, сверления, шлифования, полирования и др.) используется оборудование, которое можно условно разделить на две группы:

— металлообрабатывающие станки, при помощи которых выполняются некоторые общие операции предварительной или черновой обработки заготовок;

— специальные станки для специфических операций технологического цикла изготовления деталей из стекла.

К первой группе относятся плоскошлифовальные (ЗБ-756, МШ-155 и др.), фрезерные (типа 6Р-80, ВФ-87 и др.), круглошлифовальные (ЗВ-110, ЗБ-161 и др.), универсальные (ЭВ-12, ЗБ-153 и др.) и сверлильные (2Н-125, 2431 и др.) станки.

К специальным станкам для алмазной обработки оптических деталей из стекла относятся: распиловочные (ПК-200, ПК-400, К-8611, К-8618, РС-8607, для резки кругами с внутренней режущей кромкой — мод. 2405), круглошлифовальные (БШС-10), плоскошлифовальные и сферошлифовальные для шлифования (типа Алмаз,

АЛ, ПШ, АШС-40, АШС-100, СТША, типов LP и PLM фирмы Loh (Германия), JSM фирмы CMV (Франция)), центрировочные (ЦС, АЦС, FOM-2 фирмы Dama (Германия)), фасетировочные и станки особого назначения.

Для обработки посуды из хрустального, цветного и бесцветного стекла применяют ограночные станки типа САГ и ШАГ-1, ШАГ-2, автоматы РМ-3В, DSA5N и UPS17 (Германия), для шлифования края тонкостенных изделий — полуавтоматы Ш-1, Ш-2, Ш-3, а также станки мод. АШК, СА5М. Для обработки кромок автомобильного и зеркального стекла используют конвейерные линии мод. ЛОК-6, для получения фасета — линии КФ-8, для сверления отверстий — станки мод. Э24, для вырезки круглых изделий — станок мод. ОС-4882.

### **14.3. ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРИРОДНОГО И ИСКУССТВЕННОГО КАМНЯ**

Эффективность финишной обработки архитектурных форм из строительного камня и декоративно-художественных изделий из полудрагоценного природного и искусственного камня определяется производительностью процесса обработки и износостойкостью инструмента при выполнении требований, предъявляемых к шероховатости и отражательной способности обработанных поверхностей. Главной задачей при ТАШ, СТАШ и полировании изделий из природного и искусственного камня (ПИК) является достижение высокого качества обработанных поверхностей, которое зависит от условий контакта поверхностей рабочего слоя инструмента и обрабатываемой детали. В процессе обработки рабочий слой инструмента, как правило, изнашивается неравномерно, его форма изменяется, что приводит к ухудшению точности формообразования обрабатываемой поверхности и снижению качества ее обработки. В связи с этим обеспечение равномерности износа рабочего слоя инструмента представляется актуальной задачей, которая может быть решена двумя путями. Первый из них связан с использованием оптимальной конструкции рабочего слоя инструмента для конкретной схемы обработки, а второй — с использованием оптимальных режимных и кинематических параметров настройки оборудования для конкретных конструкций рабочего слоя инструмента.

При обработке изделий из ПИК произвольных размеров и формы, в зависимости от режимов и кинематической схемы обработки, обеспечение постоянства формы рабочей поверхности инструмента может быть достигнуто за счет конструкции рабочего слоя, выполненной согласно расчетным значениям коэффициента заполнения. На точность формообразования поверхностей наибольшее влияние оказывают характер износа рабочего слоя инструмента и режимные и кинематические параметры процессов ТАШ, СТАШ и полирования. При работе инструмента условия обработки на различных участках его рабочего слоя существенным образом отличаются. Неравномерный износ вдоль образующей профиля инструмента, различные распределение и величина нагрузки обуславливают неравномерный износ круговых зон и, соответственно, потерю точности профиля изготовленных изделий и качества обработанных поверхностей. При создании высокоэффективного инструмента для финишной обработки поверхностей необходимо исходить из условия обеспечения постоянства формы его рабочего слоя. Инструмент должен сохранять необходимую форму до полного износа, чего можно добиться, применяя эластичные связки, которые за счет силы прижима к обрабатываемой поверхности дают возможность компенсировать лишь незначительные погрешности формы инструмента, или обеспечивая различное заполнение его поверхности рабочим слоем.

Скорость износа рабочего слоя инструмента в зависимости от радиуса  $r$  круговых зон выражается уравнением

$$v(r) = \frac{k_1 p_a(r)L(r)}{k_i(r)}, \quad (14.6)$$

где  $k_1$  — коэффициент пропорциональности;  $p_a$  — распределение давления прижима инструмента к обрабатываемой поверхности;  $L(r)$  — путь трения.

При обработке плоских поверхностей, исходя из требования равномерности износа рабочего слоя инструмента  $v(r) = \text{const}$ , его конструкция должна быть выполнена в соответствии с коэффициентом заполнения

$$k_i(r) = \frac{p_a(r)L(r)}{\text{const}}. \quad (14.7)$$

При обработке сферических поверхностей для обеспечения постоянства радиуса их кривизны  $R$  в процессе обработки зависимость коэффициента заполнения от радиуса круговых зон должна соответствовать функции

$$k_i(r) = \text{const} \frac{p_a(r)L(r)}{\sqrt{R^2 - r^2}}. \quad (14.8)$$

При финишной обработке поверхностей изделий из ПИК произвольной формы коэффициент заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при котором обеспечивается постоянство его формы, выбирается в соответствии с формулой

$$k_i(y) = \frac{\text{const}Z(y)}{v_N(y)}, \quad (14.9)$$

где  $Z(y)$  — уравнение образующей профиля обрабатываемой поверхности;  $v_N(y)$  — уравнение износа рабочего слоя инструмента при его постоянной форме.

При рациональном выборе конструкции рабочего слоя инструмента, в соответствии с приведенными выше формулами для коэффициента заполнения, обеспечивается постоянство его формы в процессе эксплуатации и исключается операция ее корректирования (правки формы).

Инструмент для финишной обработки плоских поверхностей изделий из камня характеризуется одинаковой интенсивностью износа периферийной и центральной части рабочего слоя. Коэффициент заполнения инструмента рабочим слоем по круговым зонам радиуса  $r$  описывается возрастающей кривой. При выполнении рабочего слоя в виде отдельных элементов, зафиксированных в полимерной массе, дополнительно обеспечивается улучшение технологии изготовления инструмента и защита элементов от скалывания в процессе обработки. Рабочие элементы (шлифовальные и полировальные таблетки) изготавливаются из алмазных и полировальных порошков и связующего полиэтилентерефталата (ПЭТФ).

Использование в качестве связующего ПЭТФ делает возможным значительное уменьшение количества абразива в массе, за счет чего уменьшается вероятность образования конгломератов абразивных зерен, из-за которых возникают отдельные глубокие цара-

пины на обрабатываемой поверхности в процессе обработки. Вследствие этого достигается высокое качество обработанных поверхностей. Полиэтилентерефталат хорошо смачивает абразивные зерна, в том числе алмазные микропорошки, что определяет высокую прочность массы (предел прочности на изгиб не менее 100 МПа). Это, в свою очередь, позволяет значительно интенсифицировать процесс обработки за счет повышения давления прижима инструмента к обрабатываемой детали (до 0,5 МПа). В качестве материала корпуса инструмента — полимерной массы для операции шлифования целесообразно использовать полиэтилен высокого давления марки ВД 15803-020 (ГОСТ 16337-77), а для операции полирования — кабельный пластикат И40-13А (ГОСТ 5960-72). Рабочий слой в виде отдельных элементов, зафиксированных в полимерной массе, имеет вид изогнутых лопастей, ширина которых возрастает от центральных зон к периферии. При использовании инструмента с такой конструкцией рабочего слоя для ТАШ, СТАШ и полирования плоских поверхностей изделий из природного и искусственного камня — габбро, гранита, базальта, мрамора, керамического гранита и поделочных камней, на станках радиально-консольного типа и мостовых шлифовально-полировальных станках, оснащенных феррсами, обеспечивается повышение производительности обработки на 20 % и качества обработанных поверхностей.

Однако износостойкость инструмента и прочность его рабочего слоя все же меньше, чем у инструмента на металлических связках. Для устранения этого недостатка используется армированная абразивная масса. За счет добавления в расплав связующего абразивной массы базальтовых волокон, последние образуют сетку, что является армирующим элементом, наличие которого обуславливает увеличение прочности инструмента и, как следствие, возможность повышения давления прижима инструмента к обрабатываемой детали. Арматура из базальтового волокна позволяет повысить износостойкость инструмента и уменьшает вероятность термической деструкции рабочего слоя инструмента.

В процессе изготовления инструмента при расплавлении органического связующего и смешивании абразивного порошка со связующим, в абразивную массу добавляется базальтовое волокно, диаметр которого зависит от среднего размера зерен абразивного



порошка. При процентном содержании базальтовых волокон в инструменте менее 1 % в процессе обработки происходит его разрушение уже при давлении прижима к обрабатываемой детали 0,15 МПа. При значительном количестве базальтовых волокон (более 5 %) смешать их с расплавом органического связующего, да еще в присутствии абразива, становится очень сложно. Неравномерное распределение волокон в массе инструмента приводит к разрушению инструмента при давлении прижима 0,20...0,25 МПа. При массовой доле базальтовых волокон от 1 до 5 % инструмент сохраняет целостность до давления 0,25 МПа.

В рабочих элементах для шлифования и полирования изделий из ПИК в качестве связующего используются полимерные материалы, в качестве абразивных порошков — алмазные шлиф- и микропорошки, в качестве полировальных порошков — порошки оксидов металлов. Изготавливаются инструменты диаметром 160, 250 и 320 мм. В рабочих элементах диаметром 10 мм и 16 мм используются алмазные порошки с размером зерен: 80/63, 40/28, 20/14, 10/7, 7/5 и полировальные порошки.

Физико-химические свойства полировального инструмента зависят от его компонентов и от характера их взаимодействия в процессе изготовления инструмента. Смачивание полировальных порошков материалом связующего в процессе изготовления полировального инструмента играет важную роль, поскольку их смешивание происходит в расплаве. В качестве полировальных порошков используются оксид алюминия, оксид хрома, суперабразив FR-Remillox (на основе диоксида церия), порошки ультрадисперсных алмазов (УДА). Материал связующего — ПЭТФ, эпоксидная смола ЭД-20, кремний-органическое соединение (КОС).

Работоспособность полировального инструмента оценивалась по производительности полирования, скорость износа инструмента, шероховатости и отражательной способности обработанных поверхностей. Для различных материалов существует полировальный порошок, использование которого в инструменте дает наилучшие результаты. Показатели работоспособности инструментов на основе ПЭТФ, КОС и различных полировальных порошков при обработке изделий из габбро, гранита и розового кварца, керамического гранита и мрамора приведены в табл. 14.2.

### 14.2. Показатели работоспособности инструментов на основе различных полировальных порошков

Полировальный порошок	Обрабатываемый материал	Показатели работоспособности	
		Производительность полирования, мкм/мин	Скорость износа инструмента, мкм/мин
<i>Связующее — ПЭТФ</i>			
Оксид алюминия	Габбро	0,26	2,0
Оксид хрома	Гранит	0,15	1,8
FR-Remilox	Кварц	0,16	1,7
<i>Связующее — КОС</i>			
Оксид алюминия	Керамический гранит	0,26	2,4
Порошок УДА	Мрамор	0,28	2,1

Из приведенных в таблице данных следует, что для изготовления полировального инструмента наиболее целесообразно использовать порошки оксида алюминия, УДА и порошки на основе диоксида церия в зависимости от вида обрабатываемого камня.

Инструменты для финишной обработки изделий из камня разработаны применительно к оборудованию, традиционно используемому в камнеобрабатывающей промышленности. Станки радиально-консольного типа, мостовые шлифовально-полировальные станки, оснащенные феррсами, автоматические линии и шлифовально-полировальные станки типа ШП, охватывают практически весь станочный парк, задействованный для обработки изделий из природного и искусственного камня на финишных операциях. Поэтому традиционные технологии финишной обработки изделий из камня с разработкой и внедрением в производство инструментов с новыми конструкциями и характеристиками рабочего слоя изменились, в основном, в части технологии изготовления самого инструмента, схем подачи и расхода СОТС, а также режимных и кинематических параметров, при которых осуществляется процесс.

Для оценки качества обработанных поверхностей используются методы рефлектометрии и профилометрии. Коэффициенты отражения света  $K$  поверхностей изделий из природного и искусственного камня и высотные параметры шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$  и  $R_{\max}$ , достигаемые при их обработке, характеризуются величинами:  $K = 8...15 \%$ ;  $Ra 0,25...0,01$ ;  $Rz 0,45...0,15$ ;  $R_{\max} = 1,3...0,2$  мкм.

## Глава 15

# ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ, ГОРНЫЕ И БУРОВЫЕ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

### 15.1. КОМПОЗИЦИОННЫЕ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И МЕТОДЫ ИХ СПЕКАНИЯ

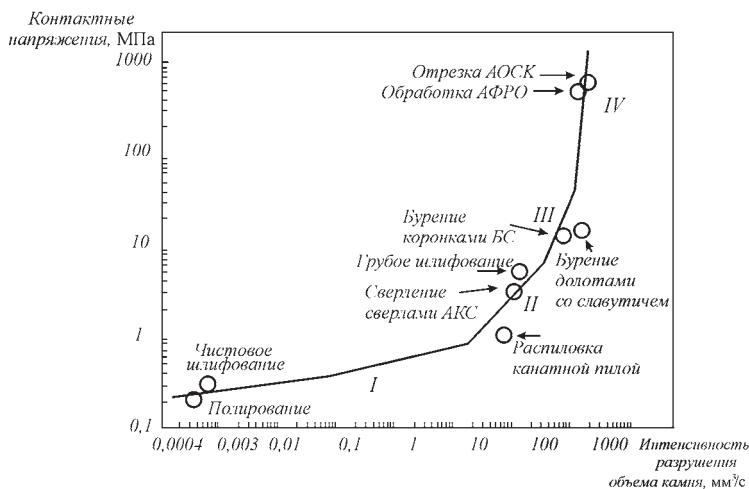
Алмазные буровые долота, оснащенные функциональными элементами (вставками) из композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ), воздействуют на забой распределенным давлением в диапазоне от 20 до 500 МПа при температурах до 600...800 °С. Обеспечить функциональные характеристики материалов рабочих элементов этих инструментов в столь экстремальных термомеханических условиях эксплуатации могут только композиты на основе природных или высокопрочных синтетических алмазов на связках из твердых сплавов. Композиты этого класса, в частности славутич и твесал, спекаются методом горячего прессования в графитовых пресс-формах при температурах 1400 °С и более в течение 10...20 мин. Однако спекание композита при этих температурах при атмосферном давлении сопровождается графитизацией алмаза ( $T \geq 1000$  °С) и их разупрочнением. Для защиты алмаза от окисления и графитизации требуется защитная атмосфера. Поэтому при подготовке алмазно-твердосплавной шихты для изготовления изделий из славутича и твесала предложен способ, заключающийся в предварительной грануляции зерен алмаза в оболочки из порошковой смеси твердых сплавов, их холодное брикетирование в стальных пресс-формах с последующим горячим прессованием в графитовых пресс-формах, которые в процессе спекания окисляются, обеспечивая спекаемому изделию необходимую защитную атмосферу СО–СО<sub>2</sub>. При этом предпосылки для графитизации алмаза практически сокращены до минимума.

Предварительная грануляция порошков алмаза и их упаковка при засыпке в пресс-форму обеспечивает после прессования распределение алмаза в объеме изделия, близкое к однородному, и, следовательно, равномерную интенсивность изнашивания рабочего элемента в условиях контактного трения по абразивной горной породе.

При изготовлении практически всех типов алмазных инструментов соблюдаются определенные условия формирования структуры композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) для достижения необходимого качества, удовлетворяющего эксплуатационные требования. Основными среди них являются недопущение графитизации и минимизация разупрочнения алмаза, однородность их распределения в объеме, и наконец, алмазоудержание, которое обеспечивается в первую очередь адгезионным взаимодействием алмаза с материалом связки. Первые три условия обеспечиваются известными технологическими приемами, в частности, использованием специальных способов спекания алмазосодержащих композитов, низкотемпературных связок; формирование адгезионной связи алмаза со связкой обеспечивается нанесением покрытий из карбидообразующих металлов на поверхность алмаза, которые хорошо смачиваются металлами используемых связок или введением в связки карбидообразующих добавок, образующих промежуточный слой, обуславливающий взаимодействие алмаза со связкой.

Процессы алмазной обработки горных пород можно условно подразделить на 4 категории (рис. 15.1), отличающиеся по уровням контактных давлений и интенсивности разрушения обрабатываемой породы: I — полирование и чистовое шлифование; II — шлифование, сверление и канатная резка; III — бурение; IV — дисковое резание. Приведенная диаграмма интегрально определяет термомеханические условия контактного взаимодействия алмазного инструмента с обрабатываемым материалом и позволяет обоснованно выбрать марку алмаза необходимой прочности, его зернистость и объемную концентрацию в инструменте, соответствующую данным условиям связку и технологию спекания инструментального композита.

Если для спекания композиционного алмазосодержащего материала на основе твердосплавных связок традиционно применяется метод горячего прессования в графитовых пресс-формах, то для композитов на металлических связках применяются методы ваку-

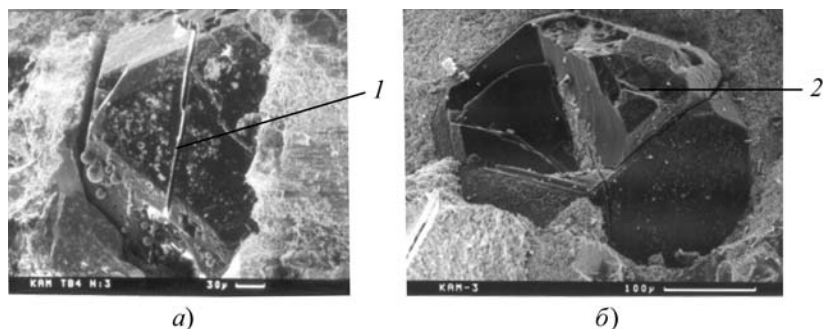


**Рис. 15.1.** Уровни нагруженности инструментов и соответствующие им интенсивности разрушения породы различными типами породоразрушающих инструментов, оснащенных композиционными алмазосодержащими материалами:

АОСК — алмазный отрезной сегментированный круг; АФРО — алмазный фасонный ролик обдирочный; сверло АКС — алмазное кольцевое сверло; коронка БС — коронка буровая синтетическая

умного спекания, инфильтрации, либо изотермического спекания с допрессовкой. Спекание алмазных композиций в зависимости от применяемых металлических связок и происходит при температурах 800...1150 °С.

Указанным температурам отвечает существенное снижение прочности зерен алмаза, степень которого зависит от уровня и продолжительности температурного воздействия, типа используемого в ростовой системе сплава-растворителя, обуславливающего возникновение растягивающих остаточных напряжений в зернах алмаза, которые приводят при определенных условиях к их растрескиванию (рис. 15.2). Кроме этого, при всех неоспоримых достоинствах КАМ, они обладают относительно низкой прочностью (в 3—4 раза), меньшей по сравнению с матричным твердым сплавом, что обусловлено не только концентрацией напряжений, создаваемыми присутствием зерен алмаза в связке и растягивающими остаточными температурными напряжениями в связке, но и

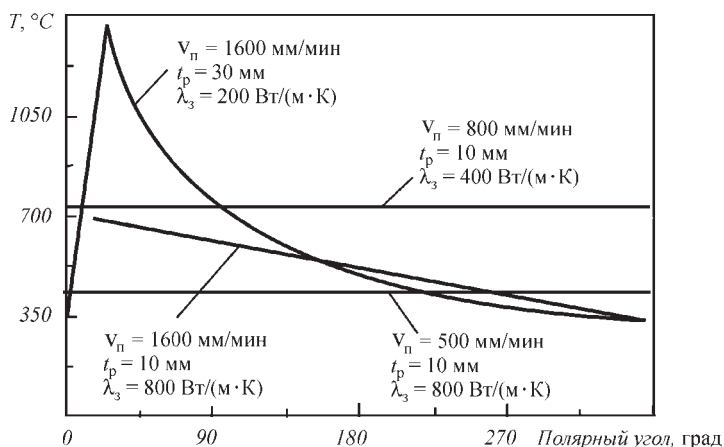


**Рис. 15.2.** Характерные виды растрескивания зерен алмаза (1) в результате действия внутренних температурных напряжений с фрагментами металла-растворителя на поверхности зерна (а) либо на поверхности плоскости (б) скола (2)

образовавшимися в процессе спекания композита трещинами в зернах алмаза, а также отсутствием адгезии по границам раздела фаз. Решение проблемы минимизации высокотемпературного разупрочнения алмаза при спекании композитов рассматриваемого класса и обеспечение адгезионной связи между алмазом и связкой достигается посредством нанесения вакуум-плазменным методом карбидообразующих покрытий на поверхности зерен алмаза либо введением добавок на основе  $\text{CrB}_2$  и  $\text{W}_2\text{B}_5$  непосредственно в шихту матричного твердого сплава.

Контактное взаимодействие алмазного инструмента с обрабатываемой деталью происходит с интенсивным тепловыделением. Расчетные оценки показали, что температура может достигать  $800 \dots 1100$  °C и более (рис. 15.3), а интенсивность нагрева за цикл пребывания инструмента в зоне резания достигает  $9 \cdot 10^4$  град/с. Под воздействием высокой температуры в алмазе накапливаются необратимые повреждения, связанные с микрорастрескиванием или графитизацией тех его объемов, в которых, в соответствии с распределением поля высоких температур в зоне микрорезания (см. рис. 15.3), возможно протекание фазового превращения алмаза в графит.

Таким образом, выбор марки алмаза для камнеобрабатывающего инструмента обусловлен, в первую очередь, способностью противостоять негативному влиянию температурного фактора и, тем самым, сохранять целостность зерен алмаза, обеспечивая работо-



**Рис. 15.3.** Влияние коэффициента теплопроводности материала сегментов  $\lambda_3$ , скорости подачи  $v_n$  и глубины резания  $t_p$  гранита алмазным кругом (с охлаждением и без охлаждения) на изменение температуры на поверхности сегмента за период оборота круга

способность инструмента в процессе обработки. Для такого инструмента целесообразно использовать порошки синтетического алмаза марок AC100...AC160 либо зарубежного производства SDA 45...SDA100S, MBS 70...MSD. Все марки алмаза, применяемые в камнеобрабатывающих инструментах, должны отвечать, в первую очередь, требованию по уровню термостойкости, определяющему его способность сохранять прочность после воздействия высокой температуры заданной продолжительности.

Подавляющее большинство инструментов для камнеобработки производят на основе металлических связок (за исключением полировальных инструментов, в которых функциональные элементы выполнены на полимерных связках с температурами полимеризации значительно ниже температур проявления негативного влияния теплового фактора на прочностные свойства алмаза). Металлические связки для камнеобрабатывающих инструментов должны обладать такими свойствами, как: смачивание алмаза; относительно невысокая температура спекания; высокие прочность, твердость, теплопроводность и износостойкость.



Применение алмазных инструментов для обработки высокоабразивных сред обусловило необходимость введения дополнительно в состав связок различных твердых дисперсных протекторов, таких как порошки карбидов бора, вольфрама или титана, релита, оксида алюминия и других, повышающих в конечном итоге сопротивление связок абразивному износу. Но главным критерием при выборе связки для камнеобрабатывающего инструмента является принцип равенства интенсивности износа алмаза и связки, теоретически и экспериментально обосновывающий требуемый уровень твердости и износостойкости связки в каждом конкретном случае. Это условие является определяющим в выборе соответствующего технологического способа и параметров режима спекания композита в целом.

Условия взаимодействия в системе алмаз—связка также имеют большое значение в обеспечении качества композиционных алмазосодержащих материалов. Хорошее алмазодержание определяет не только надежный отвод теплового потока, проходящего через зерно алмаза из зоны контактного взаимодействия в связку, но и степень использования алмаза, т.е. меру эффективности его использования вплоть до механического удаления оставшейся части зерна из связки в процессе работы инструмента. Это качество достигается не только подбором соответствующих компонентов связки, обеспечивающих ее взаимодействие с алмазом, но и за счет использования специальных покрытий, наносимых различными способами на поверхность алмаза. При формировании покрытий предпочтение отдается карбидообразующим металлам.

Традиционно спекание композиционных алмазосодержащих материалов проводится методами порошковой металлургии. Одним из наиболее распространенных среди них является метод горячего прессования либо его модификации, к которым можно отнести и интенсивное электроспекание (рис. 15.4). Принципиальной особенностью этих методов является длительное изотермическое спекание (20...40 мин).

Для спекания износостойких функциональных элементов буровых и породоразрушающих инструментов (рис. 15.5) на основе порошков природного алмаза и твердосплавных связок (славутич — рис. 15.6, *a*) или синтетических алмазов с аналогичными связками (твесал — рис. 15.6, *б*) применяется метод горячего прессования в графитовых пресс-формах либо метод инфильтрации, а для композитов на металличе-



Рис. 15.4. Функциональная связь между приложенным давлением и длительностью процесса спекания

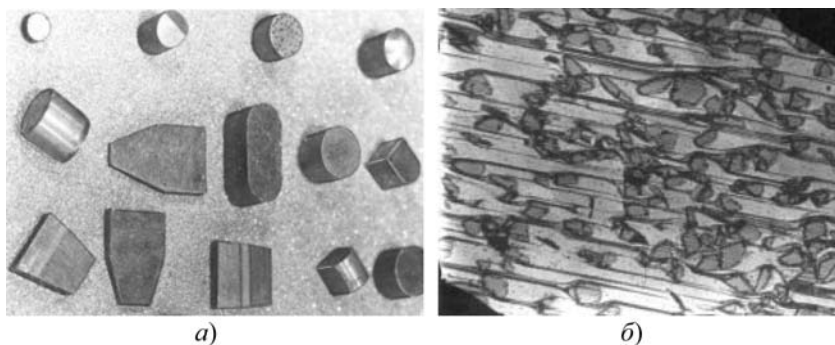
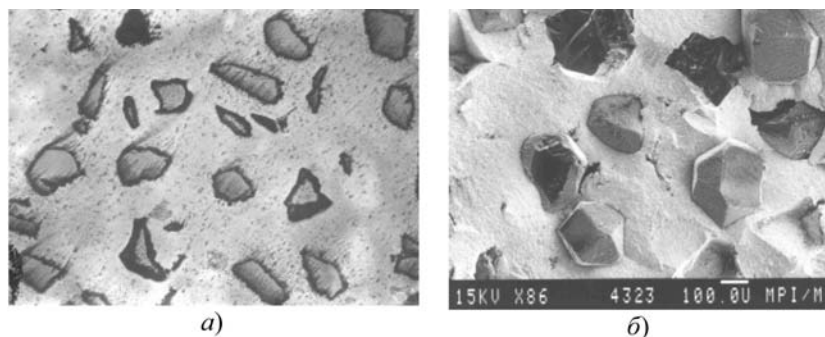


Рис. 15.5. Основные типоразмеры функциональных элементов для породоразрушающих инструментов, выполненных из износостойкого композиционного алмазосодержащего материала марки славутич (а), и характерный вид износа рабочей поверхности инструмента (б)

ских связках для породоразрушающих инструментов — способы горячего прессования и электроспекания. Как следует из рис. 15.4, для

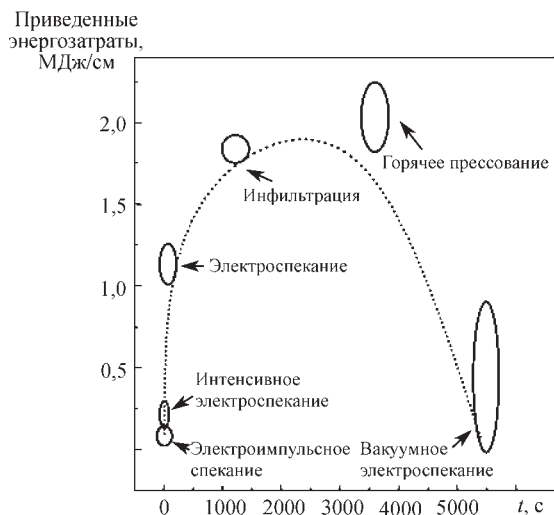


**Рис. 15.6.** Структура изломов образцов композиционных алмазосодержащих материалов марок славутич (а) и твесал (б)

упомянутых технологических методов характерно пребывание алмаза в условиях высокотемпературного воздействия (в защитной атмосфере или без таковой) на протяжении десятков минут, что приводит к частичной или полной деградации его свойств. Происходит ухудшение физико-механических характеристик функциональных элементов и инструмента в целом. Все перечисленные технологические аспекты (в силу неразрывности функциональных связей между параметрами процесса спекания композита и сформированной структурой) отражаются и на изменении его физико-механических свойств, в частности характеристик прочности.

Разработка альтернативных технологий спекания алмазосодержащих композитов направлена либо на сокращение времени спекания за счет увеличения давления вплоть до 15...20 ГПа в ударных волнах, генерируемых энергией взрыва (см. рис. 15.4), либо на уменьшение удельных энергозатрат (рис. 15.7), реализуемых методами инфильтрации или спекания в условиях вакуума. Все отмеченные технологии имеют как позитивные, так и негативные стороны относительно функциональных свойств композиционных алмазосодержащих материалов, и поэтому их эффективность следует оценивать индивидуально в каждом конкретном случае практического применения.

Композиционные алмазосодержащие материалы, в отличие от множества известных в современном материаловедении композиционных материалов, содержащих стохастически распределенные в объеме твердые дисперсные частицы, обладают рядом отличии-



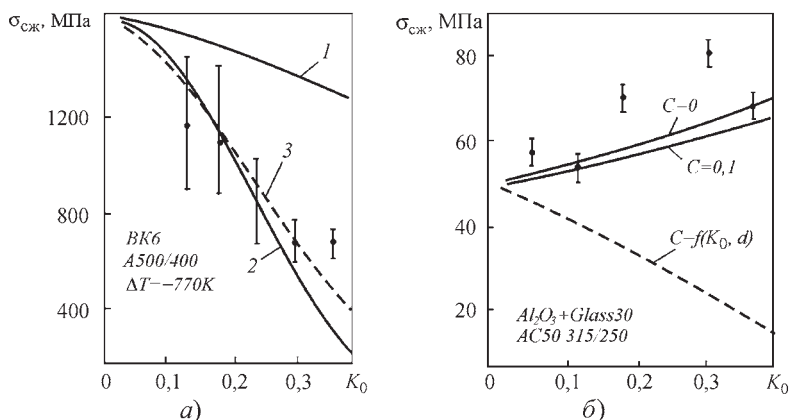
**Рис. 15.7.** Приведенные энергозатраты и длительность процессов спекания композиционных алмазосодержащих материалов различными технологическими способами

тельных качеств. Это связано не столько с их износостойкостью, сколько с зависимостью прочности от уровня остаточных технологических напряжений, обусловленных несоответствием термоупругости компонентов и повреждениями структуры композита в процессе его спекания. Последние обусловлены нарушением сплошности алмазов, а также, в ряде случаев, отсутствием адгезионной связи по границам раздела фаз. Именно из-за перечисленных особенностей затруднена возможность расчетной оценки величин их упругих свойств, теплопроводности и прочности на основе существующих теорий упругого или упругопластического деформирования, ибо расчетные результаты радикально отличались от экспериментальных.

Доминирующим фактором влияния, приводящим к снижению перечисленных характеристик, является степень повреждения зерен алмаза, в частности, их растрескивание по плоскости спайности  $\langle 111 \rangle$  (см. рис. 15.2). На основании теории упругости стохастически неоднородного твердого тела и с использованием принципа самосогласованного поля разработана модель деформирования и

предельного состояния композиционного алмазосодержащего материала, с учетом которой получены зависимости изменения упругих и прочностных свойств композиционного алмазосодержащего материала в зависимости от относительной концентрации алмаза  $K_0$ , уровней остаточных технологических напряжений и степени повреждения алмаза  $C = f(K_0, d) \geq 0$  (рис. 15.8).

Для спекания композиционного алмазосодержащего материала при максимальном сохранении исходных свойств алмаза и обеспечении необходимой твердости связки используют динамическое и электроимпульсное спекание, технологии, базирующиеся на использовании энергии ударных волн, генерируемых взрывом, а также различные способы электроспекания, в том числе интенсивного электроспекания под давлением (см. рис. 15.4). Применение этих способов спекания приводит к желаемым результатам относительно свойств алмаза в спеченных композитах, но первые из названных реализуются посредством громоздкого и технически сложного оборудования, чем принципиально отличаются от последнего спо-



**Рис. 15.8. Влияние объемной концентрации  $K_0$  и степени повреждения зерен алмазов  $C$  на прочность при сжатии композиционных алмазосодержащих материалов с твердосплавной (а) и стеклоподобной (б) связками:**

$1$  — результаты расчета без учета остаточных температурных напряжений;  $2$  — результаты расчета с учетом остаточных температурных напряжений;  $3$  — экспериментальные данные;  $d$  — приведенный размер алмазов;  $\Delta T = T_{ком} - T_{крист}$ , где  $T_{ком}$  — комнатная температура;  $T_{крист}$  — температура кристаллизации металла связки

соба, простого и производительного. Горячее прессование композита реализуется по известному принципу резисторного нагрева посредством пропускания тока через спекаемый брикет, т.е. практически так же, как и электроспекание, но при больших силе тока и внешнем приложенном давлении (до 0,5 ГПа), чем в упомянутых альтернативных способах (см. рис. 15.4). Эти отличительные черты позволяют многократно сократить продолжительность процесса спекания и практически предотвратить разупрочнение алмаза, что было проверено неоднократно на алмазе, рекуперированном из спеченных изделий (рис. 15.9).

Кинематические параметры процесса резания (величина контактного давления, скорость перемещения трущихся поверхностей) оказывают непосредственное влияние на изменение температуры в зоне взаимодействия и изнашивание камнеобрабатывающего инструмента.

Используя отмеченные выше результаты, предложена модель термоупругого состояния дисковой алмазной пилы, позволяющая учитывать условия охлаждения инструмента, а также за счет вращающихся граничных условий учитывать скорость подачи  $v_p$  и глубину резания  $t$ . Установлено изменение температуры в точке на внешнем радиусе диска за весь период цикла его оборота (см. рис. 15.2), а также

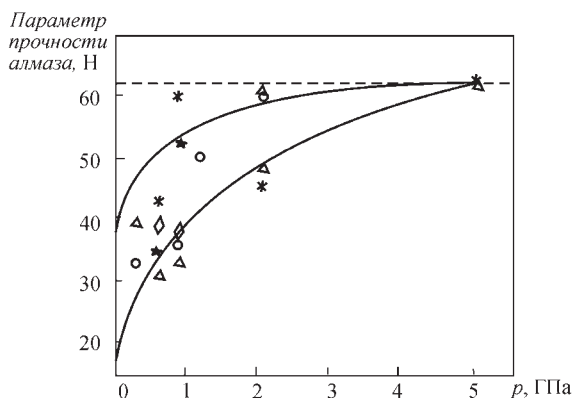
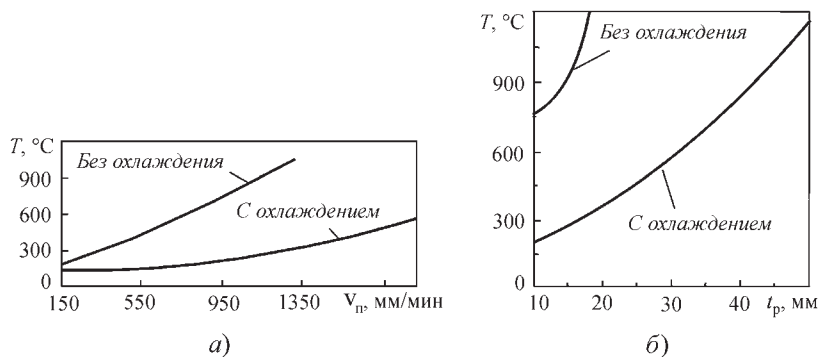


Рис. 15.9. Влияние величины давления при спекании композиционного алмазосодержащего материала на прочность рекуперированных из них зерен алмаза АС80 400/315:



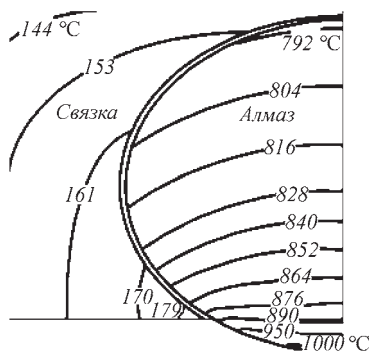
**Рис. 15.10.** Влияние предельных значений скорости подачи  $v_n$  и глубины резания  $t_p$  гранита алмазным кругом на изменение температуры начала окисления алмаза с учетом условий охлаждения

влияние кинематических параметров процесса резания на изменение максимальной температуры в зоне резания при мокром или сухом резании (рис. 15.10).

Приняв в качестве одного из основных механизмов механохимического износа алмазного круга окисление и графитизацию зерен алмаза в воздушной среде, которые проявляются при температурах свыше 800 и 1000 °С соответственно, установлены пороговые значения дискриминации скорости подачи  $v_n$  и глубины резания  $t$  при различных условиях охлаждения инструмента (см. рис. 15.10). На основании решения задачи теплопроводности о распределении температуры в пределах алмазного сегмента с использованием принципа самосогласованного поля рассчитано поле температур в единичном зерне (рис. 15.11).

Выбор зернистостей (28/20...630/500) и относительной концентрации (30...150 %) алмаза в композитах, используемых в камнеобрабатывающих инструментах, осуществляется на основании критериев, не имеющих отношения к технологии спекания композитов, а обусловленным в большей мере назначением инструментов, т.е. особенностями технологий резания, сверления, шлифования либо чистовых операций, необходимостью регулирования их режущей способности, износостойкостью или требованиями к качеству поверхности обработанных деталей.

**Рис. 15.11. Пример численного определения поля температур в зерне алмаза, закрепленного в сегменте, при резании гранита**



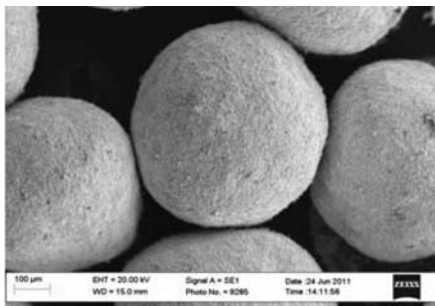
Для закрепления функциональных элементов в корпусах инструментов, помимо традиционной пайки жидкими припоями, широко вошла в производственную практику лазерная сварка, развиваются также электронно-лучевая и контактная сварка, которые позволили значительно повысить кинематические параметры эксплуатации инструментов.

## 15.2. ПРИМЕНЕНИЕ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ГРАНУЛ В МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

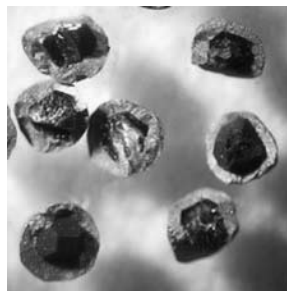
Предварительная грануляция зерен алмаза в оболочки из порошковой смеси твердых сплавов позволяет свести возможность графитизации алмаза при формировании композитов для породоразрушающего инструмента до минимума. При этом толщина оболочки гранулы формируется в зависимости от заданной конечной объемной концентрации алмаза в спекаемом композите.

Спекаются алмазно-твердосплавные гранулы в вакууме (до  $10^{-5}$  Па) или в компрессионной печи под давлением инертного газа (до 5 МПа) и температурах 1150...1320 °С продолжительностью 5...30 мин (рис. 15.12 и 15.13). При этом твердофазная коалесценция твердого сплава происходит по механизму поверхностной диффузии, из чего образуется карбидный каркас. Для структуры твердого сплава оболочки гранулы характерна остаточная пористость 20...40 %, варьируя которой можно изменять прочность, твердость и износостойкость оболочек гранул.





**Рис. 15.12.** Спеченные алмазно-твердосплавные гранулы с зернами алмаза AC160T



**Рис. 15.13.** Вид разрушенных при сжатии гранул с алмазом марки AC160T

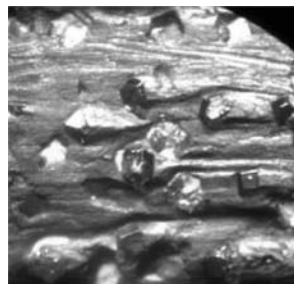
При выборе температурно-временных параметров режима спекания гранул следует руководствоваться критерием минимизации разупрочнения алмазного порошка. Сформированная алмазная гранула является самостоятельным абразивным элементом, имеющим, в отличие от исходного алмаза, более высокую способность к закреплению в любой металлической связке.

Важным этапом в технологии изготовления породоразрушающих инструментов является формирование алмазосодержащих композитов на основе гранул. Спекание функциональных элементов или напекание рабочего слоя, содержащего алмазно-твердосплавные гранулы, на поверхность инструмента возможно осуществлять с использованием методов горячего прессования, вакуумного спекания, инфильтрации или интенсивного электроспекания. Последний метод реализуется при температуре 830...1300 °С за промежуток времени 10...20 с. В спекаемой шихте реализуются условия термоактивируемой пластичности и диффузии, а алмаз в объеме композита после спекания не графитизируется и не разрушается. В качестве связки использовался никель.

Для производства гранул целесообразно использовать твердые сплавы с более высоким содержанием кобальта (например, с массовой долей 15...20 %). При этом твердосплавная оболочка спекается до пористости сплава 20...40 %, что обеспечивает при спекании инфильтрацию жидкой фазы связки в материал оболочек гранул и, тем самым, надежное их закрепление в связке. Спекание композиции реализуется с инфильтрацией жидкой фазы связки в оболочку

гранулы, тогда в процессе абразивного изнашивания гранулы хорошо вскрываются (рис. 15.14) и зерна алмаза надежно удерживаются в рабочем слое режущего элемента.

После спекания зерен алмазы не разрушены, не графитизированы и прочно закреплены в связке. Рабочая поверхность композита за счет выступания режущих зерен алмаза хорошо развита, что дает основание для его применения не только в качестве износостойких покрытий, защищающих стальные корпуса буровых или горных инструментов от абразивного износа, но и в высоконагруженных породоразрушающих элементах.



**Рис. 15.14. Контактная поверхность буровой коронки**

### **15.3. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОТРЕЗКИ, ШЛИФОВКИ, СВЕРЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Алмазные инструменты для камнеобработки в строительстве характеризуются широкой номенклатурой и типоразмерами. Наиболее многочисленными представителями этого класса инструментов являются алмазные отрезные сегментные круги (1A1RSS/C1 и 1A1RSS/C2) и алмазные отрезные круги (1A1R). Дискретные алмазные режущие сегменты или сплошной алмазный слой расположены только на образующей диска (рис. 15.15). Диаметр инструментов 100...5000 мм (табл. 15.1).

Скорость резания варьируется в пределах 20...80 м/с, а контактные давления достигают 600 МПа, производительность — 120...1800 мм<sup>3</sup>/с. На ресурс работы инструмента оказывают большое влияние факторы абразивности, твердости и однородности обрабатываемого материала, а также кинематические режимы резания и условия охлаждения. Рассматриваемая номенклатура режущих алмазных инструментов включает в себя отрезные круги малого размера для ручных инструментов, алмазные фасонные ролики обдирочные (АФРО, рис. 15.16), алмазные полосовые пилы

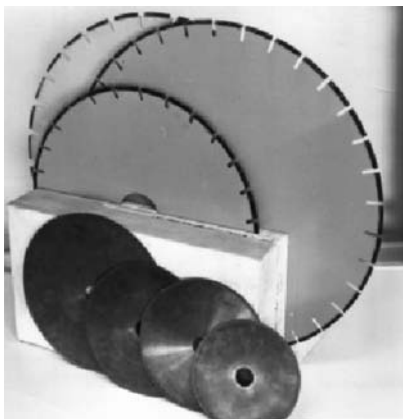
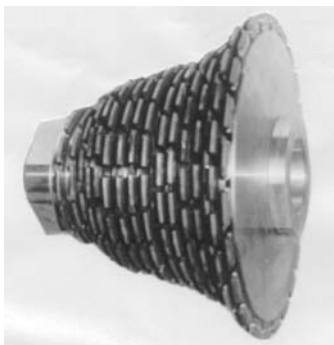


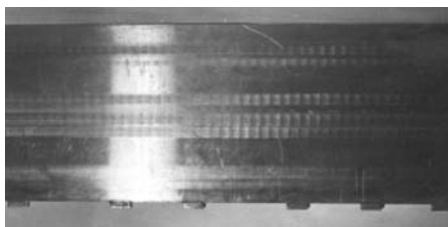
Рис. 15.15. Алмазные отрезные сегментные круги (1A1RSS/C1 и 1A1RSS/C2) и алмазные отрезные круги (1A1R)

### 15.1. Основные типоразмеры, мм, алмазных отрезных сегментных кругов (1A1RSS/C1 и 1A1RSS/C2)

Диаметр круга $D$	Диаметр посадочного отверстия $d$	Ширина режущего алмазного сегмента $H$	Длина сегмента $L$	Число сегментов на круге, шт.
250	32	2,6	24	24, 26
300	50		40	21
315	63	3,0	24	30
320	60			
400	90	3,2	40	24, 27
	80			
410	60	3,6		
500	90	3,8		
630		4,2		36, 44
800		5,5		48, 56
1000		120		6,5
1100	120 (90)	24		
1250		7,0	90	



**Рис. 15.16.** Алмазный фасонный ролик обдирочный (АФРО)



**Рис. 15.17.** Фрагмент полосовой алмазной пилы

(рис. 15.17), алмазные кольцевые сверла (рис. 15.18), а также алмазные канатные пилы (рис. 15.19). Все эти типы инструментов объединяет общая концепция применения дискретных функциональных элементов в виде режущих сегментов различных типоразмеров (табл. 15.2), выполненных из композиционных алмазосодержащих материалов. Названные типы инструментов имеют отличия частного характера (составы применяемых связок, зернистости и марки алмаза) и различаются кинематическими параметрами процессов резания, применительно к каждому конкретному случае приложе-



**Рис. 15.18.** Алмазные кольцевые сверла



**Рис. 15.19.** Алмазные канатные пилы для добычи и размерной обработки камня

ния. К другим типам алмазного инструмента относят калибрующие (фрезы и барабаны) (рис. 15.20), фасонные (рис. 15.21) и шлифовальные (рис. 15.22, табл. 15.3) инструменты.

### 15.2. Основные типоразмеры алмазных сегментов, мм

Радиус сегмента $r$	Длина сегмента $L$	Ширина сегмента $H$	Высота алмазоносного слоя $S$
125	24	2,6	7
157,7		3,0	
160			
200			
250	40	3,8	
315		4,2	
400		5,5	
500		6,5	
550	24		8
625			



Рис. 15.20. Алмазный барабан



Рис. 15.21. Алмазные фасонные ролики



а)



б)

Рис. 15.22. Алмазные шлифовальные и полировальные головки (а), алмазные шлифовальные головки со съёмными дискретными функциональными элементами (б)

### 15.3. Размерные и структурные характеристики шлифовальных инструментов с дискретными функциональными элементами

Типоразмер инструмента	Марка алмаза, зернистость порошка	Основные компоненты связки	Число элементов, шт.
АГШЧ 320	АС50 400/315	Ti	54...60
	АС50 200/160 (160/125)		60
АГШЧ-1 320	АС20 100/80	МЖ, Со	66
	АСМ 40/28 (28/20)		
АГШЧ-2 320	АС20 100/80		94
	АСМ 40/28 (28/20)		
АГШЧ 250	АС50 400/315	Ti	42...48
	АС50 200/160 (160/125)		
АГШЧ-1 250	АС20 100/80	МЖ, Со	48
	АСМ 40/28 (28/20)		

Окончание табл. 15.3

Типоразмер инструмента	Марка алмаза, зернистость порошка	Основные компоненты связки	Число элементов, шт.
АГШЧ-2 250	АС20 100/80	МЖ, Со	82
	АСМ 40/28 (28/20)		
АГШЧ 160	АС50 400/315	Ti	30...33
	АС50 200/160 (160/125)		
АГШЧ-1 160	АС20 100/80	МЖ, Со	36
	АСМ 40/28 (28/20)		
АГШЧ-2 160	АС20 100/80		48
	АСМ 40/28 (28/20)		

Эти инструменты существенно отличаются от рассмотренных ранее не только конструктивно, так как дискретные режущие алмазные сегменты либо алмазосодержащий слой могут располагаться на образующей поверхности тела вращения, на плоских либо фасонных его торцах. В них используется значительно более широкая гамма связок, зернистостей алмаза, их концентраций, но наиболее значимое их отличие в том, что условия контактного взаимодействия этих инструментов с обрабатываемым материалом характеризуются значительно меньшими величинами кинематических и силовых параметров. Окружные скорости при резании камня находятся в пределах 20...25 м/с (по твердым породам) и 35...45 м/с (по мягким породам), при этом контактные давления достигают уровня 0,1...0,5 ГПа, а интенсивность съема объемов породы  $0,5 \cdot 10^3 \dots 1,4 \cdot 10^3 \text{ мм}^3/\text{с}$ .

Еще одним типом инструментов для обработки камня являются алмазные головки полировальные (АГП). Полировка относится к финишным операциям, предполагающим малые производительность ( $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{с}$ ) и контактные давления (0,1...0,2 МПа). К этим инструментам предъявляются высокие требования по одно-

родности зернового состава абразивных наполнителей, которые в процессе эксплуатации противостоят значительным механическим нагрузкам, деформациям и температурам.

Несмотря на существенные различия всех упомянутых типов инструментов по конструкциям, условиям воздействия на породу, кинетическим параметрам режимов резания, свойствам композиционных материалов, из которых сделаны их функциональные элементы, используемым связкам, маркам алмаза и их концентрации, у них есть и общее, заключающееся в едином принципе воздействия на обрабатываемый материал — абразивном воздействии, т.е. локальном микроразрушении породы в результате ее динамического контактного взаимодействия с зерном алмаза либо их системой.

Разработано несколько типов инструментов для формирования глухих отверстий, используемых для невидимого крепления фасадных плит из керамогранита, природного камня, полимерных материалов. Инструменты выпускаются с одним (рис. 15.23, *а*) и двумя



а)



б)



в)

**Рис. 15.23. Алмазные инструменты для формирования глухих крепежных отверстий в фасадных плитах из керамогранита:**

- а* — с одним рабочим элементом;
- б* — с двумя рабочими элементами;
- в* — с рабочими элементами из АТП



рабочими элементами из алмазосодержащего композита, упрочненного методом нанодисперсного модифицирования металлической связи.

Тяжелые фасадные плиты из натурального камня (гранит, базальт и др.) необходимо крепить более жестко, чем керамогранит (рис. 15.23, б). Для этого разработан специальный тип алмазных инструментов с двумя рабочими элементами. Упрочнение связок алмазосодержащего композита для инструмента за счет введения твердых частиц ( $WC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BN$ , микропорошков алмаза и др.) микронного размера имеет ограничение по концентрации из-за необходимости повышения температуры спекания, что нежелательно вследствие частичного разупрочнения алмаза и дополнительного износа технологической оснастки. Создание композитов, дисперсно-упрочненных наночастицами тугоплавких соединений, является перспективным способом увеличения твердости, прочности, ударной вязкости, трещиностойкости металлических и твердосплавных связок, снижения коэффициента трения в зоне резания и увеличения стойкости к абразивному износу в условиях сухого и мокрого резания.

Эффект роста эксплуатационных свойств инструмента при наномодифицировании связан с комплексным положительным эффектом влияния небольших концентраций нанодобавок на проч-

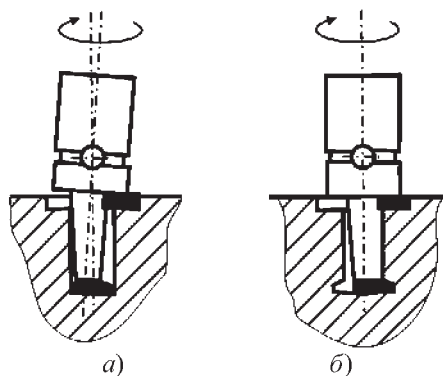


Рис. 15.24. Схема формирования глухих крепежных отверстий в фасадных плитах:

а — этап сверления; б — этап формирования кармана

ность алмазоудержания в связке, рост твердости, прочности и ударной вязкости связки в результате дисперсного упрочнения при введении наночастиц в объем композита, снижение коэффициента трения в зоне резания в результате зернограничного легирования путем введения наночастиц на границы раздела зерен.

Для формирования крепежных отверстий в фасадных плитах из пластиков разработаны специальные инструменты режущего типа, рабочая часть которых оснащена алмазно-твердосплавными пластинами (рис. 15.23, *в*).

На первом этапе, при вертикальном положении инструмента, происходит сверление цилиндрического глухого отверстия, на втором этапе, при повороте инструмента в специальных губках без остановки вращения, происходит формированием кармана для жесткого крепления анкеров (рис. 15.24).

#### **15.4. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Одним из условий эффективного разрушения породы является наличие хорошо развитой зоны предразрушения, которое определяет минимальную энергоемкость разрушения породы за счет отделения крупных ее фракций от забоя и может быть достигнуто, например, за счет формы и взаимного расположения породоразрушающих элементов в корпусе коронки. Размещение в корпусе перфораторной коронки тангенциально расположенных клиновидных элементов в сочетании с радиально расположенными определяет эффективное разрушение наиболее трудноразрушаемой периферийной части скважины. Это позволяет отделять от забоя большие объемы породы и значительно снижает энергоемкость процесса и соответственно увеличивает скорость бурения.

При разрушении прочных горных пород эффективность работы инструмента определяется не только рациональной формой породоразрушающей части, но и его конструкционной прочностью.

Поликристаллические сверхтвердые материалы (алмазно-твердосплавные пластины — АТП) благодаря своим уникальным свойствам (высоким твердости, износостойкости, теплопроводности, трещиностойкости) стали основой для разработки породоразрушающего инструмента нового технического уровня.

Применение алмазно-твердосплавных пластин существенно расширило область применения и производительность бурения. Так резцами, оснащенными АТП, успешно бурят шпуров в породах прочностью до 160 МПа. При этом их износостойкость в сравнении с твердосплавными резцами увеличивается в 60–100 раз при соответственном увеличении скорости бурения в 2–3 раза. К таким инструментам относят шпуровые резцы диаметром 27 и 32 мм, предназначенные для бурения скважин под анкерное крепление горных выработок, резцы диаметром 40 мм для проходки горных выработок буровзрывным способом (рис. 15.25).

Широкое применение АТП получили при вращательном бурении скважин в легких и, частично, в породах средней крепости, в частности, в долотах для дегазации рассеянного метана в угольных пластах (рис. 15.26) и буровых долотах режущего типа ИМ-АП-214,3 МС (рис. 15.27).

Применение долот с АТП при бурении дегазационных буровых скважин позволяет значительно повысить производительность буровой установки, стойкость инструмента и скорость бурения буровых скважин по сравнению с твердосплавными шарошечными долотами. Себестоимость бурения метра скважины такими долотами по горным породам с пределом прочности до 196 МПа и абразивностью до 45 мг в два и более раз меньше в сравнении с твердосплавными долотами.

Для более твердых пород нашли применение инструменты истирающего типа, оснащенные вставками из алмазосодержащего ком-



Рис. 15.25. Резец шпуровой  
РШ-140



Рис. 15.26. Дегазационное  
долото  $\varnothing 121$  мм

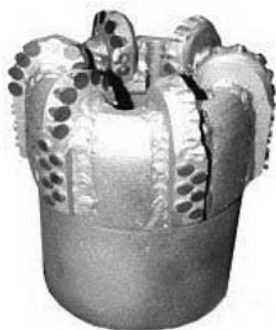


Рис. 15.27. Буровое долото режущего типа ИМ-АП-214,3 МС



Рис. 15.28. Буровое долото ИМ-214,3 Т

позиционного материала славутич, в частности, буровое долото ИМ-214,3Т (рис. 15.28).

В табл. 15.4 приведена классификация применяемых сверхтвердых материалов в породоразрушающих инструментах в зависимости от способа разрушения горных пород и их прочности.

#### 15.4. Композиты на основе СТМ для оснащения породоразрушающего инструмента

Способ разрушения горных пород	Прочность горных пород, МПа	Тип сверхтвердого материала
Вращательное бурение шпуров по прочным горным породам инструментом, оснащенным АТП	90...160	АТП, Stratopax (США)
Вращательное бурение скважин на нефть и газ по слабым и частично средней крепости породам	40...70	
Вращательное бурение скважин на нефть и газ по прочным породам	70...160	Славутич



**Рис. 15.29.** Алмазная буровая коронка БС36



**Рис. 15.30.** Коронка БТ19

К этой же категории инструмента относятся коронки для геологоразведочного бурения на твердые полезные ископаемые, в частности, алмазная буровая коронка БС36 для бурения скважин в абразивных, сильно абразивных монолитных и слаботрещиноватых горных породах VIII...XI категорий буримости (рис. 15.29) и коронка БТ19, оснащенная режцами из АКТМ для бурения скважин в абразивных, сильно абразивных монолитных и слаботрещиноватых горных породах VII...X категорий буримости (рис. 15.30).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бетанели А.И.** Прочность и надежность режущего инструмента. — Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1973. — 304 с.
2. **Богатырева Г.П., Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д.** Алмазные шлиф-порошки мирового уровня качества и современные технологии их изготовления // Инструментальный світ. — 1999. — № 4–5. — С. 24–27.
3. **Виноградов А.А.** Контактные нагрузки на режущих поверхностях // Резание и инструмент. — 1990. — № 44. — С. 124–128.
4. **Девин Л.Н.** Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. — Наукова думка, 1992. — 131 с.
5. **Девин Л.Н., Вильгельм М.** Прогнозирование вероятности разрушения резов на основе КНБ // Сверхтвердые материалы. — 1992. — № 6. — С. 41–46.
6. **Добровольский Г.Г., Дятлов Ю.А.** Точность формы изделий при алмазном микроточении // Сверхтвердые материалы. — 1990. — № 4. — С. 58–62.
7. **Захаренко И.П.** Прогрессивные методы абразивной обработки металлов. — Киев: Наук. думка, 1990.
8. **Иванов Ю.И., Носов Н.В.** Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе. — М.: Машиностроение, 1985. — 88 с.
9. **Клименко С.А., Мельничук Ю.А., Манохин А.С.** Высокопроизводительное чистовое точение деталей из закаленных сталей резцами с цилиндрической передней поверхностью // Инструментальный світ. — 2010. — № 4(48). — С. 7–9.
10. **Коломиец В.В., Полупан Б.И., Химач О.В.** Алмазный инструмент фасонного профиля. — Киев: Наук. думка, 1992. — 175 с.
11. **Лавриненко В.И.** Электрошлифование инструментальных материалов. — Киев: Наук. думка, 1993. — 155 с.
12. **Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов: Справочник /** под ред. Н.В. Новикова / Н.П. Винников, А.И. Грабченко, Э.И. Гриценко. и др. — Киев: Техніка, 1988. — 118 с.
13. **Лоладзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 1980. — 320 с.
14. **Марш Д.** Пластическое течение и разрушение стекла. — Механические свойства новых материалов. — М.: Мир, 1966. — С. 63–79.
15. **Никитин Ю.И.** Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. — Киев: Наук. думка, 1984. — 263 с.

16. **Новиков Н.В., Гурвич Р.А.** Электролитическая обработка инструментами-катодами из поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. — 1988. — № 5. — С. 53–58.
17. **Орап А.А., Стахнив Н.Е., Сохань С.В.** Доводка и полирование прецизионных плоских поверхностей // Станки и инструмент. — 1992. — № 3. — С. 19–21.
18. **Падалка В.И., Богатырева Г.П., Волошин М.Н.** Синтетический ультрадисперсный алмаз — материал XXI века // Инструментальный світ. — 1999. — № 4–5. — С. 39–41.
19. **Поверхностные** свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении / Ю.В. Найдич, В.М. Перевертайло, И.А. Лавриненко и др. — Киев: Наук. думка, 1991. — 280 с.
20. **Полиморфные** модификации углерода и нитрида бора: Справ. / А.В. Курдюмов, В.Г. Малоголове, Н.В. Новиков и др. — М.: Металлургия, 1994. — 318 с.
21. **Рабочие** процессы высоких технологий в машиностроении / под ред. А.И. Грабченко. — Харьков: ХДПУ, 1999. — 436 с.
22. **Сверхтвердые** материалы. Получение и применение: В 6-и т. / под общей ред. Н.В. Новикова. — Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003–2007.
23. **Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г.** Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. — Харьков: Вища школа. Изд-во Харк. ун-та, 1980. — 192 с.
24. **Скальпели** из диоксида циркония  $ZrO_2$ . Электронный ресурс / Режим доступа к материалу: <http://www.ism.kiev.ua/index.php?i=33>.
25. **Соложенко В. Л., Дуб С. Н., Новиков Н. В.** К вопросу о твердости кубического карбонитрида бора // Сверхтвердые материалы. — 2001. — № 4. — С. 73–73.
26. **Технологические** особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов / П.В. Захаренко, В.М. Волкогон, А.В. Бочко и др. — Киев: Наук. думка, 1992. — 188 с.
27. **Точение** износостойких защитных покрытий / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский, П.П. Мельничук. — Киев: Техніка, 1997. — 144 с.
28. **Beck E., Laver W., Steinmetz K.** Rotationserosive Schneidkantenpräparation von SYNDITE PKD // Ibid. — 1992. — 26, N 1. — S. 51–60.
29. **Klimenko S.A., Mukovoz Yu.A., Polonsky L.G.** Ch. 1. Cutting Tools of Superhard Materials // Advanced Ceramics Tool for Machining Application-2 / Edit by I. M. Low and X. S. Li. — Switzerland: Trans Tech Publications, 1996. — P. 1–66.

30. **Müller-Hummel P., Lahres M.** Temperature measurement on diamond-coated tools during machining // *Ind. Diamond Rev.* — 1995. — 55, № 2. — P. 78–83.
31. **Twisted** Inserts for Parting, Turning and Grooving. — Israel: Iscar LTD, 2000. — 12 p.
32. **Spur G., Schunbeck J.** Funkenerosives Trennen polykristalliner Diamantwerkzeuge // *Industrie Diamanten Rdsch.* — 1991. — 25, N 3. — S. 179–185.



Производственно-техническое издание

**Богатырева Галина Павловна  
Бурыкин Виталий Витальевич  
Гаргин Вячеслав Герасимович и др.**

## **ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Под редакцией **Н.В. Новикова** и **С.А. Клименко**

Редактор *Е.М. Нуждина*  
Дизайнер по переплету *Н.А. Свиридова*  
Корректор *М.Я. Барская*  
Инженер по компьютерному  
макетированию *А.Д. Деева*

Сдано в набор 18.07.2013 г. Подписано в печать 16.12.2013 г.  
Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Newton.  
Усл. печ. л. 37,24. Уч.-изд. л. 36,53.

ООО «Издательство Машиностроение»  
107076, Москва, Стромынский пер., 4.  
[www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

Отпечатано способом ролевой струйной печати  
в ОАО «Первая Образцовая типография»  
Филиал «Чеховский Печатный Двор»  
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1