

Библиотека  
конструктора •  
технолога  
радио •  
электронной  
аппаратуры



**М. Махмудов**

# **Механическая обработка печатных плат**

**Издательство «Радио и связь»**



Библиотека  
конструктора  
технолога  
радиоэлектронной  
аппаратуры

**М. Махмудов**

# **Механическая обработка печатных плат**



Москва  
«Радио и связь»  
1986



Scan AAW

ББК 32.844

М 36

УДК 621.3.049.75.002.2:621.9.041

**Махмудов М.**

**М 36** Механическая обработка печатных плат. — М.: Радио и связь, 1986. — 72 с.: ил. — (Б-ка конструктора-технолога радиоэлектронной аппаратуры).

Приведены результаты экспериментального исследования важнейших операций технологического процесса механической обработки печатных плат. Изложен выбор метода механической обработки печатных плат в зависимости от различных условий. Подробно рассмотрены вопросы, связанные с научно обоснованным выбором режимов резания, конструкций инструментов и созданием комплекса оборудования для механической обработки печатных плат. Приведены особенности изготовления печатных плат при автоматической сборке радиоэлементов. Рассмотрены вопросы стандартизации типовых технологических процессов механической обработки печатных плат.

Для инженерно-технических работников, занимающихся производством печатных плат.

**М**  $\frac{2401000000-149}{046(01)-86}$  64-86

**ББК 32.844**

Рецензенты: канд. техн. наук А. В. Балыков,  
канд. техн. наук С. А. Шапиро

**Редакция литературы по конструированию  
и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры**

Производственное издание

**МАРАТ МАХМУДОВ**

**МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Заведующий редакцией П. И. Никонов

Редактор Н. К. Калинин

Художественный редактор Н. С. Шейн

Технический редактор И. Л. Ткаченко

Корректор Т. П. Хускова

**ИБ № 1022**

Сдано в набор 24.12.85

Подписано в печать 07.04.86

Т-09240 Формат 60×90/16 Бумага тип. № 1 Гарнитура литературная Печать высокая

Усл. печ. л. 4,5 Усл. кр.-отт. 4,75 Уч.-изд. л. 5,01 Тираж 10 000 экз. Изд. № 20888

Зак. № 147 Цена 25 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Московская типография № 5 ВГО «Союзучетиздат»  
101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

© Издательство «Радио и связь», 1986

## Предисловие

Печатные платы, являющиеся основным средством соединения элементов в аппаратуре, находят применение во всех классах РЭА: от переносной аппаратуры бытового назначения до сложных вычислительных систем и комплексов управления. В последние годы производство плат развивалось настолько быстрыми темпами, что сейчас оно превратилось практически в самостоятельную отрасль промышленности.

В современном производстве для механической обработки печатных плат используют сложные автоматические линии. Однако трудоемкость механической обработки печатных плат в отдельных случаях достигает 30—35% трудоемкости их изготовления в целом. В этих случаях важное значение имеет научно обоснованный выбор способа механической обработки, рациональной конструкции инструмента, режимов резания, оснастки, штампов и специального технологического оборудования.

В данной книге автор приводит результаты экспериментальных исследований способов механической обработки печатных плат и анализирует характер деформации обрабатываемого материала. Это позволило дать конкретные рекомендации по механической обработке печатных плат. Автор участвовал в создании ряда государственных стандартов, а также нормативно-технических документов, которые стали основой для разработки и формирования конкретных технологических процессов механической обработки печатных плат на предприятиях различных отраслей.

## **Глава первая**

### **КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

#### **1.1. Основные методы изготовления печатных плат и способы их механической обработки**

Производство печатных плат (ПП) — сложный процесс, включающий большое число самых разнообразных видов обработки: фотохимической, химикогальванической, механической и др. В известной мере из-за этого созданы многочисленные способы изготовления ПП. В нашей стране Государственным стандартом (ГОСТ 24322—80. Платы печатные. Требования к последовательности выполнения типовых технологических процессов) изготовление ПП ограничено тремя методами. Указанный стандарт устанавливает также требования к последовательности выполнения типовых технологических процессов изготовления односторонних печатных плат (ОПП) — химическим методом, двусторонних печатных плат (ДПП) — комбинированным позитивным методом и многослойных печатных плат (МПП) — методом металлизации сквозных отверстий.

Механическая обработка ПП включает в себя следующие процессы: получение заготовок, сверление отверстий: фиксирующих, технологических, с последующей металлизацией и монтажных; гидроабразивная зачистка поверхности заготовок и монтажных отверстий, абразивная зачистка поверхности заготовок; обработка по контуру.

Заготовки ПП рекомендуется изготавливать вырубкой или отрезкой. Фиксирующие, технологические, металлизированные и монтажные отверстия рекомендуется получать пробивкой или сверлением. Гидроабразивная очистка поверхности заготовок и металлизированных отверстий в ДПП и МПП позволяет осуществить качественную подготовку поверхности под металлизацию. Подготовка поверхности заготовок под нанесение фоторезиста или защитной краски осуществляется абразивной зачисткой. Для обработки контура ПП в зависимости от требований к обрабатываемой поверхности следует применять штамповку, обрезку на гильотинных ножницах, обработку алмазным кругом или фрезерование. Ниже будут рассмотрены условия, при которых следует выбирать тот или иной вид рекомендуемой механической обработки.

## **1.2. Исходные материалы для изготовления печатных плат и особенности их обработки**

В зависимости от исходных материалов выбирают вид механической обработки при изготовлении ПП. Для изготовления ПП используются, как правило, фольгированные диэлектрики. Однако с развитием аддитивной технологии применяются и нефольгированные диэлектрики. Исходными материалами для изготовления фольгированных диэлектриков являются: наполнитель, пропиточные смолы, адгезивы, катализирующие добавки и металлическая фольга.

Для облицовки используется медная фольга, получаемая электролитическим способом. Электролитическая фольга подвергается специальной обработке. Толщина фольги на отечественных фольгированных диэлектриках обычно составляет 18, 35 и 50 мкм. В настоящее время при изготовлении прецизионных ПП используются слоистые пластики, фольгированные тонкомерной медной электролитической фольгой толщиной 5—7 мкм. Эта фольга имеет защитный слой (протектор) из алюминиевой или медной фольги. Протектор обычно удаляется после сверления металлизированных отверстий.

В зависимости от требований к ПП в качестве наполнителя фольгированных диэлектриков используют бумагу. Это наиболее дешевый и обладающий удовлетворительными электрическими и механическими свойствами неплохо поддающийся механической обработке материал. К недостаткам этого материала относят сравнительно низкую прочность на изгиб и ударную прочность, не всегда приемлемое сопротивление изоляции, высокое влагопоглощение, а также малую нагревостойкость. Стеклоткань обладает значительно более высокими механическими свойствами, удовлетворительной нагревостойкостью, низким влагопоглощением, но худшей механической обрабатываемостью, анизотропией свойств и значительной по сравнению с бумагой стоимостью.

Для пропитки наполнителя и создания связи между ее отдельными слоями при изготовлении фольгированных диэлектриков применяют следующие материалы:

фенольная (фенолформальдегидная) смола марки ФАФ является наиболее дешевым пропиточным материалом, обладающим хорошей текучестью, применяется для пропитки бумаги (для приклеивания фольги к основанию используют клей марки БФР-4);

эпоксифенольные смолы (связующее вещество) имеют высокую температуру отверждения, хорошие электрические и механические свойства, а также высокую адгезию при металлизации, химически стойки к реактивам, применяемым при изготовлении ПП (за исключением концентрированной серной кислоты), достаточно нагревостойки и применяются для пропитки большинства видов наполнителя.

Т а б л и ц а 1.1

Марка	Толщина		Характеристика фольги
	фольги, мкм	материала, мм	
Гетинакс, облицованный с одной стороны медной фольгой			
ГФ-1-35	35	1—3	Негальваностойкая
ГФ-1-35Г	35		Гальваностойкая
ГФ-1-50	50		Негальваностойкая
ГФ-1-50Г	50		Гальваностойкая
Гетинакс, облицованный с двух сторон медной фольгой			
ГФ-2-35	35	1—3	Негальваностойкая
ГФ-2-35Г	35		Гальваностойкая
ГФ-2-50	50		Негальваностойкая
ГФ-2-50Г	50		Гальваностойкая
Стеклотекстолит, облицованный с одной стороны медной фольгой			
СФ-1-35	35	0,5—3	Негальваностойкая
СФ-1-35Г	35	0,5—3	Гальваностойкая
СФ-1Н-35	35	0,5—3	Негальваностойкая
СФ-1Н-35Г	35	0,5—3	Гальваностойкая
СФ-1-50	50	0,5—3	Негальваностойкая
СФ-1-50Г	50	0,5—3	Гальваностойкая
СФ-1Н-50	50	0,5—3	Негальваностойкая
СФ-1Н-50Г	50	0,5—3	Гальваностойкая
Стеклотекстолит, облицованный с двух сторон медной фольгой			
СФ-2-35	35	0,5—3	Негальваностойкая
СФ-2-35Г	35	0,5—3	Гальваностойкая
СФ-2-50	50	0,5—3	Негальваностойкая
СФ-2-50Г	50	0,5—3	Гальваностойкая
СФ-2Н-35	35	0,5—3*	Негальваностойкая
СФ-2Н-35Г	35	0,5—3*	Гальваностойкая
СФ-2Н-50	50	0,5—3*	Негальваностойкая
СФ-2Н-50Г	50	0,5—3*	Гальваностойкая

\* Материал нагревостойкий.

\* Материал нагревостойкий.

Основные марки отечественных фольгированных диэлектриков, применяемых для изготовления ОПП и ДПП, представлены в табл. 1.1.

Многослойные печатные платы изготавливают из фольгированных диэлектриков толщиной от 0,1 до 0,5 мм, в основном марок ФДТ, ФДМЭ, СТНФ, СТФ. Применяют стеклоткань марки Э и медную электролитическую оксидированную фольгу марки ФДМЭО толщиной 50 мкм для ФДТ и толщиной 35 мкм для ФДМЭ.

Склеивание отдельных слоев печатных плат методом прессования производится с помощью прокладочной стеклоткани марки

Э, пропитанной искусственным термореактивным связующим веществом.

В настоящее время используются фольгированные диэлектрики следующих марок: ГНФ, ГОФ, ГОФв, ДФС, ДФО, СОНФ, СФ(а), СТФ, СТНФ, ФТС.

Учитывая, что из фольгированных стеклотекстолитов изготавливаются ДПП и МПП специального назначения, особое внимание уделяется их механической обрабатываемости. Сочетание различных материалов диэлектриков (наполнитель, связующее, фольга) значительно усложняет задачу качественной механической обработки, особенно для получения отверстий, подлежащих металлизации ДПП и МПП. Зная природу взаимодействия компонентов диэлектриков, можно обеспечить высококачественную механическую обработку.

Для изучения роли стеклоткани, связующего и их взаимодействия был проведен анализ видов разрушения, возникающих при обработке материала плат. В отечественных стеклотекстолитах содержится около 40% смолы, а в зарубежных до 60%.

Стеклоткань представляет собой весьма плотное переплетение тончайших нитей стекла. На рис. 1 показан участок стеклоткани: при увеличении в 50 раз. Число нитей на 100 мм длины по утку и основе равно 200. При просмотре поперечного сечения наблюдается ярко выраженная послойная структура, слой смолы чередуется со слоем ткани. Плотная укладка волокон, очевидно, создает благоприятные условия для появления трещин как вследствие дополнительной концентрации напряжений, так и из-за уменьшения объема связующего, способного воспринимать и локализовать большие местные деформации.



Рис. 1. Структура переплетения нитей стеклоткани

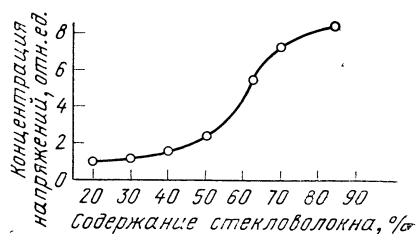


Рис. 2. Зависимость концентрации напряжений от степени наполнения стеклопластика

Благодаря чередованию слоев материала процесс сверления превращается в поочередное резание трех различных материалов: тонкой медной фольги, смолы и стекла. При прохождении инструментом слоя стеклоткани сверло вначале давит, затем разрывает нити и, наконец, размельчает стекловолокно, при этом в значи-



тельной степени вызывая из-за наличия повышенной концентрации напряжений такие дефекты, как расслоение и растрескивание диэлектрика. При выходе сверла из материала платы давление инструмента через стеклоткань передается на контактные площадки, вызывая разломачивание диэлектрика, вспучивание, отслоение фольги и образование заусенцев. Указанные дефекты диэлектрика в дальнейшем прогрессируют. После обработки отверстий и химико-гальванической обработки ДПП и МПП в различных химических растворах происходит значительное проникновение влаги в плату. Повышенное содержание влаги, в свою очередь, приводит к значительному снижению прочности материала МПП и ухудшает диэлектрические свойства.

Таким образом, повышенное содержание стекловолокна в отечественных материалах для ДПП и МПП через цепь взаимосвязанных факторов в конечном итоге отражается на качестве и надежности работы плат.

Следовательно, для улучшения механической обрабатываемости необходимо стремиться резко снизить возникающую концентрацию напряжений в материале для ДПП и МПП. По данным [8] наиболее высокая концентрация напряжений развивается при содержании в материале 70—80% стеклоткани. На рис. 2 представлена зависимость концентрации напряжений от степени наполнения при диаметре стекловолокна 10 мкм. На рисунке участок кривой, соответствующий 20—45% стекловолокна, имеет плавный вид, что соответствует небольшому возрастанию концентрации напряжений в материале. В стеклопластике с содержанием стекловолокна свыше 45% происходит резкое возрастание концентрации напряжений.

Исходя из вышеизложенного следует отметить, что в качестве диэлектрического основания для ДПП и МПП необходимо применять материалы с содержанием стекловолокна не более 30—40%. Такое содержание стекловолокна в диэлектрике позволит снизить концентрацию напряжений в 3—4 раза по сравнению с материалом, в котором содержится 70—80% стекловолокна. Снижение объемного содержания стекловолокна в материале должно, очевидно, привести к отсутствию характерных дефектов при сверлении фольгированных диэлектриков.

Кроме того, повышенное содержание стекловолокна резко увеличивает износ режущего инструмента, так как основу стеклянного волокна составляют абразивные частицы  $\text{SiO}_2$ . В процессе резания стеклопластиков происходит перерезание волокон стеклоткани, причем в результате хрупкого разрушения наполнителя срез представляет собой поверхность с выступающими твердыми абразивными частицами, имеющими острые кромки. Эти частицы, удерживаемые связующим, прочностные характеристики которого по сравнению со стекловолокном меньше, по крайней мере, в 30 раз, можно сравнить с абразивными зернами шлифовального круга. Так как содержание стеклоткани в стеклопластике составляет около 60%, количество абразивных частиц, находящихся в одно-

временном контакте с поверхностями режущего инструмента, будет значительным.

Высокая упругость стеклопластиков будет, очевидно, способствовать большему внедрению частиц абразива в материал инструмента. Поэтому действие стеклопластика на режущий инструмент сходно с работой шлифовального круга. Следовательно, износ инструмента при резании стеклопластиков является, в основном, результатом абразивного износа. Можно предположить, что снижение содержания стекловолокна в материале до 30—40% повысит в 1,3—1,5 раза стойкость инструмента.

Плотность укладки стеклоткани оказывает влияние на качество пропитки, что может быть одной из причин расслоения композиционного материала. Склонность к расслоению зависит, во-первых, от степени предварительного разрушения стеклоткани, которое может произойти в процессе ее изготовления, хранения и механической обработки. Причем предварительные разрушения, как указывалось ранее, прогрессируют и, в зависимости от их величины, может произойти расслоение материала.

Во-вторых, склонность к расслоению зависит от величины касательных напряжений на контактной поверхности между стеклотканью и полимерным связующим. Максимальное касательное напряжение для композиционного материала может быть выражено следующей формулой [12]:

$$\tau_{\max} = C' \sigma_b \sqrt{\frac{G_n}{E_b} \frac{d}{b}}. \quad (1.1)$$

где  $C'$  — коэффициент, изменяющийся в пределах от 0,1 до 1;  $\sigma_b$  — предел прочности на растяжение ткани;  $G_n$  — модуль сдвига полимерного связующего;  $E_b$  — модуль упругости стеклоткани;  $d$  — диаметр волокон;  $b$  — расстояние между волокнами.

Из уравнения следует, что максимальное касательное напряжение, а следовательно, и склонность к расслоению, возрастают с увеличением  $\sigma_b$ ,  $G_n/E_b$ ,  $d/b$ .

По-видимому, одной из возможностей уменьшения склонности к расслоению является уменьшение модуля сдвига полимерной матрицы  $G_n$  за счет применения более податливых связующих.

Отношение  $d/b$  характеризует плотность упаковки волокон. Из уравнения (1.1) видно, что увеличение содержания наполнителя в материале представляет серьезную опасность. При уменьшении расстояния между волокнами увеличивается  $\tau_{\max}$ . Особенно резко возрастают максимальные касательные напряжения, когда расстояние между волокнами становится очень малым.

Этот простой анализ приводит к выводу о необходимости сохранения некоторого конечного расстояния между волокнами. Подсчеты по (1.1) для отечественных материалов показывают, что при расположении волокон на расстоянии  $b=2$ —3 мкм (при  $d=10$  мкм) друг от друга касательные напряжения, стремящиеся вызвать расслоение вблизи разорванного волокна, приблизительно в три раза больше, чем при  $b=d$ . На основе проведенного анализа установ-

лено влияние плотности укладки волокон на степень расслоения диэлектрика. С целью уменьшения касательного напряжения и размещения 60—70% связующего следует применять стеклоткань с числом нитей 100—140 на длину 100 мм по утку и основе.

Повышенное содержание наполнителя и плотная упаковка нитей, присущие отечественным материалам печатных плат, значительно снижают адгезионные свойства. Поэтому МПП, обладающие высокой плотностью монтажа, часто после склейки (прессования) расслаиваются. Очевидно это явление происходит от того, что промежуточные склеивающие прокладки (стеклоткань), как и весь материал диэлектрика, обладают недостаточным объемным содержанием смолы (30%). Увеличение содержания смолы до 60—70% значительно увеличивает адгезию слоев спрессованной МПП и исключает расслаивание платы. При этом нельзя забывать, что важное значение имеет выбор рациональных режимов прессования (удельное давление, температура, длительность прессования и т. д.) с учетом повышенного содержания смолы в материале.

Содержание стекловолокна и плотность укладки нитей оказывают также влияние на прочность сцепления металлизированных пистонов с диэлектрическим основанием печатной платы. При сверлении на определенных режимах фольгированного диэлектрика с повышенным содержанием стекловолокна происходит почти полное «остекление» отверстий, что вызывает, из-за плохой смачиваемости стекла в химических растворах, некоторое ухудшение качества химического меднения отверстий. Это, в свою очередь, приводит к плохому качеству гальванического осаждения меди в отверстиях и снижению прочности сцепления пистона с диэлектриком.

При использовании материалов с большим содержанием связующего можно предположить, что прочность сцепления металлизированных в отверстиях пистонов с диэлектриком возрастет, так как активирующие вещества и химическая медь будут осаждаться лучше на смолу, чем на стекло из-за различной их смачиваемости.

В ДПП и МПП, так же как и во всех стеклопластиках, всегда имеется некоторое количество пустот (пор). Естественно, что поры, занимающие объем, который мог быть занят компонентами стеклопластика, снижают его прочность и ухудшают диэлектрические параметры. Поры разделяются по границам соседних слоев стекломатериала с различным направлением стекловолокон, а также между волокнами [16]. Существенное влияние на пористость стеклопластика оказывает объемное соотношение компонентов стеклотекстолита ( $C_2/C_1$ , где  $C_2$  — объемное содержание связующего;  $C_1$  — объемное содержание стекловолокна). Естественно, чем меньше это соотношение, тем меньший объем занят связующим и тем больший объем остается между волокнами в стеклопластике для заполнения воздухом и летучими веществами, выделяющимися из связующего в процессе прессования. И наоборот,

чем больше это соотношение, тем больше в стеклопластике связующего и тем меньше возможностей для появления пористости.

На рис. 3 показано изменение пористости стеклопластика в зависимости от отношения  $C_2/C_1$ . При содержании стекловолокна в материале плат около 60% это соотношение составляет примерно 0,5, что может привести к содержанию газовых включений в материале до 8%, которые наблюдаются на поверхности плат в виде светлых областей, расположенных между волокнами.

Для исключения пор в материале плат необходимо увеличивать долю связующего так, чтобы соотношение  $C_2/C_1 > 1$ , одновременно снижая содержание стекловолокна до 30—40%.

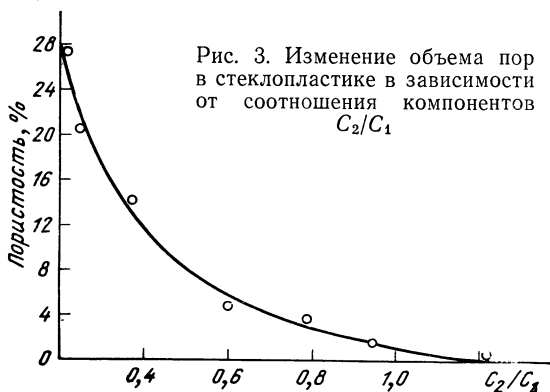
Таким образом, для улучшения ряда основных технологических свойств материалов для ДПП и МПП целесообразно изменить структуру и объемное содержание стекловолокна в материале до 30—40%, соответственно увеличив долю связующего, и изменить

плотность укладки нитей, снизив число нитей на длине 100 мм по утку и основе с 200 до 100—140 шт.

Для оценки правильности сделанных предположений были проведены соответствующие испытания на обрабатываемость резанием существующих и предлагаемых материалов. Обработке подвергались ПП, изготовленные с применением материалов, обладающих повышенным содержанием стеклоткани и высокой плотностью укладки волокон (число нитей на длине 100 мм по утку на основе 200 шт), а также материалов, обладающих низким содержанием стеклоткани (до 30—40%) и невысокой плотностью укладки волокон (число нитей по утку — 120 шт., по основе — 140 шт.).

При проведении сравнительных испытаний двух типов материалов оценивались следующие факторы: наличие и величина характерных дефектов, износостойкость режущего инструмента, прочность сцепления металлизированных пистонов с диэлектриком.

Для обнаружения характерных дефектов образцы с просверленными отверстиями просматривались на микроскопе ММИ или МБИ-6. Анализ показал, что на материале с большим содержанием стеклоткани имеются небольшие заусенцы (высотой 0,05—0,08 мм), а на материале с меньшим содержанием стеклоткани заусенцы отсутствовали. Этот факт свидетельствует о лучшей обрабатываемости материала с большим содержанием смолы в связи с тем, что диэлектрик стал монолитнее благодаря большему количеству связующего. У этого материала медная фольга срезается без образования заусенца в результате того, что изменился характер резания диэлектрика.



Инструмент сверлит, в основном, два достаточно сходных по обрабатываемости материала — медь и смолу. Кроме того, отсутствие заусенцев объясняется тем, что снижение доли стеклоткани уменьшает давление многочисленных разорванных частичек нити, образующихся при обработке, на фольгу, которое имеет место при сверлении материала с содержанием стеклоткани около 60%. Уменьшение доли стеклоткани сокращает также количество абразивных частичек, что, в свою очередь, способствует значительному снижению износа сверл.

В ходе опыта отверстия металлизировались, с одной стороны плат открывалась фольга. Просмотр показал, что в образце с большим содержанием стеклоткани имелся незначительный, но характерный дефект в виде небольшого ореола и трещин, а на отверстиях в образце из материала с большим содержанием связующего такой дефект отсутствовал.

Это свидетельствует о том, что даже тщательный выбор рациональной конструкции и геометрических параметров инструмента, определение оптимальных режимов резания не позволяют получать высокое качество сверления отверстий в фольгированных диэлектриках с большим содержанием стеклоткани, так как наличие высокой концентрации напряжений способствует возникновению характерных дефектов.

Для определения работоспособности инструмента в зависимости от содержания компонентов в материале были проведены стойкостные испытания.

На рис. 4 представлены зависимости износа по уголку, задней поверхности и перемычке сверла от числа просверленных отверстий. Из графика видно, что стойкость сверл значительно возрастает при обработке материала с большим содержанием смолы. Увеличение стойкости происходит, примерно, в два раза по сравнению с обработкой материала с большим содержанием стекловолокна, что подтверждает ранее сделанные предположения. Таким образом, уменьшение степени абразивности обрабатываемого материала за счет уменьшения содержания стекловолокна в материале резко повышает стойкость режущего инструмента и качество обрабатываемых отверстий.

Для определения прочности сцепления металлизированных пистонов с диэлектриком в образцах указанных материалов просверливалось по 100 отверстий. После металлизации отверстий впаивались проводники и производился вырыв пистонов на разрывной машине.

Анализ результатов показал, что с увеличением в материале доли связующего прочность сцепления пистона с диэлектриком возрастает. В диэлектри-

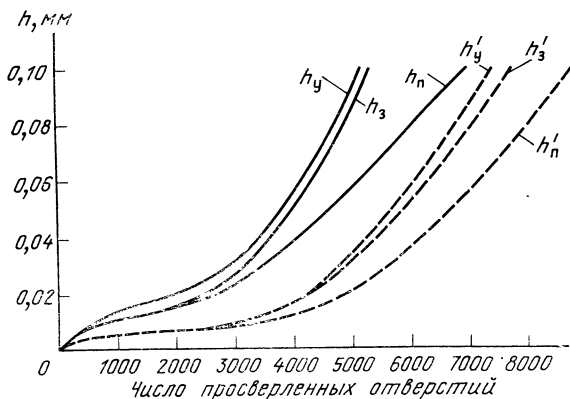


Рис. 4. Зависимость износа сверл от числа просверленных отверстий

ке с содержанием стекловолокна около 60% средняя величина ее составляет 19 МПа, а с содержанием около 40%—21 МПа.

Эти результаты свидетельствуют о превосходстве материала с ббльшим содержанием связующего вещества, которое делает его монолитным, и благодаря этому значительно улучшаются его основные характеристики.

Таким образом, для исключения образования характерных дефектов при механической обработке, увеличения износостойкости режущего инструмента, улучшения адгезионных свойств и увеличения прочности сцепления металлизированных листонов с диэлектрическим основанием печатной платы, а также для уменьшения степени влагопоглощаемости и исключения газовых включений необходимо в материалах для ДПП и МПП, применяемых в отечественной промышленности, снижать содержание стеклоткани до 30—40%.

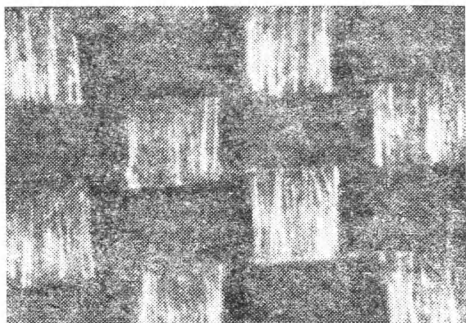


Рис. 5. Структура переплетения нитей стеклоткани (число нитей на 100 мм длины по утку и основе соответственно 100 и 120 шт.)

Для включения в состав стеклопластиков количества смолы необходимо уменьшать плотность укладки нитей ткани, снижая число нитей по утку и основе с 200 до 100—140 шт. на 100 мм длины. Расположение нитей должно быть примерно таким, как показано на рис. 5. На рисунке видно, что между переплетением группы нитей утка и основы имеются небольшие ячейки для заполнения их смолой. Это также создает диэлектрику требуемую монолитность. Применение фольгированных диэлектриков с предлагаемой структурой строения наполнителя и процентным содержанием компонентов позволяет улучшить качество изготовления плат при получении отверстий высокого качества, не требующих последующего зенкования.

Проведенные анализ и экспериментальные исследования позволили найти один из путей улучшения механической обрабатываемости материалов ПП.

### **1.3. Технические требования к печатным платам после механической обработки**

Известно, что используемый для изготовления ПП материал — композиционный, состоящий из диэлектрического основания и медной фольги. Такое сочетание отражается на качественной механи-

ческой обработке ПП. Исследования основных параметров режущего инструмента, режимов резания и выбор оборудования для механической обработки показали, что важное значение имеет учет компонентов материала ПП.

Исходя из специфики работы к ПП после механической обработки предъявляются повышенные требования:

основания ПП не должны иметь заметных сколов, расслоений и трещин;

на поверхности материала не допускаются глубокие риски, царапины, вмятины;

проводники не должны отслаиваться от основания.

Эти требования обусловлены тем, что при наличии в ПП указанных характерных дефектов в них могут попасть различные реактивы, в которых находится плата в процессе химических операций, что может привести к нарушению диэлектрических свойств основания ПП.

При выполнении этих требований необходимо учитывать, что все слоистые пластики — анизотропные материалы, их механические свойства вдоль слоев ниже, чем перпендикулярно слоям. Поэтому материалы, особенно на бумажной основе, вдоль слоев легко расслаиваются. Кроме того, эти материалы неоднородные: механические характеристики различны на отдельных участках листа. Режущая кромка инструмента, снимая в процессе резания слой компонентов, составляющих слоистые пластики, испытывает переменные нагрузки, что отрицательно сказывается на стойкости инструмента и качестве обрабатываемых ПП.

Кроме того, слоистые пластики, особенно на основе стеклоткани, обладают значительными абразивными свойствами. Поэтому при механической обработке ПП происходит интенсивный износ режущего инструмента, вызывающий значительное ухудшение качества обрабатываемых ПП.

Для уменьшения вероятности возникновения вышеуказанных характерных дефектов необходимо, чтобы исходный материал для ПП соответствовал требованиям ГОСТ 10316—78. Механическую обработку ПП следует производить инструментом с высокой износостойкостью, обеспечивая при выполнении большинства операций механической обработки надежное закрепление ПП в рабочей зоне. Заготовки ПП со значительной деформацией (изгиб и скручивание) должны быть отрихтованы. Величина остаточной деформации после рихтовки не должна превышать 0,6 мм на 100 мм длины заготовки.

В процессе обработки необходимо удаление образующейся стружки. Патрубок отсасывающего устройства должен быть подведен непосредственно к зоне резания. Скорость движения воздуха в отсасывающем патрубке не должна быть менее 20 м/с.

Инструмент, используемый для механической обработки ПП, должен быть обезжирен органическим растворителем хладом-113. Поверхности оснастки и оборудования, соприкасающиеся

ся с обрабатываемой платой, допускается протирать сухой ветошью. После операций механической обработки оставшиеся на поверхности платы и в отверстиях пыль и стружку следует удалять.

## Глава вторая

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

#### 2.1. Выбор конструктивных, геометрических параметров режущих инструментов и режимов механической обработки печатных плат

##### 2.1.1. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК ФИКСИРУЮЩИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ

Заготовки ПП из фольгированного и нефольгированного гетинакса и стеклотекстолита, склеивающей прокладки, триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки и кабельной бумаги рекомендуется получать вырубкой или отрезкой.

Рекомендация по выбору метода получения заготовок в зависимости от типа производства ПП приведены в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Тип производства	Метод получения заготовок при операциях резки	
	листов на полосы	полос на заготовки
Массовое и крупносерийное	На многоножевых роликовых ножницах На одноножевых роликовых или гильотинных ножницах	Вырубкой в штампах на кривошипных прессах На многоножевых роликовых ножницах
Мелкосерийное и единичное	То же	На одноножевых или гильотинных ножницах

Отрезку полос из листов прокладочной стеклоткани, триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки и кабельной бумаги и вырубку заготовок из полос этих материалов, а также из фольгированного и нефольгированного стеклотекстолита толщиной до 0,5 мм включительно следует производить при толщине пакета не более 1,5 мм, но не менее 0,8 мм.



Размеры заготовок из гетинакса или стеклотекстолита следует определять по формулам:

$$A_{\text{зп}} = A_{\text{п}} + 2H; B_{\text{зп}} = B_{\text{п}} + 2H,$$

где  $A_{\text{зп}}$  — длина заготовки, мм;  $A_{\text{п}}$  — длина платы по рабочему чертежу, мм;  $B_{\text{зп}}$  — ширина заготовки, мм;  $B_{\text{п}}$  — ширина платы по рабочему чертежу, мм;  $H$  — ширина технологического поля, мм.

Платы малых габаритных размеров должны изготавливаться на групповой заготовке. Размеры групповой заготовки определяются размерами и числом размещенных на ней плат.

Площадь групповой заготовки

$$S_{\text{з}} = \sum_{i=1}^n (A_{ni} + 2H)(B_{ni} + 2H),$$

где  $n$  — общее число плат, размещенных на групповой заготовке;  $A_{ni}$  — длина  $i$ -й платы по рабочему чертежу, мм;  $B_{ni}$  — ширина  $i$ -й платы по рабочему чертежу, мм.

Ширина технологического поля для ОПП и ДПП не должна превышать 10 мм, для МПП — 30 мм.

Размеры заготовок из прокладочной стеклоткани и кабельной бумаги должны соответствовать размерам заготовок слоев МПП. Размеры заготовок из триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки должны превышать на 55—60 мм размеры заготовок слоев МПП.

При определении размеров групповых заготовок следует учитывать следующие факторы: размеры листов диэлектрика, наличие унифицированных базовых несущих конструкций: класс точности обрабатываемых ПП и др. В результате анализа рекомендуемые минимальные размеры групповых заготовок следующие: для ОПП  $200 \times 350$  мм, для ДПП  $220 \times 340$  мм.

Предельные отклонения от номинальных размеров заготовок приведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Наименование заготовки	Предельные отклонения от номинальных размеров, мм
Заготовки из гетинакса и стеклотекстолита толщиной не менее 0,2 мм с технологическим полем шириной не менее 1,5 мм	$\pm 1,5$
Заготовки из гетинакса и стеклотекстолита толщиной 0,2 мм, склеивающей прокладки, триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки и кабельной бумаги	$\pm 2,0$
Заготовки из гетинакса и стеклотекстолита без технологического поля	Должны соответствовать приведенным в рабочем чертеже на обрабатываемую плату

Точное расположение заготовок ПП и отдельных слоев МПП в процессе обработки обеспечивается фиксирующими отверстиями. Для правильной установки заготовки на выбранном оборудовании и технологической оснастке или совмещении ее с фотошаблоном фиксирующие отверстия должны быть различного диаметра или расположены несимметрично с использованием ориентирующего знака (отверстия). Для предотвращения смещения заготовок слоев МПП в процессе прессования на них, кроме фиксирующих отверстий, должны быть выполнены и технологические отверстия. Число технологических отверстий и их расположение следует выбирать согласно рекомендациям, представленным в табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3

Вид МПП	Площадь поверхности слоя МПП, дм <sup>2</sup>			
	До 3 включи- тельно	Свыше 3 до 6 включи- тельно	Свыше 6 до 10 включи- тельно	Свыше 10
	Число технологических отверстий не менее, шт.			
МПП, изготовленные из фольгированных диэлектри- ков толщиной до 0,25 мм включительно	2	4	8	10
МПП, изготовленные из фольгированных диэлектри- ков толщиной свыше 0,25 мм	—	2	4	8

Технологические отверстия на поле заготовки слоя МПП должны быть расположены равномерно, на расстоянии не менее 10 мм от контура заготовки.

На заготовках из прокладочной стеклоткани, триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки и кабельной бумаги, используемых при прессовании МПП, должны быть выполнены фиксирующие и технологические отверстия. Диаметр и расположение этих отверстий должны соответствовать аналогичным отверстиям на заготовках слоев МПП. Фиксирующие и технологические отверстия следует изготавливать пробивкой или сверлением. Рекомендации по выбору метода получения отверстий в зависимости от типа производства ПП приведены в табл. 2.4.

При сверлении фиксирующих отверстий на специальных станках следует использовать сверла по ГОСТ 17274—71, ГОСТ 17275—71. При сверлении фиксирующих отверстий на специальных станках заготовки следует собирать в пакет толщиной не более 4,5 мм. Под нижнюю заготовку необходимо подкладывать прокладку из электротехнического листового гетинакса толщиной 0,8—1,5 мм. При сверлении фиксирующих отверстий в заготовках из стеклотекстолита толщиной до 0,5 мм, прокладочной стеклотка-

Таблица 2.4

Тип производства	Метод получения фиксирующих и технологических отверстий			
	Стеклотекстолит толщиной до 0,5 мм включительно	Гетинакс и стеклотекстолит толщиной, мм		Прокладочная стеклоткань
		Свыше 0,5 до 2 включительно	Свыше 2	
<b>Массовое и крупносерийное</b>	Пробивка на кривошипных прессах	Пробивка на кривошипных прессах Сверление на специальных станках	Сверление на специальных станках	Пробивка на кривошипных прессах
<b>Мелкосерийное и единичное</b>	Сверление на специальных станках  Сверление по кондуктору на настольно-сверлильных станках повышенной точности Пробивка на установке совмещения и пробивки фиксирующих отверстий	Сверление на специальных станках  Сверление по кондуктору на настольно-сверлильных станках повышенной точности	Сверление на специальных станках  Сверление по кондуктору на настольно-сверлильных станках повышенной точности	Сверление по кондуктору на настольно-сверлильных станках повышенной точности

ни, триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки и кабельной бумаги прокладку из листового электротехнического гетинакса необходимо прокладывать с двух сторон.

Сверление фиксирующих и технологических отверстий по кондуктору производят без прокладки, при этом заготовки следует собрать в пакет толщиной не более 4,5 мм. При сверлении отверстий необходимо использовать сверла по ГОСТ 4010—77. Биение сверла, закрепленного в цанге станка, не должно превышать 0,05 мм. Режимы резания при сверлении приведены в табл. 2.5.

При изготовлении печатных плат с точностью расположения монтажных и металлизированных отверстий в узлах координатной сетки до  $\pm 0,1$  мм фиксирующие отверстия на заготовках из гетинакса или стеклотекстолита следует развернуть развертками по ГОСТ 16086—70 или ГОСТ 1672—80. Режимы резания при развертывании приведены в табл. 2.6.

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей не допускается. Предельные отклонения диаметров фиксирующих и технологи-

Т а б л и ц а 2.5

Оборудование	Инструмент	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об.
Специальный станок для сверления фиксирующих отверстий Настольно-сверлильный станок	Цельное твердосплавное сверло (по ГОСТ 17274—71 или ГОСТ 17275—71)	40—55	0,03—0,07
	Спиральное сверло, оснащенное пластинкой из твердосплавного материала	40—55	Ручная
	Спиральное сверло (по ГОСТ 4017—77)	20—35	»

Т а б л и ц а 2.6

Инструмент	Скорость резания, м/мин	Подача
Цельная машинная развертка из твердого сплава с цилиндрическим хвостовиком (по ГОСТ 16086—70)	25—30	Ручная
Цельная машинная развертка (по ГОСТ 1672—80)	10—15 $\frac{1}{2}$	— » —

Т а б л и ц а 2.7

Наименование заготовки	Предельные отклонения диаметров отверстий	
	фиксирующих	технологических
Заготовки из гетинакса и стеклотекстолита для плат с предельным отклонением центров монтажных и металлизированных отверстий от узлов координатной сетки до $\pm 0,1$ мм	H11 СТ СЭВ 144—75 СТ СЭВ 145—75	H12 СТ СЭВ 144—75 СТ СЭВ 145—75
Заготовки из гетинакса и стеклотекстолита для плат с предельным отклонением центров монтажных и металлизированных отверстий от узлов координатной сетки более $\pm 0,1$ мм	H12 СТ СЭВ 144—75 СТ СЭВ 145—75	

ческих отверстий должны соответствовать приведенным в табл. 2.7.

Предельные отклонения расстояний между центрами фиксирующих отверстий на заготовках из гетинакса и стеклотекстолита должны соответствовать указаным в табл. 2.8.

Предельные отклонения расстояний между центрами фиксирующих и технологических отверстий на заготовках из прокладочной стеклоткани, триацетатцеллюлозной электроизоляционной слабопластифицированной пленки и кабельной бумаги не должны превышать  $\pm 0,2$  мм.

Т а б л и ц а 2.8

Вид печатной платы	Предельные отклонения при номинальном расстоянии между центрами фиксирующих и технологических отверстий, мм		
	До 180 включительно	Свыше 180 до 360	Свыше 360
Печатная плата с предельными отклонениями между центрами отверстий до $\pm 0,1$ мм То же, более $\pm 0,1$ мм	$\pm 0,05$ $\pm 0,10$	$\pm 0,08$ $\pm 0,15$	$\pm 0,10$ $\pm 0,20$

Высота микронеровностей  $R_z$  по ГОСТ 2789—73 (шероховатость) поверхности по контуру отверстия на заготовках из гетинакса и стеклотекстолита не должна превышать 40 мкм. Размеры поверхностных сколов, посветления (ореолы) вокруг фиксирующих и технологических отверстий на заготовках из гетинакса и стеклотекстолита, а также по периметру заготовок, не имеющих технологического поля, не должны превышать указанных в табл. 2.9.

Т а б л и ц а 2.9

Материал основания	Ширина поверхностных сколов, посветлений (ореолов) при толщине материала, мм							
	До	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Гетинакс		—	—	0,8	1,1	1,3	1,6	2,0
Стеклотекстолит		0,3	0,4	0,6	1,0	1,2	1,4	1,7

Расстояние от скола, посветления по периметру заготовки, не имеющей технологического поля, до соседнего элемента проводящего рисунка не должно превышать 0,3 мм, если в чертеже на обрабатываемую плату не указаны другие требования.

В случае возникновения характерных дефектов при получении заготовок ПП следует руководствоваться способами их устранения, которые приведены в табл. 2.10.

### 2.1.2. ПОЛУЧЕНИЕ МОНТАЖНЫХ И МЕТАЛЛИЗИРУЕМЫХ ОТВЕРСТИЙ

Одной из основных операций механической обработки ПП является получение монтажных и подлежащих металлизации (металлизируемых) отверстий. В ходе экспериментальных исследований были опробованы различные методы получения отверстий в ПП: электрофизические, лазерная обработка, штамповка, пробивка гидроударом, сверление с применением инструментов из твердого сплава и из кристаллов натурального алмаза. В резуль-

Т а б л и ц а 2.10

Наименование операции	Наименование дефекта	Способы устранения характерных дефектов
Отрезка полос и заготовок на роликовых и гильотинных ножницах	Заусенцы, трещины, сколы и расслоение материала	Проверить правильность установки зазора между верхним и нижним ножами Переточить режущие кромки инструмента
Вырубка заготовок, пробивка фиксирующих и технологических отверстий	Ореолы по контуру заготовок и отверстий	Проверить зазор между пуансонами и отверстиями в съемнике Прошлифовать матрицу и пуансоны и удалить заусенцы Увеличить прижим к материалу
—	Сколы на поверхности среза	Проверить зазор между пуансоном и матрицей Прошлифовать матрицу и пуансоны и удалить заусенцы Увеличить прижим к материалу
—	Трещины по контуру фиксирующих и технологических отверстий	Проверить соосность пуансонов и матрицы и равномерность зазоров между ними Увеличить прижим к материалу Прошлифовать матрицу и пуансоны
Сверление фиксирующих и технологических отверстий	Ореолы и заусенцы по контуру отверстий	Проверить крепление заготовок в кондукторе Заточить сверло Увеличить скорость резания и уменьшить подачу
—	Параметр шероховатости не соответствует требованиям стандарта	Проверить отсос стружки Заточить сверло

тате было установлено, что наиболее рациональными в данном случае являются штамповка и сверление.

В зависимости от типа производства ПП метод получения монтажных и металлизируемых отверстий рекомендуется выбирать по табл. 2.11.

Операции штамповки заготовок ПП производится на стандартных кривошипных или эксцентриковых прессах.

В качестве инструмента применяются вырубные штампы, рабочие элементы которых рекомендуется изготавливать из инструментальных сталей марок Х12М и Х12Ф1 или металлокерамического твердого сплава марок ВК15 и ВК20.

Штамповку монтажных отверстий в ПП, изготовленных из материала толщиной свыше 1,5 мм, рекомендуется осуществлять с предварительным подогревом до температуры 80—100°С со скоростью подогрева 5—8 мин на 1 мм толщины материала.

Важное значение имеет определение исполнительных размеров рабочих элементов пуансонов и матриц вырубного штампа. Расчет исполнительных размеров пуансонов и матриц проводится для двух вариантов: без подогрева материала и с подогревом.

Таблица 2.11

Тип производства	Тип отверстий	Метод получения отверстий в плате		
		односторонней	двусторонней	многослойной
Массовое и крупносерийное	Неметаллизируемое	Пробивка в пробивных штампах на кривошипных прессах	Пробивка в пробивных штампах на кривошипных прессах	Сверление на станках с ЧПУ
	Металлизируемое	—	Сверление на станках с ЧПУ Сверление на станках с ЧПУ	То же
Мелкосерийное и единичное	Неметаллизируемое	Пробивка в универсальных штампах на кривошипных прессах Сверление на станках с ЧПУ, на сверлильных станках с шуповым или оптическим устройством	Пробивка в универсальных штампах на кривошипных прессах Сверление на станках с ЧПУ, на сверлильных станках с шуповым или оптическим устройством	Сверление на станках с ЧПУ, на сверлильных станках с шуповым или оптическим устройством
	Металлизируемое	—	Сверление на станках с ЧПУ на сверлильных станках с шуповым или оптическим устройством	Сверление на станках с ЧПУ, на сверлильных станках с шуповым или оптическим устройством

Расчет исполнительных размеров режущего контура матрицы при вырубке ПП без подогрева следует определять по формуле

$$D_m = (D_d - \Delta_1) - \Delta_m,$$

где  $D_m$  — исполнительный размер режущего контура матрицы, мм;  $D_d$  — номинальный размер вырубаемой платы, мм;  $\Delta_1$  — предельное отклонение размера вырубаемой платы, мм;  $\Delta_m$  — предельное отклонение режущего контура матрицы, мм.

Предельные отклонения межосевых расстояний в штампах не должны превышать  $\pm 0,01$  мм.

Известно, что при штамповке листовых материалов толщиной до 3 мм зазор между пуансоном и матрицей должен быть минимальным. Специалисты часто употребляют термин «беззазорные» штампы. Однако известно, что применительно к пробивке отверстий в ОПП, изготовленных из фольгированного гетинакса, увеличение зазора позволяет повысить качество пробивных отверстий. Зазор между пуансоном и матрицей рекомендуется увеличивать до 0,15—0,2 мм, причем рабочий торец пуансона может быть плоским или сферическим.

Следует отметить, что подобные решения не позволяют резко повысить качество пробиваемых отверстий, исключить образование характерных дефектов при обработке плат. Объясняется это тем, что отечественные фольгированные диэлектрики обладают низкой степенью штампуемости. Это означает, что допускается сквозная трещина между двумя отверстиями при толщине материала 1,5 мм и величине перемычки для фольгированного гетинакса, равной 1,5 мм, и для фольгированного стеклотекстолита — 1 мм.

Такой дефект в ПП современной аппаратуры недопустим. Для того чтобы его избежать в технологическом процессе изготовления ПП для получения монтажных отверстий с шагом менее 3,75 операцию пробивки заменяют сверлением на станках с ЧПУ.

Таким образом, метод пробивки отверстий в фольгированных диэлектриках широко не применяется из-за низкого качества поверхности среза (наличия трещин, ореолов, расслоений и сколов). Причины появления указанных дефектов объясняются при анализе напряженного состояния разделяемой заготовки в процессе штамповки.

Обычная пробивка фольгированного диэлектрика протекает в 4 стадии.

1. Стадия пластической деформации продолжается до глубины  $(0,1—0,15)H$ , где  $H$  — толщина фольгированного диэлектрика. Происходит пластическое деформирование медной фольги (срез и упругое сжатие слоев фольгированного диэлектрика). В конце этой стадии появляются трещины со стороны пуансона. Трещины направлены в сторону основного материала.

2. Стадия хрупкого разрушения. Появляются трещины разделения со стороны матрицы. При погружении пуансона на глубину более  $0,15H$  под торцем пуансона образуется конус с углом  $60^\circ$ . Конус своими боковыми гранями воздействует на материал платы. В результате происходит поворот слоев фольгированного диэлектрика в направлении движения пуансона. При этом образуются трещины, которые впоследствии приводят к вырывам в фольгированном диэлектрике. Ореолы достигают размеров  $(1,2—1,8)d$  ( $d$  — диаметр). При внедрении пуансона на глубину  $(0,3—0,4)H$  трещины от пуансона продолжают разрастаться и начинают появляться трещины от острых кромок матрицы, направленные в монолит фольгированного диэлектрика. На этой стадии усилие пробивки максимально.

3. Стадия разделения. При погружении пуансона на незначительную глубину до  $(0,4—0,5)H$  наблюдается соединение трещин от пуансона и матрицы по всей зоне разделения. Усилие снижается. Происходит разделение фольгированного диэлектрика.

4. Стадия проталкивания. Характеризуется проталкиванием отхода в матрицу, в результате на поверхностях отходов и поверхности разделения наблюдается сглаживание выступов.

Дефекты, получаемые при обычной пробивке монтажных отверстий в ПП, устраняют различными способами. К числу решений, повышающих точность и качество пробивки, относится ульт-



развуковая обработка, т. е. использование механических колебаний ультразвуковой частоты в технологических целях. На практике часто используют упругие механические колебания частотой от 16 кГц.

Было выдвинуто предположение, что пробивка фольгированного диэлектрика с наложением ультразвуковых колебаний резко изменит характер деформации и будет протекать по следующим стадиям (рис. 6).

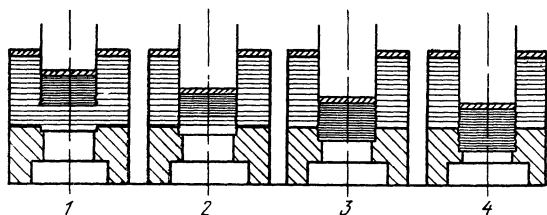


Рис. 6. Схема деформации материала при штамповке с наложением ультразвуковых колебаний

1. Стадия пластической деформации продолжается до глубины  $(0,2—0,3)H$ . Происходит значительное уплотнение материала под пуансоном. Осуществляется срез верхних слоев диэлектрика и фольги на глубину погружения пуансона.

2. Стадия хрупкого разрушения. При дальнейшем движении пуансона начинают появляться со стороны матрицы трещины по поверхности разделения и зарождается слабо выраженный конус, направленный в отход. Глубина погружения пуансона  $(0,3—0,4)H$ . В конце этой стадии возникает максимальное усилие, которое на 40—50% меньше максимального усилия при пробивке фольгированных диэлектриков без приложения энергии ультразвуковых колебаний.

3. Стадии разделения. В начале появляются трещины от пуансона, которые соединяются с трещинами от матрицы. Происходит процесс пробивки. Усилие снижается.

4. Стадия проталкивания. Поверхность разделения выступов практически не имеет. Усилие проталкивания — значительно снижено, вырывов с поверхности разделения не наблюдается.

Источником ультразвуковых колебаний является система, состоящая из электрического генератора и преобразователя электрических колебаний в упругие механические колебания. В качестве источника электрической энергии ультразвуковой частоты широкое применение получили генераторы серии УЗГ, работающие по схеме с самовозбуждением, а часто и с обратной акустической связью. В генераторах серии УЗГ предусмотрено возможность плавной регулировки частоты в диапазоне 18—28 кГц.

Серийные преобразователи продольных колебаний типа ПМС обеспечивают нормальные согласования генератора и преобразователя в диапазоне частот генератора. Преобразователи состоят из активного элемента — трансформатора электрических колебаний в механические и пассивного — волновода, выходной торце

которого и является излучателем механических ультразвуковых колебаний. При ультразвуковой обработке твердых материалов применяются волноводы, выполненные в виде стального стержня полу- и четвертьволновой длины (концентратора). Продольные колебания ультразвуковой частоты, излучаемые преобразователями типа ПМС, получили наибольшее применение в технологических процессах, интенсифицируемых применением ультразвуковых колебаний.

Эффективная работа преобразователя возможна при взаимном согласовании параметров преобразователя и его нагрузки. Под нагрузкой преобразователя подразумевается волноводная система, включающая образец, подвергающийся обработке давлением. Для получения максимальной отдачи необходимо задаваться определенными акустическими параметрами системы, что, в свою очередь, определяет ее размеры.

Волноводная система, связанная с источником колебаний, представляет для него некоторое механическое сопротивление, которое называется входным:

$$Z_{вх} = R_{вх} + X_{вх},$$

где  $Z_{вх}$  — входное сопротивление;  $R_{вх}$  — активная и  $X_{вх}$  — реактивная составляющие входного сопротивления.

Резонансный режим будет наблюдаться, когда реактивная составляющая окажется полностью скомпенсированной, т. е.  $X_{вх} = 0$ . Это условие в случае однородного волновода определяет его резонансную длину  $l = \lambda/2$ . Если потери малы, то в системе волноводов резонансной длины возникают стоячие волны. Такие волны позволяют получить оптимальные условия работы, увеличить КПД ультразвуковых установок и волноводных систем, а также концентрировать энергию на небольшом участке.

Основное уравнение, описывающее колебания частиц в плоской продольной стоячей волне, записывается в следующем виде:

$$a = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin 2\pi ft,$$

где  $a$  — смещение частиц в стоячей волне;  $A$  — амплитуда смещения в бегущей волне;  $\lambda$  — длина волны;  $f$  — частота колебаний;  $t$  — время;  $x$  — координата точки.

В точках, в которых  $\cos(2\pi x/\lambda)$  обращается в нуль, смещение результирующего колебания  $a$  равно нулю. Эти точки называются узлами волны. Между этими точками имеются координаты, в которых множитель  $\cos(2\pi x/\lambda)$  по абсолютной величине максимален, а следовательно, максимальна амплитуда смещения частиц в стоячей волне. Эти точки называются пучностями стоячей волны.

Дифференцируя по времени, получим уравнение колебательной скорости

$$V = 4\pi A f \cos \frac{4\pi x}{\lambda} \cos 2\pi ft.$$

Нетрудно увидеть, что узлы и пучности колебательной скорости располагаются в тех же точках, что узлы и пучности смещения. Так как механическое сопротивление в узлах скорости и смещения велико, то это обстоятельство позволяет закреплять резонансные волноводы в узловых сечениях без отвода от них энергии и внесения дополнительных потерь. Звуковое давление в стоячей волне распределяется по следующему закону:

$$P = \frac{da}{dx} = \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \sin 2\pi ft.$$

Из уравнения следует, что в стоячей волне местоположение узлов давления совпадает с положением пучностей смещения, т. е. имеется сдвиг фаз на  $\lambda/4$ . Сечение с узлами усилий, напряжений и деформаций служат для сочленений отдельных элементов волноводной системы, так как в этих точках отсутствуют входное сопротивление и циклические напряжения, что значительно облегчает достижение надежного акустического контакта и прочности соединения. Указанные свойства положены в основу соединения ультразвуковых систем, в волновую систему которых входит обрабатываемый материал.

Волновой процесс имеет место, если системе сообщить некоторую энергию. Энергия в единице объема среды, в которой распространяется волна, складывается из кинетической энергии  $E_k$  и потенциальной  $E_p$ . Кинетическая энергия в единице объема среды

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho A \omega^2 \cos^2 \omega \left( t - \frac{x}{c} \right),$$

где  $\rho$  — плотность среды, в которой распространяется волна;  $c$  — скорость звука в этой среде;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота.

Средняя кинетическая энергия в единице объема за период

$$\bar{E} = (1/4) \rho A^2 \omega^2.$$

Полная средняя энергия в единице объема за период

$$\bar{E}_r = 0,5 \rho A^2 \omega^2 = 2\pi^2 f^2 \rho A^2 = 0,5 \rho V^2,$$

где  $V$  — амплитуда колебательной скорости. (Единица измерения плотности энергии эрг/см<sup>3</sup> или Вт·с/см<sup>3</sup>.)

Так как в волновом процессе наблюдается перенос энергии, то существует понятие, характеризующее количество энергии, проходящее в единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны. Это характеристика интенсивности или силы звука Вт/см<sup>2</sup>:

$$I = E_c = \frac{1}{2} \rho c V^2 = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2.$$

Все основные величины, определяющие применение ультразвуковых колебаний в технологических процессах, т. е. максимальные значения смещения, колебательной скорости и ускорения час-

тиц среды, в которой распространяется волна, зависят от интенсивности звука и определяется по формулам:

$$V = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; B = 2\pi f \sqrt{\frac{2I}{\rho c}},$$

где  $B$  — амплитуда звукового давления.

Все вышесказанное позволяет сформулировать требования, выполнение которых необходимо при конструировании ультразвуковых систем для обработки материалов давлением:

резонансная длина однородной волноводной системы должна быть кратна  $\lambda/2$ ;

узловые сечения, в которых смещение и скорости равны нулю, могут использоваться для крепления системы в траверсе или ползуне процесса;

сечения с узлами усилий, напряжений и деформаций (пучности смещения) удобны для сочленения отдельных элементов волноводной системы.

При операции пробивки могут быть применены три схемы подвода ультразвуковой энергии в очаг деформации с расположением заготовки как в пучности колебаний, так и в пучности напряжений. В зависимости от применения той или иной акустической схемы необходимо произвести расчет волноводов, которые служат в данных схемах инструментом. В зависимости от размеров деталей волноводы могут быть выполнены цилиндрическими, ступенчатыми, коническими, экспоненциальными.

Приведем порядок расчета инструмента перечисленных форм. Резонансная полуволновая длина волновода с нейтральными насадками  $l_p = \lambda/2 = c_l/2f$ , где  $\lambda$  — длина волны;  $c_l$  — скорость распространения продольных звуковых волн в материале волновода;  $f$  — частота вынужденных колебаний, распространяющихся по волноводу, равная собственной частоте  $f_0$  магнитострикционного преобразователя.

Крепежный фланец цилиндрического волновода или координата переходного сечения для ступенчатого волновода должны совпадать с координатой узла смещения  $x_0 = l_p/2 = c_l/4f$ .

Теоретический коэффициент усиления амплитуды для такого волновода равен квадрату отношения диаметров входного и выходного сечений:  $K_y = (D_0/d)^2 = N^2$ .

Для повышения усталостной прочности ступенчатых концентраторов необходимо в месте сочленения разных диаметров выполнить плавный переход. В случае крепления на конце вышерассчитанных волноводов насадок-инструментов, масса которых мала по сравнению с массой волновода, их влиянием на колебательный режим концентратора можно пренебречь и не вносить поправок в расчетную длину волновода.

Резонансная длина конического волновода  $l = (\lambda/2)\xi_k$ , где  $\xi_k = \varphi/\pi$ , а  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\varphi}{(y^2 N) / (1 - N^2) + 1}$ . Здесь  $(y^2 N) / (1 - N^2)$  — отношение входного и выходного сечения концентраторов.

Данные, полученные на основании номограммы, затем проверяются при подгонке рассчитанных волноводов к магнитоотражающему преобразователю. Подгонка производится по совпадению частот систем магнитоотражающий — магнитоотражающий + волновод.

В связи с тем, что конический волновод переходит в цилиндрический инструмент — пассивную насадку, необходимо выполнить поправочный расчет. Пассивная насадка может быть представлена как сосредоточенная масса, присоединенная к концентратору. Так как эта масса приводит к нарушению колебательно-го режима, то необходимо укоротить концентратор на

$$\Delta l = \frac{s' \rho}{S \rho_1} h,$$

где  $S_1$  — площадь узкого конца концентратора;  $\rho_1$  — плотность материала концентратора;  $s'$  — площадь поперечного сечения насадки;  $\rho$  — плотность материала насадки;  $h$  — высота насадки.

Площадь сечения волновода, выполненного в виде крупного стержня с экспоненциальным изменением сечения:

$$S_1 = s e^{-Lx},$$

где  $S_1$  — площадь наибольшего (входного) сечения;  $s$  — площадь определяемого сечения;  $L$  — показатель экспоненты;  $x$  — координата определяемого сечения от выходного.

Для расчета необходимо найти коэффициент усиления  $K_1$ , определяемый как

$$K_1 = \sqrt{S_1/S_2} = \sqrt{D_1^2/D_2^2},$$

где  $D_1$  — диаметр входного сечения  $S_1$ ;  $D_2$  — диаметр выходного сечения  $S_2$ .

$$\text{Длина концентратора } l = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln x}{\pi}\right)^2}.$$

$$\text{Далее вычисляется показатель экспоненты: } L = \frac{2 \ln x}{l}.$$

После расчета и определения  $K_1$ ,  $l$  и  $L$  вычисляются диаметры (площади):

$$D_i = D_1 e^{-Lx}.$$

Место узла скорости упругих колебаний, т. е. место крепления фланца:

$$x_0 = \frac{l}{\pi} = \arctg \left( \frac{1}{\pi} \ln x \right).$$

При проведении экспериментов за основу проектирования была принята схема штампа с прижимом материала и расположением заготовки в пучности колебаний с приводом как пуансонов, так и матрицы. Инструментом являлись полуволновые концентраторы комбинированного типа. Нижняя плита, изготовленная за-

одно с матрицей, представляет собой конический волновод с раз-  
витым фланцем. Фланец расположен в узле скоростей, матри-  
ца — в пучности колебаний.

Отношение диаметров входного и выходного сечения концент-  
ратора принято следующим:  $N=65/36=1,8$ . По номограмме на-  
ходим  $l_k=0,52\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны для стали 45, из которой  
изготовлен волновод:

$$\lambda = c_l / f.$$

Здесь  $c_l$  — скорость распространения продольных звуковых волн  
в материале волновода (для стали 45  $c_l=5169$  м/с);  $f$  — частота  
вынужденных колебаний (принимается равной 17,6 кГц):

$$\lambda = 516,9/17,6 = 29,4 \text{ мм}; \quad l_k = 0,52\lambda = 153 \text{ мм}.$$

Узел колебаний находится так:  $x_0=0,55$  от входного сечения  
по координате  $x=84$  мм. Таким образом, длина основного эле-  
мента штампа пуансона должна составлять примерно 150 мм.

На основании выполненных расчетов и выбранного варианта  
конструкции элементов штампа разработано техническое задание  
на проектирование специальных установки и штампа. Установле-  
но, что при проектировании штампов необходимо учитывать сле-  
дующие основные требования:

1. Необходимо по возможности создавать концентрированный  
прижим вокруг пробиваемых отверстий.

2. Прижим-съемник является направлением для пуансонов, а  
следовательно, зазор между рабочим размером пуансона и со-  
ответствующим ему размером отверстия в съемнике должен вы-  
полняться по посадке  $A/C$ .

3. Неперпендикулярность осей отверстий в пуансонодержате-  
ле, прижиме и матрице к плоскости разреза штампа не должна  
превышать 0,005 мм.

4. Несоосность осей соответствующих отверстий в пуансонодер-  
жателе, прижиме и матрице не допускается.

5. Применение штифтовых колонок дополнительного направле-  
ния обязательно.

6. Материал пуансонов выбирается таким, чтобы он мог обес-  
печивать структуру после закалки — мелкозольчатый мартенсит  
с равномерным распределением карбидов. Твердость пуансонов  
после закалки HRC58—62 (быстрорежущая сталь P9K5 и др.).

7. Пуансоны после шлифовки необходимо подвергать довод-  
ке и электрополировке.

8. Конструкция штампа должна обеспечивать быстроту  
пуансонов и удобство обслуживания.

Экспериментальные исследования по пробивке монтажных отверстий бы-  
ли проведены совместно с Омским политехническим институтом. В соответст-  
вии с разработанными требованиями был сконструирован и изготовлен штамп.  
Конструктивно штамп выполнен так, что матрица закреплена на нижней плите  
штампа. Усилие прижима заготовки осуществляется через плиту-прижим, за-

крепленную на средней плите штампа. Извлечение пуансонов осуществляется с помощью съемника, закрепленного на верхней плите штампа.

Работа штампа осуществляется следующим образом. В исходном положении штамп разомкнут. Заготовка устанавливается на матрице и фиксируется по штифтам. Затем осуществляется смыкание штампа и создается необходимое усилие прижима. Пуансоны, упираясь в заготовку плиты рабочей частью, выступают над плоскостью съемника на 2—3 мм. Волновод, перемещаясь вниз вместе с магнитострикционным преобразователем, нажимает на головку пуансонов и пробивает заготовку. В момент касания волноводом головок пуансонов подаются ультразвуковые колебания. После пробивки заготовки ультразвуковые колебания выключаются и волновод отводится вверх. Затем осуществляется съем пуансонов и штамп размыкается. В штампе активный волновод имеет массу, значительно превосходящую массу пуансонов. Волновод выполнен в соответствии с акустическими требованиями, т. е. является стержнем длиной, кратной целому числу полуволн, а остальные части штампа изготовлены в соответствии с технологическими и конструктивными решениями.

В качестве технологических факторов, которыми определяется процесс пробивки с применением энергии ультразвука, были приняты:

интенсивность введенных в очаг деформации ультразвуковых колебаний (амплитуда колебаний);

время озвучивания, т. е. время воздействия энергии ультразвука на процесс пробивки. При данных исследованиях эта величина определялась скоростью рабочего органа пресса и толщиной материала, так как в исследованиях ультразвук подавался в зону пробивки, начиная от контакта пуансона с материалом до прохода пуансоном толщины материала;

степень снижения усилия деформирования между пуансоном и матрицей;

усилие прижима;

температура в очаге деформации.

Для получения экспериментальных данных о влиянии каждого из перечисленных технологических факторов на процесс пробивки была разработана ультразвуковая установка с контрольно-измерительными приборами (рис. 7). На этой установке проводились исследования амплитуды смещения инструмента и частоты продольных ультразвуковых колебаний (их связи со степенью

снижения статического усилия пробивки), а также определение температуры в зоне пробивки. Источником ультразвуковых колебаний являлся генератор УЗГ-2-10 с акустической обратной связью. Колебательная система состояла из магнитострикционного преобразователя типа ПМС-15А-18, экспоненциального концентратора и пуансона. Операция пробивки проводилась на испытательной

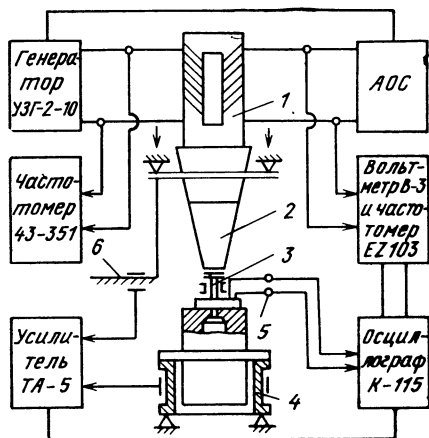


Рис. 7. Схема экспериментальной ультразвуковой установки с контрольно-измерительными приборами:

1 — магнитострикционный преобразователь; 2 — волновод; 3 — пуансон; 4 — пресс; 5 — термопара; 6 — тензодатчик хода инструмента

машине ГРМ-50. Измеряемые величины записывались на осциллограмму на осциллографе К-115.

На основании полученных данных по результатам эксперимента были сделаны следующие выводы:

1. Усилие пробивки при штамповке отверстий тест-плат с наложением ультразвуковых колебаний уменьшается в 10—15 раз по сравнению с обычной штамповкой.

2. Применение ультразвука резко повышает качество пробиваемых отверстий, отсутствуют сколы и ореолы вокруг отверстий.

3. Появляется возможность металлизации отверстий, получаемых штамповкой в заготовках из фольгированного стеклотекстолита.

4. Диаметры получаемых отверстий соответствуют диаметрам пуансонов, по точностным характеристикам отверстия соответствуют предъявляемые требованиям.

В настоящее время отверстия под металлизацию в ДПП и МПП целесообразно получать сверлением. Обработку отверстий в ПП следует выполнять твердосплавных комбинированных и спиральных сверл. Наилучшие результаты по стойкости дают сверла, изготовленные из твердого сплава марок ВК6-М и ВК60-М.

Одним из основных факторов, влияющих на качество обрабатываемых в ДПП и МПП отверстий и стойкость применяемого инструмента, является правильный выбор геометрических параметров режущей части сверл. Исследования проводились применительно к МПП.

Обычно для определения рациональных значений геометрических параметров инструмента используются стойкостные испытания, исследования динамики процесса и другие методы. В данном случае для повышения качества обрабатываемых отверстий были исследованы зависимости различных углов при вершине ( $2\phi$ ), угла наклона винтовой канавки ( $\psi$ ) и толщины сердцевины от интенсивности образования характерных дефектов при сверлении МПП. Проследить визуально за явлениями, происходящими во время обработки отверстий в МПП невозможно из-за скоротечности процесса сверления. Поэтому для определения характера воздействия различных значений геометрических параметров на процессы врезания, выхода инструмента из обрабатываемого изделия, а также на процессы образования и удаления стружки из зоны резания был использован метод высокоскоростной киносъемки.

В результате эксперимента определены рациональные конструктивные и геометрические параметры режущей части инструмента для сверления металлизированных отверстий в ДПП и МПП. Эти данные позволили разработать ГОСТ 22093—76 и ГОСТ 22095—76, которые регламентируют основные геометрические и конструктивные параметры сверл.

От режимов резания зависит производительность обработки, стойкость инструмента и качество отверстий. В процессе механической обработки отверстий в МПП необходимо получить такую



поверхность, состояние, структура и шероховатость которой обеспечивали бы, во-первых, наибольшую адгезию осаждаемой в отверстиях меди к диэлектрическому основанию платы, во-вторых, надежную электрическую связь металлизированного пистона со всеми контактными площадками слоев печатных схем плат. Рациональные значения режимов резания при сверлении печатных плат с учетом высокой прочности сцепления металлизированных пистонов и контактных площадок с основанием платы были определены и описаны в [13].

Для получения качественных межслойных соединений в МПП к отверстиям в плате предъявляются ряд повышенных требований, связанных с отсутствием дефектов на поверхности отверстия, таких как наволакивание материала диэлектрика на торцы контактных площадок, некачественный срез фольги и образование заусенцев.

В результате исследований установлено, что скорость резания при сверлении металлизированных отверстий ДПП и МПП должна быть не ниже 40 м/мин. Однако при сверлении со скоростью, значительно превышающей 40 м/мин, нередки случаи, когда МПП бракуется из-за отсутствия в одном или нескольких переходных отверстий электрического контакта. При просмотре шлифов отверстий, вскрытых вдоль их оси, установлено, что причиной нарушения контакта печатных плат промежуточных слоев МПП с металлизированным пистоном является наволакивание частиц диэлектрика на поверхность обработанного отверстия. Очевидно, это происходит из-за оплавления смолы, возникающего в процессе резания под действием образующегося тепла.

Известно, что теплостойкость слоистых пластиков ограничивает скорости резания при различных видах их механической обработки, так как может развиваться температура, значительно превышающая теплостойкость материала. Кроме того, низкая теплопроводность слоистых пластиков при воздействии температуры способствует длительной локализации тепла в узкой зоне нагрева, что, в свою очередь, может вызвать частичное испарение, обугливание и оплавление низкотермостойкого связующего.

Определение максимальной температуры в зоне резания с учетом режимов резания позволит установить характер воздействия тепловых явлений на качество отверстий в МПП.

Изучение литературных источников и результаты предварительных исследований показали, что наиболее рациональным способом измерения температуры при сверлении специальными твердосплавными спиральными сверлами ОПП, ДПП и МПП можно считать метод естественной термопары. При измерении температуры в зоне резания этим методом для возникновения термоэлектродвижущей силы необходимо наличие замкнутой электрической цепи между инструментом, обрабатываемой деталью и регистрирующим прибором. Следовательно, инструмент и деталь должны быть токопроводящими. В данном случае основание МПП явля-

ется диэлектриком, поэтому для замыкания цепи использовались ее промежуточные слои.

Измерение температуры при сверлении фольгированных диэлектриков мелкогазмерными твердосплавными сверлами представляет определенные трудности из-за отсутствия апробированных, надежных конструкций токосъемников, которые должны обладать повышенными точностью и стабильностью показаний.

Для съема термо-электродвижущей силы со сверла, вращающегося с большой частотой вращения, был сконструирован и опробован специальный токосъемник скользящего типа. Практика показала, что наиболее часто в МПП применяются контактные и монтажные отверстия диаметров 0,8—2 мм, поэтому исследования проводились при сверлении отверстий твердосплавными спиральными сверлами с рациональной геометрией режущей части диаметров: 0,8; 1; 1,3; 1,5; 1,8; 2 мм. В качестве обрабатываемого материала использовались шести- и восьмислойные тест-платы. Опыты проводились на станке модели ЛС-1. Для тарирования термомпары твердый сплав — медь был использован электронный потенциометр типа ЭПД-09 класса 0,5 (ГДР), шкала которого градуирована в градусах Цельсия для термомпары хромель-альмель. Схема градуирования и полученный градуировочный график представлены на рис. 8 и 9.

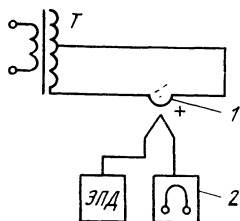


Рис. 8. Схема градуирования:  
1 — нагреватель; 2 — гальванометр осциллографа

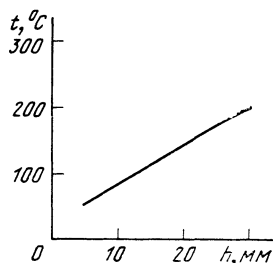


Рис. 9. Градуировочный график

На рис. 10 и 11 показаны соответственно схема процесса сверления шестислойной платы и полученная осциллограмма. Из осциллограммы видно, что по мере врезания сверла в первый слой фольги происходит рост температуры, продолжающийся до момента выхода режущей части сверла из фольги этого слоя (точка 1 на осциллограмме). Затем температура незначительно падает, после чего снова возрастает. Точка 2 соответствует моменту выхода режущей части сверла из фольги второго слоя. Указанный характер изменения температуры в зоне резания повторяется при прохождении сверлом остальных слоев фольги МПП (точки 3, 4, 5, 6). Таким образом, при сверлении МПП наибольшая температура будет в момент прохождения режущей части сверла слоев фольги. Так как процесс протекает непрерывно, то до выхода

вершины сверла из обрабатываемой платы, что соответствует прохождению фольги пятого слоя, температура резания постепенно повышается. В тот момент, когда режущая часть сверла проходит фольгу шестого слоя, температура начинает понижаться, так как вершина сверла выходит из обрабатываемого изделия. При выходе режущей части сверла из платы температура значительно понижается и затем стабилизируется (участок между точками 7,

8), что характеризует работу трения ленточки цилиндрической части сверла об обработанную поверхность отверстия. По мере выхода сверла из просверленного отверстия температура продолжает падать (участок между точками 8, 9).

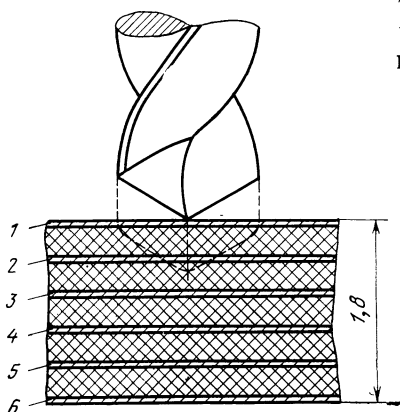


Рис. 10. Схема процесса сверления шестислойной тест-платы

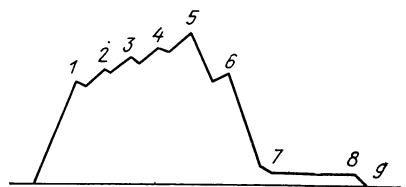


Рис. 11. Осциллограмма температуры резания при сверлении отверстий в МПП

Опыты повторялись по пять раз, проверка воспроизводимости, выполнявшаяся по критерию Кохрана, давала положительный результат. Затем выводилось среднее значение температуры в зоне резания  $\theta_{\text{ср}}$ , соответствующее определенному режиму сверления.

Исследование влияния скорости резания на температуру в зоне резания проводилось при постоянной подаче  $S=0,03$  мм/об. Скорость резания устанавливали от 9,7 до 58,5 м/мин (для сверления отверстий диаметром 1 мм частота вращения соответствовала от 3080 до 18510 мин<sup>-1</sup>).

При исследовании влияния подачи на температуру в зоне сверления скорость оставалась постоянной  $V=40,8$  м/мин, а значение подач измерялось от 0,01 до 0,08 мм/об.

Исследования влияния диаметра сверла на температуру в зоне сверления проводились при постоянной скорости резания  $V=40,8$  м/мин и постоянной подаче  $S=0,03$  мм/об сверлами диаметрами 0,8; 1; 1,3; 1,5; 1,8 и 2 мм. Результаты измерений представлены в табл. 2.12.

Влияние скорости резания, подачи и диаметра сверла на температуру в зоне резания может быть выражено следующей зависимостью:

$$\theta = C_{\theta} V^x S^y d^z, \quad (2.1)$$

Таблица 2.12

Скорость резания, м/мин	Частота вращения мин <sup>-1</sup>	Подача мм/об.	Диаметр сверла, мм	Среднее значение температуры, °С	Скорость резания, м/мин	Частота вращения мин <sup>-1</sup>	Подача мм/об.	Диаметр сверла, мм	Среднее значение температуры, °С
9,7	3080	0,03	1,0	80	40,8	13000	0,04	1,0	127
15,7	5000			03			0,06		130
24,5	7800			104			0,08		131
31,4	10000			106					
40,8	13000			124					
58,5	18510			147					
40,8	13000	0,01 0,02 0,03	1,0	94	40,8	13000	0,03	0,8	103
				104				1,3	110
				106				1,5	114
								1,8	118
								2,0	121

где  $C_\theta$  — коэффициент, характеризующий влияние материала сверла, геометрии режущей части на температуру в зоне резания;  $x, y, z$  — показатели степени, характеризующие влияние скорости резания, подачи и диаметра сверла на значение температуры в зоне резания.

Для оценки совместного влияния основных параметров резания ( $V, S, d$ ) на значение  $\theta$  применен метод наименьших квадратов с использованием ЭВМ М-20. В соответствии с этим параметры формулы (2.1)  $C_\theta, x, y, z$  с достаточно высокой степенью точности были установлены аппроксимацией таблично заданной зависимости  $\theta_i(V_i, S_i, d_i)$  функцией вида  $C_\theta, V^x, S^y, d^z$ . Указанные параметры определялись из условия, что сумма квадратов отклонений по всем точкам таблично заданной функции от искомой минимальна. Иначе, необходимо найти такие значения  $C_\theta, x, y, z$ , которые минимизируют функцию

$$F = \sum_{i=1}^{17} [C_\theta V_i^x S_i^y d_i^z - \theta_i(V_i, S_i, d_i)]^2 = F(C_\theta, x, y, z).$$

Из-за нелинейности искомой функции трудно воспользоваться методом поиска экстремума, заключающимся в нахождении частных производных от  $F$  и решений системы уравнений. Поэтому целесообразно применить метод градиента поиска минимума функции.

Согласно этому методу задавалось начальное приближение аргументов  $C_{\theta_0}, x_0, y_0, z_0$  и в этой точке находился вектор градиента

$$\bar{g} = \text{grad } F(C_{\theta_0}, x_0, y_0, z_0) = \left\{ \frac{\partial F}{\partial C_\theta}, \frac{\partial F}{\partial x_0}, \frac{\partial F}{\partial y_0}, \frac{\partial F}{\partial z_0} \right\},$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = F(x_1, x_2, \dots, x_i + S_i, \dots, x_n) - F(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $x_i$  — параметры  $(C_{\theta_0}, x_0, y_0, z_0)$ ;  $S_i$  — единичное приращение.

Из точки  $x_i$  в направлении, противоположном направлению вектора  $g(x_i)$ , двигались с заданным шагом  $h$ , где  $h = \sqrt[4]{\sum_i (\Delta x_i)^2}$ .

Если после первого шага в выбранном направлении  $F$  возрастало, то возвращались к исходной точке и уменьшали шаг  $h$  в два раза. Если  $F$  снова возрастала, то шаг сокращали еще в два раза и т. д., пока не наступало уменьшение  $F$ .

Допустим, что это произошло при  $h/k$ , тогда следующее направление  $\text{grad}$  определялось в предыдущей точке и совершался шаг из нее величиной  $h/(k+1)$ . Как только  $h(k+1) < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданная величина, задача считалась решенной.

Для составления программы ЭВМ параметры  $\varepsilon$ ,  $h$ ,  $\delta_i$  были выбраны в соответствии с тем, что  $x$ ,  $y$ ,  $z$  меньше единицы и для достижения необходимой точности вычисления брались  $\varepsilon = 0,0001$ ;  $h = 0,1$ ;  $\delta_i = 0,001$ .

В результате проведенных вычислений с применением ЭВМ М-20 получены следующие данные:  $C_\theta = 71,8999$ ;  $x = 0,3203$ ;  $y = 0,1899$ ;  $z = 0,1624$ .

Округляя эти значения, получаем  $C_\theta = 71,9$ ,  $x = 0,32$ ,  $y = 0,19$ ,  $z = 0,16$ . Значение  $F$  равно 454. Так как  $F = \sum_{i=1}^{17} (\Delta F)^2$ , то  $\Delta F_{\text{средн}} = \sqrt{\frac{454}{17}} = 5,2$ .

Таким образом, среднее отклонение найденной аппроксимированной функции от табличных соответствует  $-5,2$ , что составляет ошибку аппроксимации 5%.

Итак, влияние скорости резания, подачи и диаметра на температуру характеризуется следующей формулой:

$$\theta = 71,9V^{0,32}S^{0,19}d^{0,16}. \quad (2.2)$$

На основании проведенных экспериментов и формулы (2.2) видно, что с увеличением скорости резания значение  $\theta$  увеличивается. Причем увеличение  $\theta$  отстает от роста скорости. Так, увеличение скорости при сверлении МПП в 6 раз (с 9,7 до 58,5 м/мин) привело к увеличению  $\theta$  всего в 1,5 раза (с 80 до 147° С). Из сравнения показателей степени формулы (2.2) видно, что на величину  $\theta$  наибольшее влияние оказывает скорость резания по сравнению с подачей. Изменение диаметра сверла в пределах 0,8—2 мм влияет на  $\theta$  слабее, чем подача. Различное влияние подачи и диаметра на  $\theta$  можно объяснить следующими причинами. С увеличением подачи приток тепла в сверле за счет стружкообразования возрастает, в то время как температура режущей кромки остается постоянной. Низкая теплопроводность материала МПП и твердого сплава при этом будет, очевидно, способствовать более значительному повышению  $\theta$  на контактных площадках трущихся поверхностей.

С увеличением диаметра сверла пропорционально увеличивается длина главных режущих кромок инструмента, участвующего

в работе, а следовательно, теплоотвод при постоянных скорости и подаче с ростом глубины будет происходить в более благоприятных условиях, чем при возрастании подачи.

В рассмотренных опытах использовался острозаточенный инструмент. При определении наибольшей температуры в зоне резания необходимо учесть, что в процессе работы сверла изнашиваются в прямой зависимости от числа отверстий в МПП и обработки их на специальных станках. Непрерывное сверление вызывает приращение температуры. В результате проведенных дополнительных экспериментов было установлено влияние износа сверла на температуру в зоне резания. Приращение температуры в результате износа сверла составило  $58^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, наибольшее значение температуры в зоне резания при сверлении МПП может быть определено по формуле

$$\theta = t_1 + \Delta t, \quad (2.3)$$

где  $t_1$  — наибольшее табличное значение температуры в зоне резания;  $\Delta t$  — приращение температуры, вызванное износом инструмента.

Подставляя в (2.3) опытные данные, получаем наибольшее значение температуры в зоне резания при сверлении отверстий в МПП, равное  $205^{\circ}\text{C}$ .

В результате проведенных работ определены характер тепловых явлений и наибольшее значение температуры в зоне резания при сверлении МПП. Выявлено, что при обработке отверстий с соблюдением ранее разработанных рекомендаций (специальный твердосплавный инструмент, рациональные режимы резания при скоростях до  $88,5$  м/мин и т. д.) образование характерных дефектов (частичное испарение, обугливание и оплавление смолы) на обрабатываемой поверхности не происходило. Это объясняется следующим. Во-первых, теплостойкость до настоящего момента остается единственным специфическим фактором, характеризующим способность как фольгированных, так и конструкционных стеклопластиков сохранять свою структуру и физико-механические свойства при нагреве. В данном случае теплостойкость обрабатываемого материала и наибольшее значение температуры в зоне резания примерно одинаковы. Во-вторых, время воздействия температуры на материал МПП чрезвычайно мало и составляет  $0,3$  с (при  $V=40$  м/мин и  $S=0,03$  мм/об.). Однако в настоящее время существующие отечественные и зарубежные сверлильные станки с ЧПУ позволяют обрабатывать ПП при скорости до  $300$  м/мин. Эксперименты, проведенные на высоких скоростях резания, показали, что при сверлении с частотой вращения  $80\,000$  мин $^{-1}$  ( $V=250$  м/мин) имеются случаи обугливания поверхности отверстий, прижоги в канавках твердосплавных сверл.

На основании полученной расчетной формулы и метода экстраполяции установлено, что температура на указанной скорости составляет  $425^{\circ}\text{C}$ , это в два раза превышает теплостойкость обрабатываемых материалов.

Таким образом, найдены рациональные режимы сверления при обработке металлизированных отверстий в ДПП и МПП: скорость резания  $V=40—220$  м/мин (т. е. частота вращения до  $75\,000\text{ мин}^{-1}$ ) и подача  $S=0,02—0,07$  м/мин. Сверление металлизированных и монтажных отверстий следует производить на специальных сверлильных станках и станках с ЧПУ.

Для получения отверстий без зенкования следует применять твердосплавные спиральные сверла ГОСТ 22093—76 и ГОСТ 22094—76, а при сверлении и одновременном притуплении острых кромок лучше использовать твердосплавные комбинированные сверла ГОСТ 20686—75.

Для проверки качества обработки и глубины сверления следует производить пробное сверление отверстий на технологическом поле платы. Обработку необходимо производить с подкладкой, помещаемой со стороны выхода сверла. В качестве подкладки следует использовать листовой электротехнический гетинакс толщиной  $0,8—1,5$  мм.

Перед выполнением операции пробивки или сверления отверстий рабочие поверхности оснастки и инструмента необходимо обезжирить хладоном-113. Применение смазочно-охлаждающих жидкостей недопустимо.

Предельные отклонения размеров диаметров монтажных отверстий в зависимости от класса точности ПП устанавливают в соответствии с табл. 2.13.

Т а б л и ц а 2.13

Размер отверстия, мм	Наличие металлизации	Предельные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий, мм			
		Класс точности			
		1	2	3	4
До 1 включительно	Нет	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
	Есть	$+0,10$	$+0,10$	$+0,05$	$+0,05$
		$-0,15$	$-0,15$	$-0,10$	$-0,10$
Свыше 1	Нет	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$
	Есть	$\pm 0,15$	$+0,15$	$+0,10$	$+0,10$
		$-0,20$	$-0,20$	$-0,50$	$-0,15$

Центры монтажных отверстий на ПП располагают в соответствии с ГОСТ 10317—79.

Диаметральный позиционный допуск расположения центров отверстий относительно номинального положения узла координатной сетки выбирают в соответствии с табл. 2.14.

Параметр шероховатости поверхности  $R_z$  по ГОСТ 2789—73 отверстий, получаемых сверлением, не должен превышать  $40\text{ мкм}$ .

Заполировка, поджог и засаливание поверхности отверстий не допускаются.

Т а б л и ц а 2.14

Размер платы по большей стороне, мм	Диаметральный позиционный допуск расположения центров отверстий относительно номинального положения, мм			
	Класс точности			
	1	2	3	4
До 180 включительно	0,20	0,15	0,08	0,05
Свыше 180 до 360 включительно	0,25	0,20	0,10	0,08
Свыше 360	0,30	0,25	0,15	—

Ширина поверхностных сколов, посветлений (ореолов) на заготовке ПП вокруг отверстий не должна превышать величины, указанной в табл. 2.15.

Т а б л и ц а 2.15

Материал основания	Допустимая ширина поверхностных сколов, посветлений (ореолов) на заготовке ПП при толщине материала, мм						
	До 0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Гетинакс	—	—	0,8	1,1	1,3	1,6	2,0
Стеклотекстолит	0,3	0,4	0,6	1,0	1,2	1,4	1,7

Расстояние от скола, посветления до соседнего элемента проводящего рисунка не должно быть менее 0,3 мм, если на чертеже не указаны другие требования.

Особое значение имеет операция подготовки поверхности отверстий в МПП и ДПП под металлизацию (особенно в МПП имеет место наволакивание на торцах внутренних контактных площадок). Для снятия наволакивания на торцах внутренних контактных площадок и подготовки поверхности отверстий в МПП и ДПП под металлизацию следует производить их очистку на установках гидроабразивной зачистки прокачиванием абразивной суспензии через обрабатываемые отверстия или подачей ее под давлением с помощью форсунок. Эта операция выполняется на отечественных и импортных специальных установках (типа Blast W 121).

Толщина заготовок, обрабатываемых на установке гидроабразивной зачистки путем прокачивания абразивной суспензии, должна быть не менее 0,8 мм.

В качестве абразивного материала на установке гидроабразивной зачистки путем прокачивания суспензии через отверстия рекомендуется использовать абразивные порошки марок 63С, 24А или 14А. Массовое соотношение абразивного порошка и воды в камере очистки 1:3. Суммарная площадь обрабатываемых и пусковых отверстий рекомендуется в пределах  $6000 \pm 600 \text{ мм}^2$ .



Т а б л и ц а 2.16

Наименование операции	Наименование дефекта	Способы устранения характерных дефектов
Пробивка отверстий	Трещины по контуру отверстий	Проверить степень штампуемости материала Ввести подогрев заготовок до 80—90°С Проверить соосность пуансонов и матрицы и равномерность зазоров между ними Ввести пробивку с прокладкой из электроизоляционного картона марки ЭВ толщиной 1 мм, помещаемой между съемником и платой; каждую прокладку, не снимая со съемника, использовать для пробивки 70—80 плат Увеличить прижим заготовок Прошлифовать матрицу и пуансоны
	Сквозные трещины по перемычке между двумя рядом расположенными отверстиями	Проверить степень штампуемости материала Предусмотреть пробивку отверстий в двух или нескольких штампах с целью увеличения ширины перемычки между одновременно пробиваемыми отверстиями
	Ореолы по контуру отверстия	Проверить зазор между пуансонами и отверстиями в съемнике Прошлифовать матрицу и пуансоны и удалить заусенцы Ввести пробивку с прокладкой из электроизоляционного картона ЭВ толщиной 1 мм, помещаемой между съемником и платой; каждую прокладку, не снимая со съемника, использовать для пробивки 70—80 плат Увеличить прижим заготовок
Сверление отверстий	Сколы на поверхности	Ввести подогрев заготовок до 80—90°С Проверить зазор между пуансонами и матрицей Прошлифовать матрицу и пуансоны и удалить заусенцы Ввести пробивку с прокладкой из электроизоляционного картона марки ЭВ толщиной 1 мм, помещаемой между съемником и платой; каждую прокладку, не снимая со съемника, использовать для пробивки 70—80 плат Увеличить прижим заготовки
	Заусенцы на входе и выходе сверла	Ввести подогрев заготовок до 80—90°С Проверить геометрические параметры сверл на соответствие требованиям стандартов на сверла Проверить наличие двухплоскостной заточки режущей части сверла Переточить или заменить сверло Проверить биение сверла, закрепленного в шпинделе станка Увеличить скорость и уменьшить подачу (или уменьшить скорость и увеличить подачу) в пределах рекомендуемых режимов резания

Наименование операции	Наименование дефекта	Способы устранения характерных дефектов
Очистка отверстий продавливанием абразивной суспензией Очистка отверстий подачей абразивной суспензии под давлением	Отслоение фольги от диэлектрика	<p>Проверить геометрические параметры сверла на соответствие требованиям стандартов на сверла</p> <p>Проверить наличие двуплоскостной заточки режущей части сверла</p> <p>Переточить или заменить сверло</p> <p>Положить под заготовку платы подкладку из гетинакса</p> <p>Увеличить скорость и уменьшить подачу (или уменьшить скорость и увеличить подачу) в пределах рекомендуемых режимов резания</p> <p>Проверить прочность сцепления фольги с диэлектриком</p> <p>Увеличить прижим заготовки</p>
	Ореолы (посветления) диэлектрика	<p>Проверить геометрические параметры сверла на соответствие требованиям стандартов на сверла</p> <p>Проверить наличие двуплоскостной заточки режущей части сверла</p> <p>Переточить или заменить сверло</p> <p>Положить подкладку под заготовку платы со стороны диэлектрика</p> <p>Увеличить прижим заготовки</p> <p>Увеличить скорость и уменьшить подачу (или уменьшить скорость и увеличить подачу) в пределах рекомендуемых режимов резания</p>
	Заполировка, поджог засаливание поверхности	<p>Уменьшить скорость и увеличить подачу в пределах рекомендуемых режимов резания</p>
	Заусенцы по контуру отверстий, заполировка и засаливание поверхности отверстий из-за налипания меди и стеклотекстолитовой пыли на сверло Наволакивание полностью не устранено	<p>Проверить качество поверхности режущей части и винтовых канавок сверл на соответствие ГОСТ 20686—75</p> <p>Уменьшить скорость резания и увеличить подачу в пределах рекомендуемых режимов резания</p>
	То же	<p>Проверить качество однородности абразивной суспензии после барботирования</p> <p>Увеличить время обработки</p> <p>Установить дополнительные заглушки в перепускные отверстия загрузочной рамы</p> <p>Уменьшить скорость конвейера</p> <p>Увеличить давление воздуха в форсунках</p>

Время очистки отверстий 3—12 мин. После очистки отверстия следует промыть проточной водой для удаления остатков абразива с поверхности.

В качестве абразивного материала на установке гидроабразивной зачистки путем подачи суспензии под давлением рекомендуется применять абразивные порошки марок 24А или 63С. Массовое соотношение порошка и воды в камере зачистки 1 : 2.

Режимы гидроабразивной очистки отверстий путем подачи суспензии под давлением следующие: давление воздуха в форсунках 0,55—0,7 МПа; скорость конвейера 0,2—0,35 м/мин; число качаний форсунок в минуту не менее 35.

В настоящее время одним из современных методов подготовки поверхности под металлизацию является плазмохимическая очистка отверстий в МПП от наволакивания связующего на установке «Плазма 3000-1» фирмы «Техникс» (ФРГ) [21]. Заготовки МПП в этой установке обрабатываются в газовой плазме, содержащей кислород и фреон (тетрафторметан). В вакуумной камере при давлении  $10^{-3}$  мм рт. ст. (0,1 Па) создается низкочастотное поле. Энергия поля возбуждает электроны так, что вследствие ударной реакции достигается такое состояние газовой плазмы, в которой наряду с электронами находятся ионы в различных стадиях возбуждения и свободные радикалы. Все эти частицы химически чрезвычайно активны и быстро вступают в реакции с образованием стабильных соединений.

Плазмохимическая очистка отверстий в МПП имеет следующие преимущества: исключаются трудно управляемый процесс обработки отверстий с применением смеси плавиковой и серной кислот и процесс нейтрализации кислот, улучшаются условия труда.

При условии выполнения всех вышеуказанных рекомендаций по получению отверстий в ПП гарантируется необходимое качество, однако в производственных условиях часто возникают те или иные характерные дефекты. В табл. 2.16 приведены способы устранения характерных дефектов, которые могут возникнуть в отдельных случаях в производственных условиях.

### 2.1.3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЗАЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ

В технологическом процессе изготовления ОПП, ДПП и МПП предусмотрена операция подготовки поверхности. Обычно эта операция выполняется перед нанесением защитной краски, масок, фоторезистов и пр. В настоящее время эта операция выполняется химическим, механическим и химико-механическим способами. Широкое распространение получил механический способ зачистки.

При механическом способе зачистки используются специальные установки и станки, оснащенные стальными или латунными щетками, упругими абразивными кругами или абразивными зачистными щетками.

За рубежом для операций зачистки поверхности ПП широко применяются абразивные круги и щетки фирмы Scotch-Brits, фирмы ЗМ (США) и станки фирм Resco (Италия), Schmid (ФРГ).

В нашей стране также разработаны конструкция, технология изготовления абразивных щеток и организован их серийный выпуск. Эти щетки обеспечивают: зачистку поверхности фольги на заготовках ПП и частичное удаление заусениц у отверстий (при высоте не более 20—25 мкм); сьем припуска с поверхности фольги в пределах 5 мкм.

Абразивные щетки набираются необходимой ширины из отдельных дисков (диски сделаны из объемного шлифовального полотна).

Для повышения качества обработанной поверхности в станках необходимо предусмотреть осциллирующие колебания.

Режимы резания при механической зачистке поверхности заготовок ПП абразивными зачистными щетками рекомендуется выбирать в следующих пределах:

скорость резания, м/мин	4,0—13,5
подача, м/мин	1—3
амплитуда осциллирующих колебаний, мм	4—6
число осциллирующих колебаний в минуту	70—120

#### 2.1.4. ОБРАБОТКА КОНТУРА

Для обработки контура ПП следует применять штамповку, отрезку на гильотинных ножницах, обработку алмазным кругом или фрезерование. Рекомендации по выбору метода обработки контура ПП в зависимости от типа производства и требований к качеству контура плат приведены в табл. 2.17.

Штамповка по контуру ПП осуществляется на вырубных штампах, требования к которым во многом аналогичны требованиям к вырубным штампам, используемым на операции получения монтажных отверстий в ПП. Отрезка на гильотинных ножницах трудностей не вызывает.

При отработке операции обработки ПП по контуру особое внимание было уделено разработкам конструкций алмазных отрезных кругов и специальным фрезам из твердого сплава для обработки ПП из стеклотекстолита прямолинейного и сложного контура ПП. Экспериментальные исследования по определению работоспособности специальных алмазных отрезных кругов проводились по следующим направлениям: определение оптимальных характеристик круга (толщины круга, размер и марка зерен); определение удельного износа круга; определение стойкости круга.

При проведении опытов за критерии оценки режущих способностей круга принимались: интенсивность изменения дефектов обработанной поверхности (разломачивание, сколы, ореолы и т. д.); интенсивность изменения шероховатости обработанной поверхнос-

Т а б л и ц а 2.17

Тип производства	Требования к качеству контура	Способ обработки контура печатной платы	
		ОПП и ДПП	МПП
Массовое и крупно-серийное	Допускаются поверхностные сколы, посветления	Вырубка в штампах на кривошипных прессах	Вырубка в штампах на кривошипных прессах Отрезка на прецизионной алмазной пиле или специальном станке для алмазной отрезки Фрезерование
	Не допускаются поверхностные сколы, посветления	—	Отрезка на прецизионной алмазной пиле или специальном станке для алмазной отрезки Фрезерование
Мелкосерийное и единичное	Допускаются поверхностные сколы, посветления	Отрезка на гильотинных ножницах Фрезерование	Отрезка на прецизионной алмазной пиле или специальном станке для алмазной отрезки Фрезерование
	Не допускаются поверхностные сколы, посветления	—	Отрезка на прецизионной алмазной пиле или специальном станке для алмазной отрезки Фрезерование

ти; интенсивность выкрашивания износившихся зерен алмазного порошка.

Для проведения всех исследований были изготовлены круги толщиной от 0,8 до 2 мм из алмазного порошка зернистостью от 80/60 до 200/160 марок АС6, АС15. Корпус кругов имел форму гладкого диска или диска с фланцами с обеих сторон. Характеристика кругов приведена в табл. 2.18.

Т а б л и ц а 2.18

Форма корпуса круга	Габаритные размеры			Алмазный порошок		
	Диаметр		Толщина рабочей части	Марка	Зернистость	Масса, кар.
	наружный	посадочный				
Диск: с фланцами	—	—	2,0	АС6	80/63	10
				АС15	125/100	12
				АС15	200/160	20
гладкий	160	75	0,8		125/100	3,5
					80/63	6,0
			1,0		125/100	8,5
			1,2	АС6	80/63	11,0
			1,4	АС15	80/63	12,3
			1,8		125/100	15,0
			2,0		125/100	13,0
					80/63	11,0

Все эксперименты проводились на алмазной пиле фирмы Нагба (ФРГ) с частотой вращения шпинделя  $8400 \text{ мин}^{-1}$  (скорость резания  $70,3 \text{ м/с}$ ) и ручной подачей рабочего стола  $S=7-8 \text{ м/мин}$ . В качестве обрабатываемого материала использовался фольгированный стеклотекстолит марки СФ-1-50 толщиной  $1,5 \text{ мм}$ . Шероховатостью поверхности среза измерялась на двойном микроскопе МИС-11 в трех точках после первого реза и после разрезки каждого последующих  $200\,000 \text{ мм}^3$  стеклотекстолита.

Шероховатость обработанной поверхности определялась как среднеарифметическое значение высоты микронеровностей в трех точках. Наличие разломачивания сколов и ореолов по периметру обработанной заготовки контролировалось с помощью лупы (5—10-кратное увеличение).

Износ алмазного круга определяется изменением массы круга после прорезки определенного объема материала. Взвешивание круга осуществлялось на аналитических весах марки ВЛА-200М с точностью до  $0,1 \text{ мг}$ .

Для определения влияния зернистости круга на качество обработанной поверхности платы были испытаны алмазные круги со следующей характеристикой:

АОК $160 \times 75 \times 75 \times 1,2$	АС6 80/63	11,0 кар.
АОК $160 \times 75 \times 2,0$	АС6 125/100	13,5 кар.
АОК $160 \times 75 \times 2,0$	АС15 200/160	20 кар.

Установлено, что качество отработанной поверхности кругами различной зернистости отличается незначительно. На рис. 12 представлен график зависимости высоты микронеровностей поверхнос-

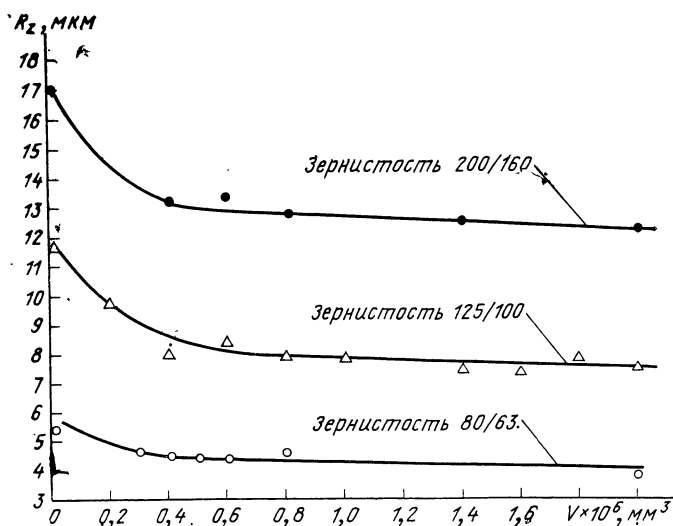


Рис. 12. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от зернистости алмазного круга

ти от величины зернистости алмазного круга. Как видно из графика, обработка алмазными отрезными кругами зернистостью от 80/63 до 200/160 обеспечивает шероховатости поверхности среза в пределах 5—7-го классов чистоты (ГОСТ 2789—73), что соответствует требованиям, предъявляемым к механической обработке контура ПП.

Для определения влияния конструкции корпуса круга на качество обработанной поверхности были испытаны: алмазный круг с фланцами АОК 160×75×2,0 АС15 125/100 и алмазный круг, имеющий форму гладкого диска АОК 160×75×2,0, АС15 125/100.

В результате было выявлено, что конструкция корпуса алмазного круга не влияет на качество обработанной поверхности. На поверхности среза не наблюдались разломачивания, сколы, ореолы и другие дефекты.

Для определения удельного износа алмазного слоя отрезных кругов были испытаны круги, имеющие следующие характеристики:

АОК 160×75×2,0	АС15 125/100	13,5 кар.
АОК 160×75×1,2	АС6 80/63	11 кар.

Испытания также проводились на алмазной пиле Намба со следующими режимами резания:  $h=8400 \text{ мин}^{-1}$ ,  $V=70,3 \text{ м/с}$ ; ручная подача  $S=8\text{—}9 \text{ м/мин}$ . В качестве обрабатываемого материала применялся стеклотекстолит фольгированный марки СФ-1-50 толщиной 2 мм.

Удельный износ  $q$  алмазного круга определялся как отношение изменения массы круга  $\Delta m$  к объему разрезанного материала ( $V_i = V_i - 1$ ).

График зависимости удельного износа круга от объема разрезанного материала представлен на рис. 13. Как видно из графи-

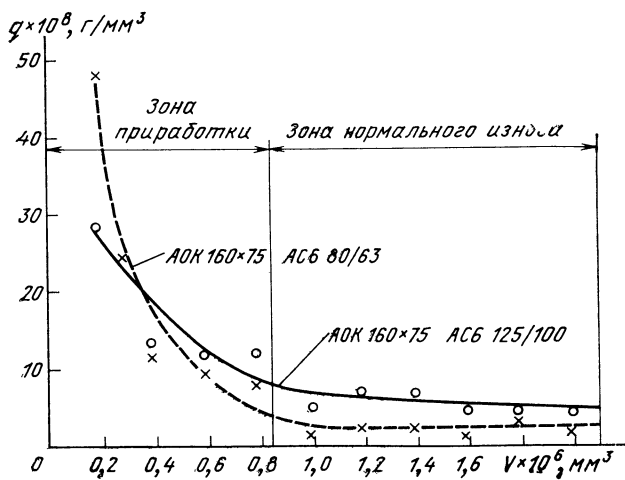


Рис. 13. Зависимость удельного износа круга от объема разрезанного материала

ка, при эксплуатации алмазных кругов имеется зона приработки с повышенным удельным износом алмазоносного слоя и зона нормального износа. Зона приработки примерно соответствует разрезке 80 000—90 000 мм<sup>3</sup> стеклотекстолита. Удельный износ в зоне нормальной работы круга зернистостью 80/63 соответствует примерно  $1,5 \cdot 10^{-8}$  г/мм<sup>3</sup>, для круга с зернистостью 125/100 получено примерно  $5 \cdot 10^{-8}$  г/мм<sup>3</sup>.

В результате проведенных работ выбран метод изготовления алмазных отрезных кругов — гальванический и определены основные конструктивные параметры кругов. Установлено, что стойкость исследованных кругов в 20—25 раз превышает стойкость кругов, изготовленных методом прессования.

Для обработки сложного контура ПП зарубежные фирмы Навега, Нам (ФРГ) и другие применяют специальные цельные твердосплавные фрезы диаметром 2—8 мм. Указанные фрезы используются на специальных фрезерных или сверлильно-фрезерных станках с ЧПУ.

Отечественные специальные фрезы изготавливаются из твердого сплава марок ВК6-М и ВК6-ОМ. Установлены рациональные геометрические параметры и режимы резания. Элементы конструкций и геометрические параметры фрез приведены на рис. 14 и в табл. 2.19.

Установлены рациональные геометрические параметры и режимы резания. Радиальное биение режущих кромок зубьев относи-

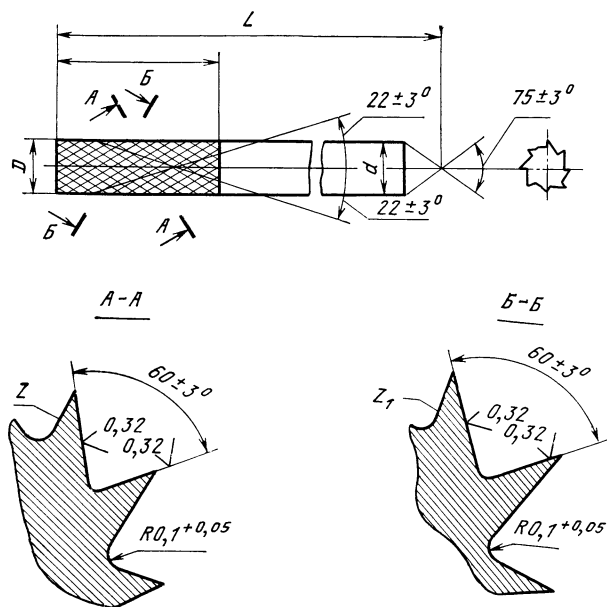


Рис. 14. Элементы конструкции и геометрические параметры фрезы



Таблица 2.19

$D$ , мм		$d$ , мм		$L$ , мм		$l$ , мм		Число зубьев	
Номинальный	Предельное отклонение	Номинальный	Предельное отклонение	Номинальная	Предельное отклонение	Номинальная	Предельное отклонение	$z$	$z_1$
2	—0,12	2	—0,020	30	±1,5	12	±1	7	5
3	—0,16	3	—0,025	40		18		8	6
4		4				10		10	
6		6							

тельно оси хвостовика не должно превышать 0,1 мм. Частота вращения фрез должна регулироваться в пределах от 10 000 до 35 000 мин<sup>-1</sup>. Толщина обрабатываемого пакета до 10 мм.

## 2.2. Выбор методов базирования и особенности изготовления печатных плат под автоматическую сборку радиоэлементов

На операциях механической обработки ПП в процессе получения монтажных и металлизированных отверстий (штамповкой или сверлением) и обработки ПП по контуру требуется ориентация заготовок ПП на фиксирующие отверстия. При сверлении монтажных отверстий рекомендуются два варианта фиксации заготовок ПП:

на фиксирующие отверстия;

на штифты, установленные в фиксирующие отверстия.

При обработке ПП по контуру ориентация заготовок ПП должна быть на фиксирующие отверстия. Необходимо, чтобы одно из фиксирующих отверстий было цилиндрической формы, второе — в виде ориентирующего паза.

Автоматическая сборка элементов на ПП предъявляет повышенные требования к точности монтажных отверстий, системе базирования плат, формированию и позиционированию элемента. От указанных параметров зависит припуск на диаметр монтажного отверстия, т. е. формирование величины зазора между выводами элемента и монтажным отверстием. Для расчета припуска на диаметр монтажного отверстия были рассмотрены погрешности, оказывающие влияние на автоматическую укладку элементов на ПП. На рис. 15—19 указанные погрешности представлены схематично: установка платы на подплатник и стол для сборки элементов (рис. 15); расположение фиксирующих отверстий на групповой заготовке ПП (рис. 16); формирование максимального зазора (0,08 мм), между фиксирующим отверстием и

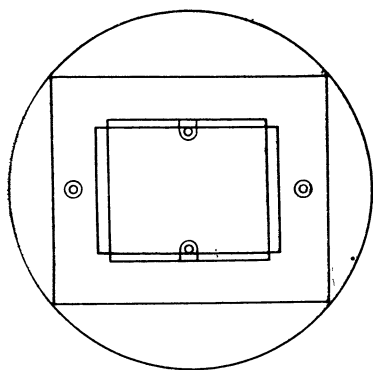


Рис. 15. Схемы установки платы на подплатник

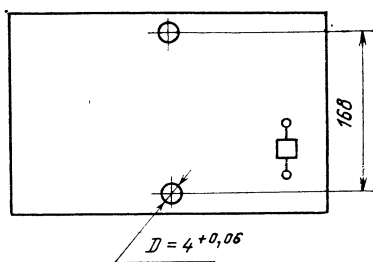


Рис. 16. Схема расположения фиксирующих отверстий на групповой заготовке

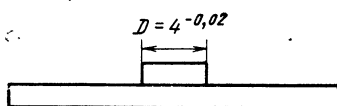
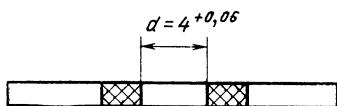


Рис. 17. Схема формирования максимального зазора между фиксирующим отверстием и штифтом

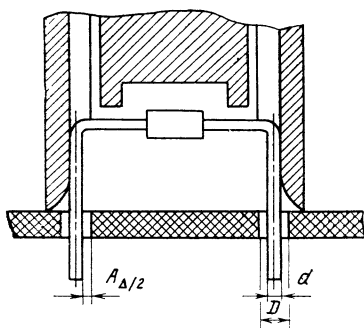


Рис. 18. Схема установки элемента и формирование зазора между выводом элемента и монтажным отверстием

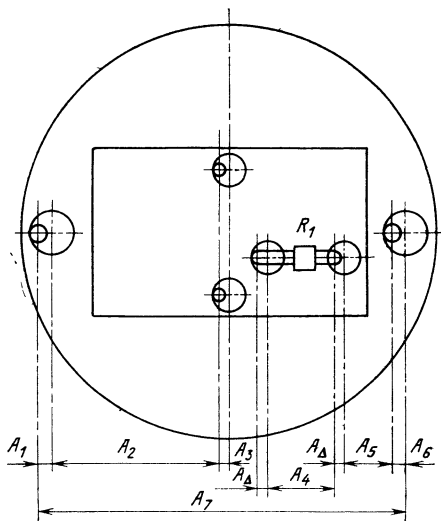


Рис. 19. Схема размерной цепи формирования зазора между выводом элемента и монтажным отверстием

штифтом (рис. 17); установка; элемента и формирование зазора между выводом элемента и монтажным отверстием (рис. 18); размерная цепь формирования зазора между выводом и монтажным отверстием (рис. 19).

Рассмотрим точность расположения монтажных отверстий на ПП, изготавливаемых под автоматическую сборку, проведя измерения на установке Cogadi (Швейцария) с дискретом отсчета 0,01 мм. Анализ погрешности показал, что отклонения центров монтажных отверстий относительно фиксирующих отверстий составляет  $\pm 0,37$  мм, что значительно превышает требования отраслевого стандарта ( $\pm 0,15$  мм). После этого была подвергнута анализу конструкция штампа для получения монтажных отверстий в печатной плате. Было установлено, что для повышения точности расположения отверстий необходимо повысить точность изготовления матрицы и съемника, кроме этого съемник должен обеспечивать достаточно точное направление для пуансонов. С этой целью съемник был изготовлен из стали У8А с термообработкой до  $HR_c = 28-32$ , а затем на координатно-расточном станке получены направляющие отверстия для пуансонов с точностью расположения их относительно фиксирующих отверстий в пределах 0,02 мм. Матрица была изготовлена из стали X12M.

Затем были произведены замеры точности расположения отверстий на съемнике, матрице штампа и монтажных отверстий на плате после пробивки. Штмп был собран и произведена пробивка монтажных отверстий в печатных платах.

По оси  $x$  наибольшее отклонение составило  $x_{\max} + 0,05$  мм, наименьшее —  $x_{\min} - 0,20$  мм, по оси  $y$  наибольшее отклонение  $x_{\max} + 0,09$ , наименьшее  $x_{\min} - 0,23$  мм. Предел варьирования, определяемый из выражения  $x_{\max} - x_{\min}$ , соответственно по оси  $x$  и  $y$  составил 0,25 и 0,32 мм. Число разрядов было равно соответственно 13 и 15. Цена разряда для отклонений по оси  $x$  и  $y$  составила  $c = 0,02$  мм.

Была проведена математическая обработка результатов измерений. Среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение определялось по следующим формулам:

$$\bar{x} = a + c \frac{\sum b f_i}{\sum f_i}; \quad \sigma = c \sqrt{\frac{\sum b^2 f_i}{\sum f_i} - \left( \frac{\sum b f_i}{\sum f_i} \right)^2},$$

по оси  $x$ :  $\bar{x} = -0,036$ ,  $\sigma = 0,0486$ ,

по оси  $y$ :  $\bar{x} = -0,043$ ,  $\sigma = 0,057$ .

Проверка показала, что эмпирическое распределение отклонений координат монтажных отверстий по оси  $x$  и  $y$  подчиняется закону Гаусса. Известно, что в случае нормального распределения координат  $x$  и  $y$  эксцентриситет оси отверстий подчиняется закону Рэлея. Этот закон однопараметрический, и дифференциальная функция его

$$y(R) = \frac{R}{\sigma^2} l - \frac{R^2}{2\sigma^2},$$

где  $R$  — переменная величина эксцентриситета, причем  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ , а  $x$  и  $y$  — отклонения координат осей монтажных отверстий,  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

Графическое изображение дифференциального закона распределения эксцентриситета дано на рис. 20.

Так как средние квадратические отклонения по оси  $x$  и  $y$  примерно равны, для получения эмпирического распределения  $\sigma_R$  принимаем равной 0,05 мм. Наибольшее отклонение при вероятности 99,73% при  $\sigma_R=0,05$  по закону Рэля составит 3,44, т. е.  $\sigma=0,172$ .

В результате расчетов наибольшее отклонение в расположении пробитых монтажных отверстий по результатам математической обработки экспериментальных данных составило 0,172.

Экспериментально установлено, что отклонение в расположении фиксирующих отверстий заготовки печатной платы составило  $\pm 0,1$  мм, а максимальный зазор между фиксирующим отверстием и базовым штифтом равен 0,08 мм.

Отклонение в расположении базовых штифтов и отклонение позиционирования принимаем равным  $\pm 0,025$  мм (каждое отклонение).

Погрешность диаметра вывода элемента составляет  $\pm 0,01$  мм. Погрешность формирования монтажных отверстий устанавливалась путем определения отклонений между диаметрами пробитых отверстий и диаметрами пуансонов.

Используя формализованный метод статистической обработки экспериментальных данных, видим, что распределение отклонений диаметров монтажных отверстий от диаметров пуансонов нормальное.

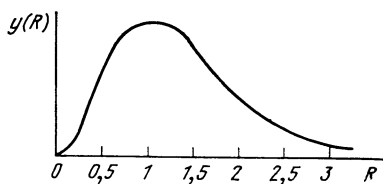


Рис. 20. График дифференциального закона распределения эксцентриситета

Т а б л и ц а 2.20

Вид погрешности	Условное обозначение	Погрешность, мм	Распределенная ошибка, мм
Отклонение в позиционировании лентой для сверлильного станка (штамповкой) и лентой для станка с автоматической установкой элементов	$a_1$	0	0
Отклонения в расположении просверленных (штампованных) монтажных отверстий (при длине платы 360 мм)	$a_2$	$\pm 0,172$	0,344
Отклонения в расположении фиксирующих отверстий	$a_3$	$\pm 0,1$	0,2
Максимальный зазор между фиксирующим отверстием и базовым штифтом	$a_4$	—	0,08
Отклонение в расположении базовых штифтов подплатника	$a_5$	$\pm 0,025$	0,05
Отклонение позиционирования подплатника	$a_6$	$\pm 0,025$	0,05
Погрешность формирования и позиционирования вывода элемента	$a_7$	$\pm 0,025$	0,05
Погрешность диаметра вывода элемента	$a_8$	$\pm 0,01$	0,02
Погрешность диаметра просверленного или пробитого отверстия	$a_9$	$\pm 0,06$	0,12

Исходя из того, что предел отклонения диаметров пробитых отверстий  $\delta$ , т. е.  $x = \pm 3\sigma$ , отклонения диаметров монтажных отверстий относительно диаметров данного пуансона находятся в пределах от  $\pm 0,07$  — до  $0,062$  мм.

Важное значение имеет погрешность формирования и позиционирования вывода элемента. Она складывается из погрешностей перемещения и направления элемента.

В настоящее время при изготовлении установок для автоматической сборки элементов этот вид погрешности не устанавливается (устанавливается лишь погрешность позиционирования координатного стола). Если принять эту погрешность равной  $\pm 0,025$  мм, то перечень погрешностей, оказывающих влияние на точность при автоматической укладке элементов, будет полным (табл. 2.20).

Расчет припуска на диаметр монтажного отверстия при автоматической сборке элементов рассчитывается по формуле:

$$\Delta D = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 + a_7^2 + a_8^2 + a_9^2},$$

$$\Delta D = 0,312 \text{ мм.}$$

Экспериментально установлено, что качественная пайка элементов обеспечивается при зазоре между монтажным отверстием и выводом элемента до  $0,4$  мм.

## **Глава третья**

### **ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

#### **3.1. Требования к оборудованию для механической обработки**

Роликовые и гильотинные ножницы, используемые для резки листов на полосы и заготовки, должны отвечать определенным техническим требованиям. Роликовые ножницы должны обеспечивать:

- разрезку материала толщиной до  $3$  мм;
  - возможность изменения радиального и осевого зазора между роликами;
  - регулировку упора на столе станка;
  - скорость резания не менее  $2$  м/мин и не более  $10$  м/мин;
  - скорость движения воздуха в отсасывающем патрубке не менее  $25$  м/с для отсоса крошки и пыли из зоны резания.
- Разность диаметров режущих роликов, входящих в комплект, не должна превышать  $0,3$  мм.

Гильотинные ножницы должны обеспечивать:

- разрезку материала толщиной до  $3$  мм;
- регулировку заднего упора;
- точность установки заднего упора  $0,1$  мм;

отклонение от перпендикулярности плоскости реза и боковой стороны заготовки не более 30';

прижим материала в процессе разрезки.

Геометрические параметры режущей части подвижного ножа должны быть следующие: задний угол 10—15°; передний угол — 0—5°. Задний и передний углы режущей части неподвижного ножа должны быть равны  $0^\circ \pm \pm 25'$ . Отклонение от параллельности режущих кромок ножей не должно превышать 0,25 мм на длине 800 мм.

На рис. 21 представлены многоножевые ножницы, которые предназначены для резки фольгированных диэлектриков толщиной не более 3 мм, а также эластичных материалов металлических листов (медь, алюминий, бронза, латунь) толщиной не более 1 мм.

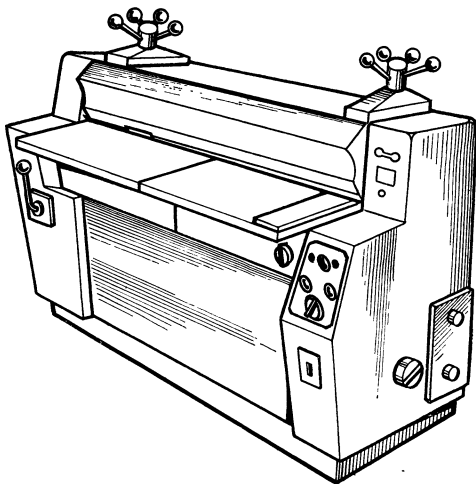


Рис. 21. Многоножевые ножницы

Штамповка заготовок ПП, получение монтажных отверстий и вырубка плат по контуру выполняются на стандартных прессах модели КД2330 (усилие 100 т).

Одним из современных решений комплекта оборудования для выполнения указанных операций является роботизированный технологический комплекс (РТК) для штамповки заготовок. Схема компоновки РТК показана на рис. 22.

#### Краткая техническая характеристика РТК

Усиление пресса, кН (тс)	1000 (100)
Наименьший ход ползуна пресса при работе в составе РТК, мм	90
Наибольшая масса заготовки, штампуемой на РТК, кг	1,6
наименьший	450×450
наибольший	100×100
Наименьшая толщина материала заготовки, мм	0,5
Наибольшая толщина материала заготовки, мм	5,0
Наименьшая высота стопы заготовок в магазине поштучной выдачи, мм, не менее	250
Расстояние от пола до оси схватов в их нижнем положении, мм	970 ... 1000
Вертикальное перемещение схватов, мм	0 ... 100
Погрешность позиционирования, мм	$\pm 0,1$
Темп выдачи деталей, с	6/4,3
Производительность РТК:	
темповая, шт./мин	10/14
среднечасовая проектная, шт./ч	480/670

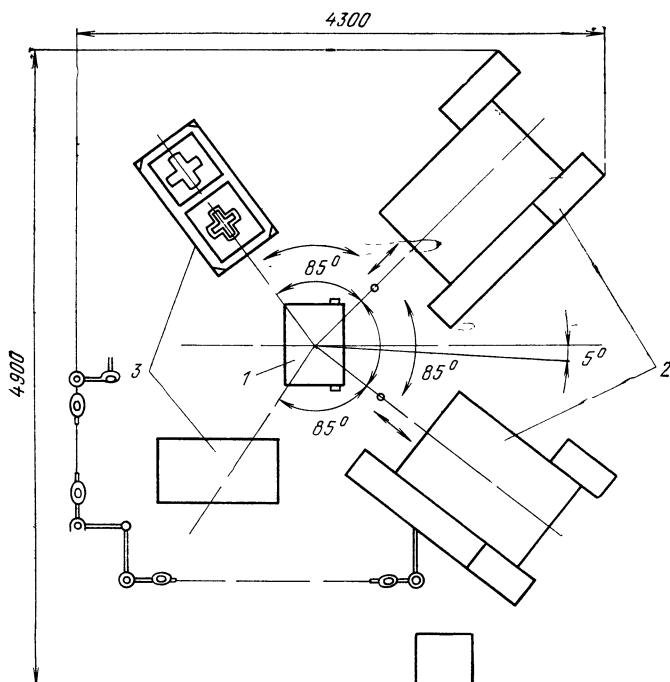


Рис. 22. Схема компоновки робототехнического комплекса штамповки:

1 — трехрукий робот; 2 — пресс; 3 — магазин для стопы заготовок

среднесменная (7 ч), шт.	3800/5500
Габаритные размеры: мм	
в плане	4900×4300
высота над уровнем пола	3180
Масса, кг	20 000
Ток переменный трехфазный, напряжение, В	380
Установленная мощность, кВт	20,75
Давление сжатого воздуха, МПа	0,45 ... 1
Расход сжатого воздуха, м³/ч	1,5
Система управления — цикловая	

Примечание. В числителе указана производительность при штамповке детали из усредненной заготовки (300×150 мм) на штампе с боковым расположением колонок и укладкой заготовок в штамп, в знаменателе — производительность при штамповке той же детали на штампе с задним расположением колонок и сбросом заготовок в штамп.

#### Перечень основных составных частей РТК:

1. Пресс однокривошипный открытый простого действия двухстоечный наклоняемый усилием 100 тс, модель КД2330 (2 шт.)
2. Трехрукий автоматический манипулятор (промышленный робот) грузоподъемностью 5 кг, модель КМ5Ц4201
3. Магазинное устройство модель МУПР2. Приспособление-спутник к промышленным роботам.

**Краткая техническая характеристика трехрукового автоматического манипулятора с программным управлением**

Грузоподъемность, кг	5
Число рук, шт	3
Наибольшая масса заготовки, переносимая одной рукой, кг	1,6
Число степеней подвижности	3
Наибольшее перемещение рук, мм:	
горизонтальное	630
вертикальное	100
Наибольший угол поворота в горизонтальной плоскости, град	90
Максимальная скорость рук при наибольшем перемещении, м/с:	
горизонтальная	1,5
вертикальная	0,4
Точность позиционирования (повторяемость рабочих положений схвата) в горизонтальной плоскости на радиус 1150 мм, мм	±0,1
Тип системы ПУ — цикловая струйная типа УС	
Расстояние от пола до оси схватов их в нижнем положении, мм	970 ... 1100
Рабочее давление воздуха, МПа	0,45—1
Габаритные размеры корпуса манипулятора в плане, мм	905×740
Габаритные размеры УЦПУ, мм	650×600×1200
Высота манипулятора (без учета воздухопроводящих гибких трубок), мм	1170 ... 1300
Масса, кг:	
манипулятора	535
УЦПУ	110
Ток переменный трехфазный, частота 50 Гц, напряжение, В	380
Электродвигатель вентилятора УЦПУ: тип АОЛ 2-11-2	
мощность, кВт	0,8
частота вращения, мин <sup>-1</sup>	3000
<b>Техническая характеристика магазинного устройства (приспособление-спутник к промышленным роботам)</b>	
Размер подаваемых заготовок, мм:	
наименьший	250×250
наибольший	500×500
Наименьшая толщина подаваемой заготовки, мм	0,5
Наибольшая высота стопы заготовок в магазине, мм	250
Наибольшая высота пакета заготовок, мм	400
Расстояние от уровня пола до плоскости захвата заготовок, мм	800 ... 1000
Габаритные размеры, в плане, мм	640×1520
Высота над уровнем пола, мм	950×1165
Масса, кг	800
Привод — пневмогидравлический	

При производстве ОПП часто заготовки плат имеют недопустимую кривизну (стрелу прогиба). Если стрела прогиба заготовок превышает 0,6 мкм на 100 мм длины, то такие заготовки подлежат рихтовке. Рихтовку заготовок из фольгированного гетинакса необходимо осуществлять перед операциями нанесения рисунка схемы, маркировочных обозначений, защитной маски и луже-



ния. Рихтовка осуществляется на установке типа ВРМ-600 при скорости подачи 1—6 м/мин.

Для сверления фиксирующих отверстий следует использовать специальные станки. Специальные станки для сверления фиксирующих отверстий должны обеспечивать:

одновременное сверление двух фиксирующих отверстий и штифтование;

предельные отклонения расстояний между центрами просверленных фиксирующих отверстий не более  $\pm 0,05$  мм при расстоянии до 180 мм,  $\pm 0,08$  мм при расстоянии свыше 180 до 360 мм и  $\pm 0,10$  мм при расстоянии свыше 360 мм;

частоту вращения шпинделя не менее 1000 мин<sup>-1</sup>;

подачу шпинделей механическую не более 0,1 мм/об.;

отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к базовой поверхности стола станка не более 0,01 мм;

биение сверла не более 0,05 мм;

усилие прижима вокруг обрабатываемого отверстия 1,5—2 МПа;

точность и жесткость основных узлов в соответствии с требованиями ГОСТ 370—76 для станков класса П.

Специальные станки для сверления отверстий в ПП с ЧПУ и без ЧПУ должны обеспечивать:

частоту вращения шпинделя не менее 10 000 мин<sup>-1</sup>;

подачу шпинделя механическую не более 0,1 мм/об.;

точность регулировки рабочего хода шпинделя  $\pm 0,5$  мм;

отклонение от перпендикулярности оси шпинделя к базовой поверхности стола не более 0,01 мм;

биение сверла не более 0,02 мм;

усилие прижима вокруг обрабатываемого отверстия 1,5—2 МПа;

скорость движения воздуха в патрубке отсасывающего устройства не менее 25 м/с для отсоса образующейся стружки и пыли из зоны резания (патрубок отсасывающего устройства должен быть подведен непосредственно к зоне резания);

точность и жесткость основных узлов в соответствии с требованиями ГОСТ 370—76 для станков класса П.

Специальные сверлильные станки с числовым программным управлением должны обеспечивать:

точность позиционирования не более  $\pm 0,025$  мм;

дискретность 0,01 мм;

повторяемость не более  $\pm 0,005$  мм.

Этим требованиям отвечают отечественные станки мод. СМ-600, СФ-4.

Установка гидроабразивной зачистки, в которой использован принцип прокачивания абразивной суспензии, должна обеспечивать:

амплитуду хода механизма для прокачки абразивной суспензии не менее  $\pm 10$  мм;

число циклов прокачки абразивной суспензии через отверстия в минуту не менее 100;

возможность регулировки рабочего давления в камере очистки за счет изменения площади перепускных отверстий;

барботирование абразивной суспензии перед началом рабочего цикла.

Установка гидроабразивной зачистки, в которой обработка отверстий производится методом подачи абразивной суспензии под давлением с помощью форсунок, должна обеспечивать:

подачу заготовок в зону обработки с помощью конвейерного устройства;

скорость конвейерного устройства от 0,2 до 1,5 м/мин;

частота качания форсунок не менее 15 циклов в минуту;

изменение давления воздуха в форсунках от 0,5 до 0,7 МПа.

Механическая зачистка поверхности ПП должна осуществляться на специальных зачистных станках, которые должны обеспечивать:

подачу заготовок в зону резания с помощью транспортера;

скорость движения ленты транспортера от 1 до 5 м/мин;

скорость вращения абразивного зачистного круга от 4 до 14 м/с;

число осциллирующих колебаний абразивного зачистного круга от 70 до 120 в минуту;

амплитуду осциллирующих колебаний абразивного зачистного круга от 5 до 8 мм;

возможность наладки станка для обработки заготовок плат различной толщины;

при зачистке без охлаждающей жидкости скорость движения воздуха в патрубке отсасывающего устройства не менее 25 м/с для отсоса образующейся стружки и пыли из зоны резания (патрубок отсасывающего устройства должен быть подведен непосредственно к зоне резания);

правку абразивного зачистного круга.

Прецизионная алмазная пила и специальный станок для алмазной отрезки стеклопластиков должны обеспечивать:

обработку печатных плат толщиной до 3 мм;

частоту вращения алмазного круга не менее 30 с<sup>-1</sup>;

подачу 3—6 м/мин;

торцевое биение посадочной плоскости шпинделя станка не более 0,01 мм;

прижим заготовки во время обработки;

скорость движения воздуха в патрубке отсасывающего устройства не менее 25 м/с для отсоса образующейся стружки и пыли из зоны резания (патрубок отсасывающего устройства должен быть подведен непосредственно к зоне резания).

Прецизионную алмазную пилу рекомендуется оснастить приспособлением, предназначенным для базирования заготовок ПП при обработке прямоугольного контура. Схема приспособления приведена на рис. 23.

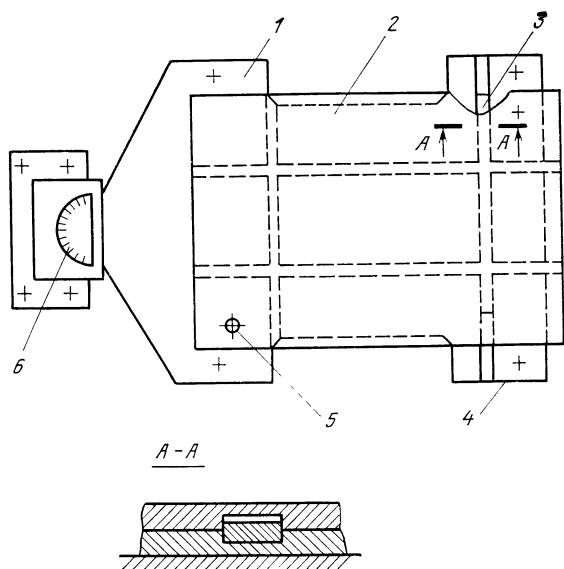


Рис. 23. Схема приспособления:

1 — плата; 2 — трафарет; 3 — шпонка; 4 — крепежный болт; 5 — фиксирующий штифт; 6 — узел точной настройки

Обрабатываемая заготовка устанавливается на штифты трафарета по крепежным отверстиям. Совмещая поочередно один из четырех взаимно перпендикулярных пазов трафарета со шпонкой, производят отрезку технологического поля на заготовке платы.

### 3.2. Особенности импортного оборудования для механической обработки печатных плат

Анализируя особенности импортного оборудования для механической обработки ПП, целесообразно рассмотреть оборудование, используемое для получения монтажных и металлизированных отверстий и фрезерования пазов и контура плат.

Для получения отверстий и фрезерования пазов и контура ДПП и МПП зарубежные фирмы используют специальные станки, оснащенные системами числового (NC) или компьютерного (CNC) программного управления. Как правило, станина станков для сверления и фрезерования ПП выполнена из гранита. Это объясняется тем, что гранит — это материал, который прошел естественное старение в течение миллионов лет. Коэффициент его линейного расширения едва поддается измерению, а это означает, что все размеры основных посадочных отверстий сохраняются стабильными. Кроме того, гранит обладает еще одним качеством — высокой способностью «гасить» колебательные движения в

системе. Соотношение очень большой массы станины с очень малой массой передвижного рабочего стола, как правило 40 : 1, обеспечивает возможность использования самых больших ускорений и торможений при сохранении стабильности самого станка.

Другой особенностью импортных станков является наличие системы автоматической смены сверл. Опыт создания таких станков показал, что наиболее рациональным числом позиций под запасной инструмент различных диаметров является 15—17 мест. Устройство для автоматической смены сверл имеет следующие преимущества:

обрабатываемый пакет заготовок ПП устанавливается на станке один раз, что исключает появление дополнительной погрешности из-за многократной перестановки (экономится время по сравнению с ручной заменой сверл);

появляется возможность организации обслуживания одним оператором нескольких сверлильных станков, т. е. возможность полной автоматизации процесса сверления ПП.

Применение станков с автоматической сменой сверл позволяет повысить производительность станка до 30 %.

Основные технические характеристики импортных станков приведены в табл. 3.1 [21]. Конструктивная схема этих станков принципиально одинакова. Они имеют либо крестообразный стол, перемещаемый по осям  $x$ — $y$  быстродействующими высокомоментными двигателями постоянного тока, либо стол перемещаемый по оси  $x$ , и траверсу со шпинделем, перемещаемую по оси  $y$ . Движение передается столу беззазорной шариковой винтовой парой, стол движется по шариковым направляющим и на большинстве модулей поддерживается воздушной подушкой.

Привод главного движения — на базе высокоскоростных шпинделей фирм Precis, Priceis, Westuind (Англия) с воздушными опорами для сверления при частоте вращения от 30 000 до 80 000 мин<sup>-1</sup> и подшипниковыми опорами для фрезерования при частоте вращения до 6 000 мин<sup>-1</sup>, мощность соответственно 600 и 1200 Вт. Регулирование частоты вращения — частотное с помощью статического преобразователя. Положение стола контролируется линейной системой Lidac, фотодатчиком Schmoll, Schneider Excellon или с помощью вращающегося оптического шифратора Digital Systems.

Однако станки обладают и рядом конструктивных отличий, существенно влияющих на их быстродействие, точность и надежность. Станок Alpha-Z фирмы Digital Systems отличается простой системы вертикальной подачи, направляющие для шпинделя по оси  $z$  оснащены аэростатическими опорами. Оригинальна система автоматической смены инструмента на основе центробежных зажимов.

Некоторые модели станков являются сверлильно-фрезерными (фирм Schmoll, Schneider), некоторые — только сверлильными (Alpha-Z, Mark-IV) или только фрезерными (Perphranor).

Таблица 3.1

Характеристика станка	Trud- gill-95, фирма Advanced Controls (США)	Mark-IV, фирма Excellon (США)	Alpha-Z, фирма Digital Sistes (США)	Multi- for-14, фирма Posalux (Швейца- рия)	ABL 24 MS, фирма SchmoPi (ФРГ)	РМ-4, фирма Bernhard Schneider (ФРГ)	Vero, фирма Vero (Англия)	Purima, фирма piritee (Италия)
Число шпинделей	4—8	2—5	2—5	2—6	2—4	2—4	2—4	2—4
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	20 000— —80 000	30 000— —80 000	10 000—90 000	1000— —60 000	15 000— —60 000	15 000— —90 000	35 000— —75 000	15 000— —60 000
Диаметр сверла, мм	0,3—6,3	0,3—6,35	0,3—6,3	0,4—5,5	0,4—5,0	0,5—6,35	0,3—6,0	0,3—4,0
Точность позиционирования, мм	±0,0055	±0,0055	±0,005	±0,004	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01
Точность повторного позиционирования, мм	±0,0025	±0,0025	±0,002	±0,002	—	±0,005	±0,005	±0,005
Производительность станка, отв./мин	420	500	350	До 600	300	400	350	200
Скорость перемещения стола, м/мин	12,5	13	10	15	12	12—14	—	—
Размер поля сверления, мм	460×610	360×620	356×609	350×622	500×500	310×630	609×609	375×650
Расход воздуха, л/мин	1200	500	—	—	—	—	350	350
Рабочий ход шпинделя, мм	0—25	0—25	—	0—15	20	0—6	0—10	0—15
Автоматическая замена сверла	Имеется	Имеется	Поставляется по специальному заказу	Имеется	—	—	—	Полуавтомат
Подшипники шпинделя	Шариковые	Шариковые	Аэростатические	Шариковые	Шариковые	Шариковые	Аэростатические	Шариковые

Наиболее важными элементами станков, обеспечивающими высокое быстродействие, являются электроприводы перемещения стола по осям  $x$ — $y$  и подачи инструмента по оси  $z$ . Для этой цели используют серийно выпускаемые и специально разработанные для сверлильных станков электродвигатели. Для перемещения стола на станках фирм Schmolli и Schneider служат двигатели постоянного тока с встроенными тахогенераторами Achse EC 670/03 мощностью 650 Вт, а для перемещения сверла Achse EC 703/03 мощностью 600 Вт фирмы Elektrokravt. У станка Alpha-Z двигателя фирмы Westund имеют встроенный оптический шифратор. Скорость перемещения стола по осям  $x$ — $y$  составляет 10—14 м/мин. Сравнительно малая мощность и малые габаритные размеры приводных двигателей при высоком быстродействии (ускорение до 16 000 рад/с<sup>2</sup>) достигнуты в результате использования ходовых винтов малых диаметров и соответственно малых маховых моментов, а в другом случае — при малой инерционности самого двигателя и его высокой электромеханической постоянной. Высокое быстродействие двигателей, используемых для привода подачи по оси  $z$ , позволяет выполнять сверление и извлечение инструмента с различными скоростями, причем скорость извлечения сверла максимальная, а скорость подачи при сверлении можно задать любую. Это позволяет экономить до 15% времени.

На всех станках приводы главного движения с шариковыми опорами имеют водяное охлаждение непосредственно корпуса шпинделя, для чего используется замкнутая система охлаждения с холодильником и насосом, заполняемая водой с противокоррозионными и антивспенивающими добавками. Шпиндели с воздушными опорами имеют только воздушное охлаждение при расходе воздуха 150 л/мин на шпиндель. Внутренняя полость траверсы в этом случае охлаждается водой во избежание ее теплового расширения, которое недопустимо при точностях, обеспечиваемых станком. Системам охлаждения уделяется большое внимание: например, на станке Perphranor тремя воздушными соплами охлаждается даже место обработки, что повышает стойкость фрезы.

Большая частота вращения шпинделей для фрезерования достигается благодаря прецизионным подшипникам, имеющим ресурс не менее 20 000 ч при частоте вращения 60 000 мин<sup>-1</sup>.

Большинство сверлильных станков снабжается числовой системой управления с микропроцессорами CNC-4000, которая оснащена памятью на магнитной ленте объемом до 32 Кбит, что позволяет использовать перфоленту только один раз и избегать ошибок, связанных с ее износом. Система обеспечивает круговую интерполяцию, мультиплицирование и инверсирование отдельных разделов программы, а также возможность изменения масштаба координат отверстий для компенсации ошибок, вызываемых усадкой пленки. Система может реперфорировать перфоленты, а также корректировать информацию в памяти системы. Точность, обеспечиваемая системой, до 0,002 мм. Программирование возможно как в абсолютных, так и в относительных координатах,

кодирование — по системе ISO или EIA. В качестве датчиков перемещения стола используется линейная система Heidenhein mini Ltd.

Фирма Advanced Controls выпускает сверлильный станок Trudrill 95. По характеристикам он близок к станку Trudrill 93/4. Важное отличие траверса для шпинделей, которая содержит две продольные параллельные балки, позволяющие при желании установить четыре дополнительных шпинделя параллельно четырем имеющимся. Это дает возможность сверлить заготовку двумя шпинделями и в два раза сократить время сверления.

В разработках фирмы Klingelberg используются магнитные кассеты и гибкие магнитные диски (наряду с перфолентой) для ввода программы обработки, а также для расширения памяти.

Это значительно повышает точность позиционирования и самого процесса сверления. Фирма Klingelberg разработала автоматическую линию сверления ПП «Роботроник-2» (рис. 24), состоящую из двух сверлильных станков типа «Микроник-3» и позволяющую полностью автоматизировать процесс сверления ПП. Линия управляется небольшим компьютером с программами, рассчитанными на 8—10 ч работы. Резка заготовок производится автоматически по заданной программе двух или четырех типоразмеров.

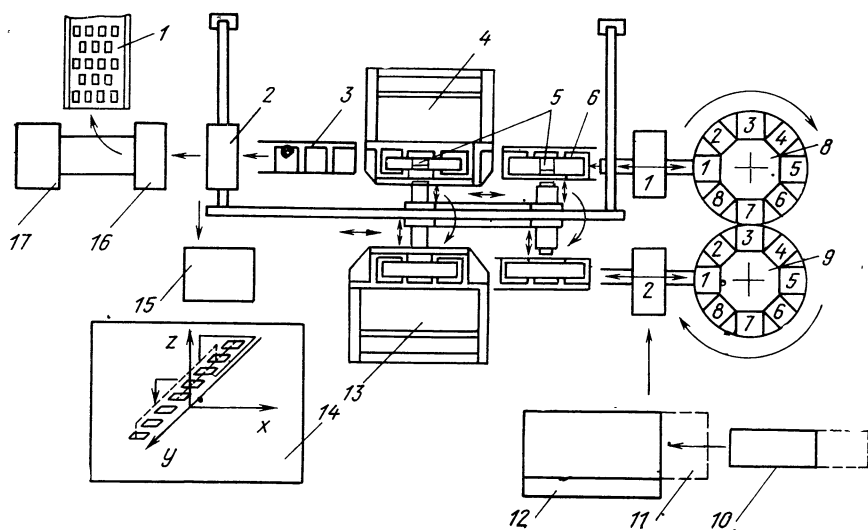


Рис. 24. Автоматическая линия сверления печатной платы «Роботроник-2»:

1 — приспособление к установке механической зачистки поверхности; 2 — комплексный контроль качества просверленных отверстий; 3 — выгрузка просверленных пакетов; 4 — сверлильный станок; 5 — загрузочный робот для параллельного обслуживания двух сверлильных станков; 6 — подготовка; 7 — автоматическая сборка и штифтовка пакетов; 8 — загрузочный роторный магазин № 1 на четыре — восемь позиций для заготовок ПП; 9 — загрузочный роторный магазин № 2 на четыре — восемь позиций для заготовок ПП; 10 — внутризаводская обработка программы; 11 — компьютер управления автоматической линией; 12 — пульт управления сверлильными станками CNS; 13 — сверлильный станок; 14 — схема загрузки и разгрузки; 15 — контейнер для брака; 16 — сверлильный станок; 17 — контейнер для верхних и нижних прокладочных плит

Разрезанные заготовки поступают в два роторных магазина, состоящих из восьми ячеек каждый. Запоминающее устройство компьютера оставляет в своей памяти номер ячейки и формат вложенной в нее заготовки. Каждый магазин рассчитан на один-два формата заготовок и может питать через транспортное устройство оба станка. Если сверлится большая партия плат двух типоразмеров, то каждый из станков настраивается на одну программу и сверлит только один типоразмер плат. Если же серии не очень большие, а номенклатура более двух типоразмеров, но не более четырех, каждый станок настраивается на две программы и сверлит два типоразмера плат.

Поскольку количество заготовок разных типоразмеров поступает в питающие магазины неодинаково и так как компьютер обеспечивает оптимальный раскрой стандартного листа фольгированного диэлектрика с минимальными отходами, каждый из станков первоначально настраивается на программы сверления заготовок, поступающих в магазин, в больших количествах. По мере расходования этих заготовок в магазинах, идет накопление заготовок, поступающих туда в меньших количествах. Когда ячейки магазинов заполняются этими заготовками, а количество первоначальных заготовок уже недостаточно для того, чтобы загрузить станок, программа станка переключается и начинается сверление заготовок следующей партии. Такое применение линии наиболее оптимально, однако компьютер позволяет использовать линию и в других режимах, например, оба станка линии настраиваются на две программы каждый и в зависимости от типоразмера поступающих на станок заготовок компьютер переключает станок на нужную программу. Таким образом, линия позволяет сверлить заготовки четырех типоразмеров одновременно. При этом увеличивается вспомогательное время, необходимое для переключения станков на нужную программу.

Линия работает в следующей последовательности. Из роторных магазинов заготовки поступают в автомат пакетирования, где на стопу из трех плат накладывается нижняя и верхняя подложки, затем пакет штафтуется. Собранные три пакета передаются на линейный транспортер и подаются к станку каждый против одного из шпинделей станка. По команде компьютера промышленный робот проводит съем просверленных пакетов, установку их на транспортер и загрузку новых, подлежащих сверлению. Операция сверления длится в среднем 20 мин. Этого времени вполне достаточно, чтобы автомат пакетирования собрал и проштафтовал следующие три пакета. Просверленные пакеты подаются транспортером на устройство контроля правильности сверления. Если расположение и число отверстий по каким-либо причинам не соответствует заданной программе, происходит отбраковка и бракованные пакеты сбрасываются в специальную емкость. Пакеты, прошедшие контроль, направляются транспортером в автомат разработки, где снимаются штифты и подложки, которые также сбрасываются в специальную тару, а разъединенные



Т а б л и ц а 3.2

Характеристика устройства	Star-track фирмы Digital Systems (США)	Орбс II фирмы Excellon Automation (США)	Programm 771 NC/CNC фирмы Schneider (ФРГ)	Checkmate фирмы Advanced Controls (США)	CNC-4000 Р фирмы Retab (Швеция)
Выполняемые функции	Приготовление управляющих перфолент для сверления ПП и для других систем позиционирования по осям $x$ и $y$ Копирование перфолент Проверка точности сверления ПП или размеров на фотошаблоне	Приготовление управляющих перфолент для сверления ПП Измерение размеров на ПП Измерение размеров на ПП	Приготовление управляющих программ Измерение размеров на ПП Контроль перфолент	Приготовление управляющих перфолент и их редактирование Копирование перфолент Определение координат отверстий в ПП (по заказу)	Управление станками Приготовление управляющих перфолент Быстрое приготовление перфолент для сверления Проверка точности сверления ПП и размеров на фотошаблонах и фотооригиналах
Размер рабочей поверхности стола, мм	635×635	635×635	800×650	635×635 (ход стола — 609,6×609,6; верх стола — стекло)	—
Скорость программирования, поз./ч	—	1200—1500	1250	25—40 точек в минуту	—
Точность проверки размера, мм	±0,005	±0,0127	NC 0,01 CNC 0,002	±0,0075	±0,01
Повторяемость, мм	±0,002	±0,008	NC 0,005 CNC 0,001	+0,005	
Управляющее устройство	ЭВМ с основной памятью 8000 16-разрядных слов, наращиваемой до 16 000 слов	—	Классическое ЧПУ и ЭВМ	Хранение рисунка по заказу	ЭВМ

Окончание табл. 3.2

Характеристика устройства	Star-track фирмы Digital Systems (США)	Opic II фирмы Excellon Automation (США)	Programmat 771 NC/CNC фирмы Schneider (ФРГ)	Checkmate фирмы Advanced Controls (США)	CNC-4000 Р фирмы Retab (Швеция)
Управляющий орган для перемещения стола	Указательное перо, управляющее столом с помощью сервопривода для грубой установки «Глаз оптического центрирования» автоматически устанавливает на центр	Точное перемещение рукояткой Грубое перемещение сервоприводом при двух ступенях скорости Наведение по перекрестию экрана	Вручную с помощью переключателя для или автоматически с помощью следящего привода	Вручную круглой поворотной рукояткой	Вручную
Клавиатура и дисплей	Телетайп	Буквенно-цифровая	Имеется электронно-лучевой дисплей тура	Электронная клавиатура	Цифровая
Габаритные размеры шкафа управления, мм	965×686, высота 990	900×900, высота 1500	600×600, высота 1250	1788×2032, высота 1397	—
Габаритные размеры установки, мм	2490×1650, высота 1350	1420×1780, высота 1370	1200×1300, высота 1370	Шкаф управления смещен с установкой	—
Дополнительные данные	«Чувствительный глаз оптического центрирования» +0,002 мм Возможен автоматический поиск кадра Размер мишени глаза 0,125×3,2 мм Размер контактной площади >0,63 мм	Наименьшая изменяемая величина 0,0025 мм	Имеется возможность вычерчивания позиций сверления, а также наружных и внутренних контуров	Индикация числа отверстий Автоматизация округления данных к ближайшим 0,635; 1,27; 2,54 мм (выбирается переключателем)	Разрешающая способность 0,01 мм

просверленные заготовки ПП транспортером направляются на операцию механической зачистки поверхности. Работу двух-трех таких линий может обеспечивать один опытный специалист наладчик.

Отличительной особенностью четырехшпиндельного сверлильно-фрезерного станка фирмы Klingelnberg является наличие 17 позиций (вместо 6—9 у станков других фирм) в магазине для автоматической смены инструмента. Это удобно не только для обеспечения сверления отверстий разного диаметра, но и для бесперебойного сверления отверстий одного диаметра, число которых на заготовке размером 650×650 мм может превышать ресурс работы одного сверла.

На станках с ЧПУ чаще всего используется прямое программирование на бумажную ленту с помощью оптических измерительных устройств-программаторов (типа Coradi, Швейцария, Star-track, США, Excellon, ФРГ). При этом методе фотошаблон укладывается на стол программатора и перемещением проекционного оптико-телевизионного устройства по осям  $x$  и  $y$  координаты монтажных отверстий передаются на блок ввода и выдачи информации. Блок оснащен устройством для перфорирования ленты, на которую и переносятся все данные.

При выборе программаторов следует отдавать предпочтение тем устройствам, которые оснащены системой автоматического центрирования при программировании (например, модель Star-track оснащена «глазом оптического центрирования», запатентованного фирмой Digital Systems, США).

В табл. 3.2 представлены параметры и особенности конструкций программаторов, получивших широкое применение. Кроме программирования указанные устройства позволяют с высокой точностью производить линейные измерения больших размеров, например осуществить контроль фотошаблонов, линейные измерения расположения монтажных отверстий в ПП, т. е. оценить точность позиционирования станка и др.

## **Глава четвертая**

### **СТАНДАРТИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ**

#### **4.1. Задачи стандартизации**

Основными задачами стандартизации технологических процессов изготовления ПП, как и любого другого объекта, являются: создание условий для концентрации и специализации производст-

ва, а также для организации поточного производства на основе применения высокопроизводительных средств технологического оснащения, внедрение наиболее прогрессивной и оптимальной технологической последовательности; соблюдение оптимальных технологических режимов выполнения операций; сокращение сроков освоения новой техники; обеспечение высокой стабильности качества производственных процессов на основе выполнения единых конструкторско-технологических требований.

Для организации крупносерийного производства печатных плат (в том числе и многослойных) на высоком уровне необходимо решить следующие вопросы.

1. Разработать рациональные (базовые) методы изготовления ПП в зависимости от их типов: сеточно-химический для ОПП; позитивный комбинированный для ДПП и метод металлизации сквозных отверстий для МПП.

2. Создать специальное технологическое оборудование и технологическое оснащение; организовать серийный выпуск ПП на специализированных заводах для централизованного обеспечения ими предприятий.

3. Ввести на предприятиях различных отраслей комплекс нормативно-технической документации, регламентирующей проектирование, типовые технологические процессы изготовления и испытания всех видов ПП.

В последнее время идет интенсивный поиск путей улучшения технологии печатного монтажа: совершенствование отдельных технологических операций, создание и внедрение на их основе прогрессивных технологических процессов производства ПП; создание и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами производства ПП; разработка принципиально новых конструкторских решений в области средств коммутации элементов РЭА.

Опыт создания государственных стандартов показал, что при выборе оптимального варианта технологического процесса изготовления ПП необходимо провести достаточный объем исследовательских работ. Цель этих работ — проанализировать действующие технологические процессы, усовершенствовать их, сопоставить варианты с точки зрения достижения требуемого качества, рентабельности и других показателей, направленных на достижение наибольшей эффективности или, если необходимо, разработать новую оптимальную технологическую последовательность.

Например, в ГОСТ 23662—79—ГОСТ 23665—79 (Печатные платы. Механическая обработка. Требования к типовым технологическим процессам) предусматривается, что для получения металлизированных отверстий следует использовать сверление с применением специальных твердосплавных сверл. Установлению этого требования предшествовал тщательный анализ и экспериментальные исследования по применению различных методов получения отверстий в ПП. Так, штамповка, несмотря на то, что этот процесс более производителен, была отклонена, так как не

обеспечивает требуемого качества отверстий, которые должны подвергаться металлизации. Электрофизические методы отпали, в основном, из-за низкой производительности (в среднем одно отверстие за 12 с) и т. д.

Стандартизации типовых технологических процессов на государственном уровне должны предшествовать:

- классификация деталей, методов обработки, элементов технологических процессов, материальных средств оснащения;

- конструкторско-технологическая унификация деталей и сборочных единиц;

- типизация технологических процессов и их элементов;

- разработка базовых процессов на основе прогрессивных решений, принимаемых различными отраслями, производящими данный объект;

- создание технической документации и машиностроительной базы для организации серийного производства специального технологического оснащения, а также создание предприятий, на которых организовано производство объекта по типовым решениям.

В качестве примера рассмотрим ГОСТ 23661—79. Платы печатные многослойные. Требования к типовому технологическому процессу прессования. В технологическом процессе изготовления МПП важное значение придается операции прессования, которая характеризуется большим числом взаимосвязанных параметров, наличием существенных контролируемых возмущений и ошибок изменения временных характеристик процессов. Сложность проведения этой операции обуславливается также нестабильностью исходных характеристик прессуемых материалов и отсутствием специального технологического оборудования.

В соответствии с разработанным базовым технологическим процессом изготовления МПП пресс-форма с набранной заготовкой загружается между предварительно нагретыми до рабочей температуры плитами пресса. Прессование осуществляется двухступенчатым давлением с выдержками, необходимыми для каждой конкретной партии прессуемых материалов, и последующим охлаждением под давлением до требуемой температуры. Для автоматизации процесса прессования был проведен комплекс экспериментально-исследовательских работ по установлению зависимости качества прессуемых МПП от различных факторов технологического процесса [11]. После изучения физической сущности явлений, происходящих в процессе прессования плат, удалось установить закономерность исследуемого процесса, дать математическое описание и внедрить прогрессивный процесс прессования МПП на многих предприятиях различных отраслей. Экономический эффект от внедрения этого стандарта на 60 предприятиях составил 1,3 млн. руб.

В этом стандарте предусмотрено, что гидравлические прессы должны быть оснащены устройством для склеивания МПП, пультом периферийной автоматики и прибором для определения момента приложения второй ступени давления; заготовки МПП перед

прессованием должны быть очищены и сопротивление изоляции этих слоев не должно быть менее 1000 МОм. Срок хранения заготовок слоев МПП после очистки должен быть не более 24 ч, в одной пресс-форме следует устанавливать не более трех пакетов заготовок МПП.

Проведение подобных работ в области производства ПП позволило разработать государственные стандарты и требования к типовым технологическим процессам механической обработки получения рисунка схемы, прессования, химической и гальванической металлизации, лужения проводящего рисунка схемы.

#### **4.2. Требования безопасности при выполнении операций механической обработки печатных плат**

При выполнении работ по механической обработке ПП должна быть предусмотрена защита от опасных и вредных производственных факторов. Таковыми факторами могут быть подвижные элементы производственного оборудования; повышенное содержание пыли стеклоткани в воздухе рабочей зоны; повышенное содержание паров хладона-113; повышенная температура поверхностей оборудования и обрабатываемых заготовок; опасный уровень напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Уровни вредных производственных факторов в производственных помещениях и на рабочих местах не должны превышать предельно допустимых значений, предусмотренных ГОСТ 12.1.005—76, санитарными нормами на проектирование промышленных предприятий, утвержденными Госстроем СССР.

Источниками опасных и вредных производственных факторов при механической обработке ПП являются: вырубной и пробивной штампы; вращающийся режущий инструмент; пыль стеклоткани, образующаяся в процессе механической обработки заготовок ПП, изготовленных из стеклотекстолита; пары хладона-113, выделяемые при обезжиривании рабочих поверхностей режущего инструмента и технологической оснастки; нагревательные устройства и заготовки ПП, нагретые до 80—90°С; металлические части технологического оборудования и измерительных приборов, которые могут оказаться под напряжением свыше 60 В в результате повреждения изоляции электропроводки.

В производственных процессах механической обработки ПП следует применять оборудование, соответствующее требованиям ГОСТ 12.2.003—74, ГОСТ 12.2.009—80 и ГОСТ 12.2.017—76.

Для снятия заготовок ПП из пробивных или вырубных штампов, а также для загрузки и выгрузки заготовок из нагревательных устройств следует применять пинцеты или захваты.

Помещения, в которых производится механическая обработка ПП, должны быть оборудованы общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией. Требования к вентиляционным системам должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.4.021—75.

Для удаления вредных веществ из рабочей зоны до уровня, установленного ГОСТ 12.1.005—76, должны быть предусмотрены: местная вытяжная вентиляция;

вытяжные шкафы для обезжиривания хладоном-113 рабочих частей инструмента и технологической оснастки; герметически закрывающаяся тара для хранения хладоном-113 в количестве, не превышающем его недельную потребность.

Для предупреждения поражения электрическим током должны выполняться требования ГОСТ 12.2.007—75. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей утверждены Госэнергонадзором.

Производственные помещения должны удовлетворять требованиям строительных норм и правилам санитарных норм проектирования промышленных предприятий, утвержденных Госстроем, СССР, а также нормативной документацией Министерства здравоохранения СССР по санитарному содержанию помещений и оборудования производственных предприятий.

Требования к отоплению, водоснабжению и канализации, а также нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соблюдаться в соответствии по ГОСТ 12.1.005—76 и СН 245—71; требования по обеспечению пожарной безопасности — по ГОСТ 12.1.004—76; уровень звукового давления — по ГОСТ 12.1.003—76.

При выполнении операций механической обработки ПП производственный персонал должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты.

Состояние воздушной среды проверяют по концентрации вредных веществ в рабочей зоне. Содержание вредных веществ, находящихся в воздухе, следует определять по методикам, утвержденным Министерством здравоохранения СССР.

## Список литературы

1. **Справочник** по печатным схемам: Пер. с англ./Под ред. К. Ф. Кумбза. — М.: Сов. радио, 1972. — 696 с.
2. **Конструирование** и технология печатных плат/А. Т. Жигалов, Е. П. Котов, К. Н. Шихаев, Б. А. Хохлов. — М.: Высшая школа, 1973. — 214 с.
3. **Бельцев А. Т.** Технология производства радиоаппаратуры. — М.: Энергия, 1971. — 544 с.
4. **Аренков А. Б.** Печатные и пленочные элементы радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971. — 314 с.
5. **Дьюк Л. М.** Печатные схемы. — М.: ИЛ, 1963. — 304 с.
6. **Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — Л.: Наука, 1976. — 279 с.
7. **Федулова А. А., Котов Е. П., Явич Э. Р.** Сеточно-химическая технология изготовления печатных плат. — М.: Радио и связь, 1984. — 56 с.
8. **Львов Б. С., Сагалаев Г. В.** Внутренние напряжения в стеклопластике при высоком наполнении. — М.: МДНТП, 1968.
9. **А. с. 544188 СССР** Способ прессования многослойных печатных плат/М. Махмудов, Л. И. Жак, О. П. Синалеев. — Оpubл. 1976, Бюл. № 23.
10. **А. с. 635690 СССР** Устройство управления прессом для изготовления многослойных печатных плат и монтажных плат/М. Махмудов, О. П. Синалеев, Е. П. Котов, Л. И. Жак. — Оpubл. 1978, Бюл. № 26.
11. **Котов Е. П., Махмудов М. Жак Л. И.** Автоматизация процесса прессования многослойных печатных плат. — М.: Радио и связь, 1982. — 56 с.
12. **Кортен Х. Т.** Разрушение армированных пластиков. — М.: Химия, 1967.
13. **Исследование** влияния процесса сверления на прочность сцепления металлизированного пистона и контактной площадки с диэлектрическим основа-

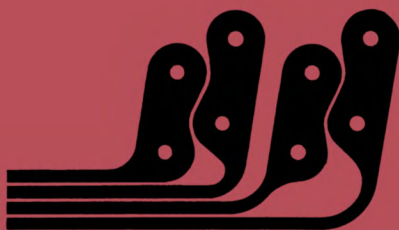
- нием/М. Махмудов, Л. И. Жак, С. И. Моисеев, В. И. Гайдар//Вопросы микроэлектроники. — 1968. — Вып. 3.
14. **Махмудов М., Можжевелов Б. Н., Синельщиков А. К.** Исследование тепловых явлений при сверлении переходных отверстий в многослойных печатных платах/Вопросы радиоэлектроники. — 1972. — Вып. 4.
  15. **Махмудов М.** Специальные твердосплавные сверла//Научно-технический реферативный сборник «Металлорежущий контрольно-измерительный инструмент». — 1974. — Вып. 12.
  16. **Пластмассы.** — 1970. — № 6.
  17. **Махмудов М., Жак Л. И.** Механическая обработка при производстве печатных плат//Вопросы радиоэлектроники. — 1979. — Вып. 10.
  18. **Махмудов М., Устинов Ю. А.** Стандартизация требований к типовым технологическим процессам//Стандарты и качество. — 1970. — № 8.
  19. **Сахно Э. А., Шустов В. П., Махмудов М.** Типовые гибкие автоматизированные производства печатных плат//Техника средств связи. — 1983. — № 4.
  20. **Опыт внедрения плазмохимической очистки отверстий МПП/С. А. Шапиро, А. П. Ратников, Т. С. Шушианова, Л. Б. Пилавова**//Внедрение новых высокоэффективных технологических процессов и экономии материалов в производстве печатных плат. — Л.: ЛДНТП, 1983.
  21. **Оборудование для сверления и фрезерования печатных плат/С. А. Шапиро, П. В. Максимов и др.**//Информэлектрон: Сер. Технология и организация производства, 1982.



## Оглавление

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава первая. Конструктивно-технологические особенности изготовления печатных плат . . . . .</b>	<b>4</b>
1.1. Основные методы изготовления печатных плат и способы их механической обработки . . . . .	4
1.2. Исходные материалы для изготовления печатных плат и особенности их обработки . . . . .	5
1.3. Технические требования к печатным платам после механической обработки . . . . .	13
<b>Глава вторая. Экспериментальные исследования процессов механической обработки печатных плат . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1. Выбор конструктивных, геометрических параметров режущих инструментов и режимов механической обработки печатных плат . . . . .	15
2.1.1. Получение заготовок фиксирующих и технологических отверстий . . . . .	15
2.1.2. Получение монтажных и металлизированных отверстий . . . . .	20
2.1.3. Механическая зачистка поверхности . . . . .	42
2.1.4. Обработка контура . . . . .	43
2.2. Выбор методов базирования и особенности изготовления печатных плат под автоматическую сборку радиоэлементов . . . . .	48
<b>Глава третья. Оборудование и оснастка для механической обработки печатных плат . . . . .</b>	<b>52</b>
3.1. Требования к оборудованию для механической обработки . . . . .	52
3.2. Особенности импортного оборудования для механической обработки печатных плат . . . . .	58
<b>Глава четвертая. Стандартизация типовых технологических процессов механической обработки печатных плат и требования безопасности . . . . .</b>	<b>66</b>
4.1. Задачи стандартизации . . . . .	66
4.2. Требования безопасности при выполнении операций механической обработки печатных плат . . . . .	69
Список литературы . . . . .	70

25 к.



Механическая  
обработка  
печатных  
плат

Издательство «Радио и связь»