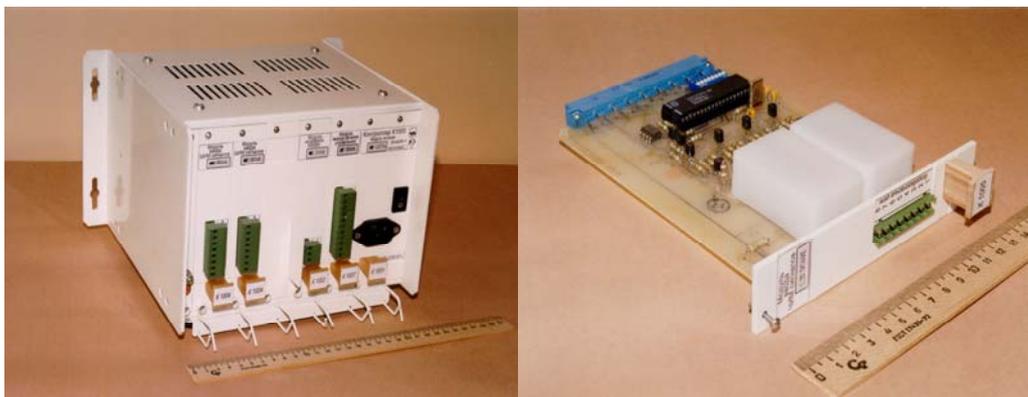




А.Н. Гормаков, Н.А. Воронина

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИБОРОВ. ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ



Федеральное агентство по образованию  
Томский политехнический университет

А.Н. Гормаков, Н.А. Воронина

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ  
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИБОРОВ.  
ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ**

Учебное пособие

**Издательство ТПУ  
Томск 2006**

УДК 658.5(075.8)  
ББК32.844.1я73  
Г69

Гормаков А.Н., Воронина Н.А.  
Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы. – Учебное пособие.– Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.

ISBN

В пособии рассматриваются основы конструирования электронных систем приборов и электрооборудования, конструкционные системы электронных устройств, методы оценки надежности и технологичности электронных изделий; конструкции и методы изготовления печатных плат, конструкционные материалы для изготовления печатных плат; технологии, материалы и оборудование для монтажа печатных узлов; проблемы перехода отечественной электронной промышленности на бессвинцовые технологии монтажной пайки. Пособие предназначено для студентов специальности «Приборостроение» технических университетов.

УДК 658.5(075.8)  
ББК32.844.1я73  
Г69

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета

*Рецензенты:*

Директор фирмы «ЭРМИС+», г. Томск  
Приборы для кабельной промышленности,  
кандидат технических наук, доцент  
*А.Р. Свендровский*

Директор ООО «Сибирские цифровые приборы, СДД», г. Томск  
*Р.В. Трошин*

©Томский политехнический университет, 2006  
© Оформление. Издательство ТПУ, 2006  
© Гормаков А.Н., Воронина Н.А.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электронные устройства являются неотъемлемой частью современных приборов и оборудования различного применения. Их доля и значение непрерывно возрастает. В то же время, опережающие темпы развития электронных компонентов, повышение плотности монтажа и надежности определяют высокие требования к новым конструкциям электронных устройств и технологическим процессам их изготовления.

Книга, которую вы держите в руках, посвящена основам конструирования электронных систем приборов и электрооборудования; конструкциям и методам изготовления печатных плат; технологиям электромонтажных работ и современным технологиям получения контактных соединений пайкой. Приведены отечественные и зарубежные стандарты на конструкции, материалы и технологии, а также даны характеристики некоторых образцов технологического оборудования. Это обусловлено тем, что материалы и технологическое оборудование обеспечивают точностные характеристики конструкции. Определенный объем начальных знаний технологии изготовления необходим для назначения параметров печатной платы во время конструирования. Оценка надежности и технологичности изделия на этапе конструирования позволяет создавать конкурентоспособные приборы и оборудование. Не зная особенностей технологии предприятия-изготовителя печатных плат, невозможно в короткие сроки грамотно спроектировать изделие. В пособии анализируются проблемы перехода отечественной электронной промышленности на бессвинцовые технологии монтажной пайки.

Пособие предназначено для студентов специальности «Приборостроение» и «Электрооборудование летательных аппаратов» и может быть полезно студентам ряда других специальностей технических университетов и специалистам, желающим повысить свою квалификацию в данной области. Принципиальным отличием данного учебного курса от других изданий по данной тематике является рассмотрение в единстве вопросов конструирования, технологии и выбора материалов.

В 2005 г. было издано ряд учебников и монографий, посвященных проектированию и технологии печатных плат. Наряду с этой книгой, настольными книгами при проектировании печатных узлов электронных устройств должен стать учебник Пироговой Елены Вячеславовны «Проектирование и технология печатных плат» и монографии известного российского специалиста, д.т.н., профессора А.М. Медведева «Печатные платы. Конструкции и материалы» и «Технология производства печатных плат». Особо ценными для профессиональных технологов, разработчиков и практиков являются последние две книги, где приведены данные по составам технологических растворов и режимам.

## ГЛОССАРИЙ

*Техническое задание (ТЗ)* – составляется исполнителем на основании технических требований заказчика.

*Техническое предложение* – этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными в ТЗ характеристиками, и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ.

*Эскизный проект* – совокупность конструкторских документов, содержащих проработанные конструкторско-технологические решения, дающие общие представления об изделии, а также данные, определяющие возможность использования по назначению и основные параметры разрабатываемого изделия.

*Технический проект* – это совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и технические данные для разработки рабочей документации.

*Рабочая документация* – это совокупность конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца.

*Стандартизация* – это процесс установления и применения правил с целью упорядочения деятельности в данной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии, с соблюдением функциональных условий и требований безопасности.

*Государственные стандарты РФ (ГОСТ)* – устанавливаются преимущественно на продукцию массового или серийного производства: имеющую межотраслевое применение.

*Отраслевые стандарты (ОСТ)* – устанавливаются на те виды продукции, которые не являются объектами государственной стандартизации, – на нормы, правила, требования, понятия и обозначения, регламентация которых необходима для обеспечения оптимального качества продукции данной отрасли, а также для упорядочения производства, обеспечения координации производственно-технической деятельности предприятий отрасли.

*Республиканские стандарты (РСТ)* – устанавливаются по согласованию с Государственным комитетом стандартов РФ и с соответствующими министерствами и ведомствами по закрепленным группам продукции, изготавливаемой предприятиями министерств и ведомств союзных республик.

*Стандарты предприятий (СТП)* – устанавливаются на нормы, правила, требования, методы и другие объекты, имеющие применение только на данном предприятии.

*Надежность* – свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

*Работоспособность* – состояние изделия, при котором оно в данный момент времени соответствует установленным требованиям конструкторской документации в отношении основных параметров, обеспечивающих выполнение заданной функции.

*Исправность* – состояние изделия, при котором оно в данный момент времени полностью удовлетворяет всем требованиям конструкторской документации, установленным как в отношении основных параметров, обеспечивающих выполнение заданных функций, так и в отношении второстепенных параметров.

*Отказ* – событие, после появления которого изделие теряет работоспособность, т. е. какой-либо один или несколько основных параметров не соответствуют требованиям (допускам), установленным конструкторской документацией.

*Внезапный отказ* – отказ, возникший в результате скачкообразного изменения значений одного или нескольких основных параметров изделия.

*Постепенный отказ* – отказ, возникший в результате постепенного изменения значения одного или нескольких основных параметров изделия.

*Дефект* – отказ, вызванный несоответствием изделия конструкторской документации, которое может быть полностью исключено.

*Сбой* – самоустраняющийся отказ.

*Повреждение* – событие, после которого изделие не теряет способности выполнять заданные функции, но не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в отношении второстепенных параметров.

*Независимый отказ* – отказ, возникший по любым причинам, кроме действия другого отказа.

*Зависимый отказ* – отказ, возникший в результате действия другого отказа.

*Конструкционный отказ* – отказ, возникший в результате конструктивных ошибок, в том числе в результате неправильного схемного решения (схемный отказ).

*Технологический отказ* – отказ, вызванный нарушением или несовершенством технологического процесса.

*Производственный отказ* – отказ, обусловленный несовершенством производственного процесса.

*Эксплуатационный отказ* – отказ, возникший в результате нарушения установленных норм эксплуатации.

*Интенсивность отказов* – это отношение количества изделий (элементов), отказавших в течение рассматриваемого отрезка времени, к произведению среднего числа изделий (элементов), сохранивших работоспособность, на продолжительность рассматриваемого отрезка времени.

*Кратность резервирования* – число резервных элементов или резервных соединений, приходящихся на один резервируемый элемент или резервируемое соединение.

*Функционирование* – выполнение изделием заданных функций в соответствии с установленными требованиями.

*Ремонт* – режим эксплуатации, при котором устраняется отказ.

*Профилактика* – режим эксплуатации, в результате которого надежность изделия приводится к установленному уровню (возможно к первоначальному).

*Технологичность* – совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения, при обеспечении установленных значений показателей качества и принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

*Конструктивная приемственность* – совокупность свойства изделия, характеризующая повторяемость в нем составных частей, относящихся к изделиям данной классификационной группы, и применяемостью новых составных частей, обусловленных его функциональным назначением, а также некоторые требования к сложности ТП сборки.

*Энергоемкость изделия* – характеризует расход топлива или энергии на производство.

*Типизация* – сведение всего возможного многообразия конструктивных решений к небольшому числу.

*Унификация* (от лат. Unito – единство, facere – делать) – использование одних и тех же конструкций для создания аппаратуры различного назначения, т. е. расширение области использования типовых решений.

*Печатная плата (ПП)* – изоляционное основание с нанесенными на его поверхность плоскими печатными проводниками, монтажом или печатной схемой.

*Заготовка печатной платы (заготовка)* – материал основания печатной платы определенного размера, который подвергается обработке на всех производственных операциях..

*Печатный проводник* – участок токопроводящего покрытия (слоя), нанесенного на изоляционное основание или одна проводящая полоска в проводящем рисунке.

*Печатная схема* – система печатных проводников, электро- и радио-элементов, нанесенных на общее диэлектрическое основание.

*Печатный элемент* – сопротивление, емкость, индуктивность, разъем, контактный контакт и другие элементы, получаемые нанесением на изоляционное основание слоя металла или диэлектрика.

*Перемычка печатной платы (перемычка)* – отрезок проводникового материала, не входящий в рисунок печатной платы и обеспечивающий электрическое соединение между двумя точками проводящего рисунка на одной стороне печатной платы.

*Печатный монтаж* – система печатных проводников, обеспечивающая электрическое соединение элементов схемы или экранирование.

*Проводящий рисунок* – рисунок печатной платы, образованный проводниковым материалом.

*Односторонняя печатная плата (ОПП)* – печатная плата, на одной стороне которой выполнен проводящий рисунок.

*Двухсторонняя печатная плата (ДПП)* – печатная плата, на обеих сторонах которой выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения.

*Многослойная печатная плата (МПП)* – печатная плата, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими рисунками на двух и более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения.

*Гибкая печатная плата (ГПП)* – печатная плата, имеющая гибкое основание.

*Межслойное соединение* – участок проводникового материала, входящий в рисунок печатной платы, предназначенный для электрического соединения проводящих рисунков на различных слоях или сторонах печатной платы.

*Рисунок печатной платы* – конфигурация проводникового и (или) диэлектрического материалов на печатной плате.

*Сторона монтажа печатной платы (сторона монтажа)* – сторона печатной платы, на которой устанавливаются навесные элементы.

*Сторона пайки печатной платы (сторона пайки)* – сторона печатной платы, на которой производится пайка выводов навесных элементов.

*Ширина печатного проводника* – поперечный размер печатного проводника в любой его точке.

*Расстояние между проводниками печатной платы (расстояние между проводниками)* – расстояние между краями соседних проводников на одном слое печатной платы.

*Контактная площадка печатной платы (контактная площадка)* – часть проводящего рисунка, используемая для соединения или подсоединения элементов радиоэлектронной аппаратуры.

*Гарантированный поясok контактной площадки (гарантированный поясok)* – минимально допустимая ширина контактной площадки отверстия печатной платы в узком месте.

*Металлизированное отверстие печатной платы (металлизированное отверстие)* – отверстие в печатной плате с осажденным на стенках проводниковым материалом.

*Печатный контакт* – участок проводящего рисунка, служащий в качестве одной части контактной системы.

*Монтажное отверстие печатной платы* – отверстие, используемое для соединения выводов навесных элементов с печатной платой, а также для любого электрического подсоединения к проводящему рисунку.

*Крепежное отверстие печатной платы (крепежное отверстие)* – отверстие, используемое для механического крепления печатной платы на шасси или для механического крепления элементов к печатной плате.

*Толщина печатной платы (толщина платы)* – толщина материала печатной платы, включая проводящий рисунок или рисунки.

*Фотошаблон рисунка печатной платы (фотошаблон)* – инструмент, используемый для копирования имеющегося на нем изображения с помощью света.

*Маркировка печатной платы (маркировка)* – совокупность знаков и символов на печатной плате.

*Фольгированный материал* – материал основания печатной платы, имеющий с одной или с двух сторон проводящую фольгу.

*Субтрактивный процесс* – процесс получения проводящих рисунков, заключающийся в избирательном удалении участков проводящей фольги.

*Subtratio (лат.)* – отнимание.

*Аддитивный процесс* – процесс получения проводящих рисунков, заключающийся в избирательном осаждении проводникового материала на нефольгированный материал основания.

*Additio (лат.)* – прибавлять.

*Осаждение* – процесс, заключающийся в химическом или электрохимическом нанесении металла на всю или часть поверхности основания и (или) проводящего рисунка.

*Травление фольги* – контролируемое химическое растворение материала фольги.

*Резист* – покрытие, диэлектрическое или металлическое, используемое в качестве защиты при выполнении последующих операций травления.

*Резистивная маска для облуживания* – теплостойкое покрытие, наносимое избирательно для защиты отдельных участков печатной платы в процессе облуживания и пайки.

*Проводящая фольга (фольга)* - листовой проводниковый материал, предназначенный для образования проводящего рисунка печатной платы.

*Активация* – операция по созданию тонкой пленки палладия (Pd) (осаждением из растворов солей Pd) на диэлектрическом основании печатной платы, способствующей последующему осаждению меди.

*Сенсибилизация* – операция по созданию тонкой пленки ионов двухвалентного олова ( $\text{Sn}^{+2}$ ) на диэлектрическом основании печатной платы, способствующей последующему осаждению меди.

*Химическая металлизация печатной платы* – осаждение ионов двухвалентной меди из ее комплексных солей на активированные поверхности.

*Гальваническая металлизация* – наращивание тонкого слоя химически осажденной меди до требуемой толщины методом электрохимического осаждения.

*Пайка* – образование соединений с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивание их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации.

*Припой* – материал для пайки и лужения с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов.

*Флюс* – неметаллическое вещество, предназначенное для удаления адсорбированного кислорода или оксидной пленки с поверхности паяемого металла и припоя, для предотвращения ее образования при пайке на воздухе, для изменения поверхностного натяжения жидкого припоя.

*Паяльник* – нагревательное устройство, используемое при низкотемпературной пайке. Рабочим элементом паяльника служит наконечник ( жало).

*ПОС-61* – припой оловянно-свинцовый. Состав: олово - 60...62%, свинец 40...28%, температура плавления - 183...190 °С.

*Инертные газы (водород, азот, аргон)* - применяются для защиты паяемого материала и жидкого припоя от непосредственного контакта их с кислородом воздуха.

# 1. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИБОРОВ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

## 1.1. Основы процесса конструирования

Конструирование является одной из основных частей процесса проектирования радиоэлектронных средств (РЭС), а его цель – физическое воплощение компромиссного решения, выработанного в результате работы всех участников. В создании РЭС участвуют различные организации, подразделения, исполнители. Организации делятся на заказчика, исполнителя, субподрядчика.

Заказчик формулирует технические требования к РЭС и осуществляет приемку разработанного изделия.

Технические требования (ТТ) на разработку РЭС определяют показатели назначения (мощность, чувствительность, разрешающую способность и т. д.), а также содержат требования к конструкции: наименование, число и назначение основных частей; габаритные, установочные и присоединительные размеры; требования по взаимозаменяемости частей, унификации, типизации, стандартизации и преемственности. Кроме того, в ТТ входят требования по охране окружающей среды, помехозащищенности, составу запасного имущества, безопасности работы, эргономике и эстетике, условиям эксплуатации (виду объекта установки, условиям климатических, механических, радиационных и биологических воздействий, порядку обслуживания, квалификации обслуживающего персонала и т. д.).

Исполнитель на основании ТТ разрабатывает техническое задание (ТЗ), в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяется порядок разработки и приемки изделия. Субподрядчик решает для исполнителя частные вопросы: разработку и поставку новых материалов, элементов, узлов, технологических процессов, методов измерений или проводит испытания, обработку на соответствие требованиям эргономики и т. д.

При проектировании конструкции РЭС в той или иной степени принимают участие различные подразделения предприятия:

- системотехнические (определение структуры РЭС, разбивка на наземную и бортовую части);
- схемотехнические (разработка схемы, разбивка ее на узлы);
- конструкторские (общая компоновка, выпуск конструкторской документации, сопровождение производства);
- технологические (установление последовательности изготовления, отработка режимов, подготовка производства);
- производственные.

Кроме того, в разработке принимают участие вспомогательные службы:

- надежности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний);
- снабженческие (поставка материалов, покупных изделий);
- патентные;
- автоматизированного конструкторского проектирования и т. д.

Все эти подразделения состоят из различных специалистов. Координация работы предприятий, подразделений и специалистов осуществляется с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков.

Ввиду того, что требования к параметрам разрабатываемых РЭС часто противоречивы (например, малая стоимость и высокая надежность), исходная информация для вновь создаваемых изделий не является достаточно полной, а исполнители при работе допускают ошибки, разработку РЭС и его конструкций проводят в несколько стадий (не менее двух): научно-исследовательская работа (НИР) и опытно-конструкторская (ОКР). Каждая стадия включает несколько этапов. В ходе выполнения работ на стадиях и этапах происходит постепенное уточнение принимаемых решений и нахождение оптимального. При этом устраняются ошибки, которые могут быть допущены как руководителями (ошибки планирования и др.), так и исполнителями (неправильный выбор технических решений, ошибки при выполнении конструкторской документации и т. д.). Причиной ошибок являются, как правило, недостаточная квалификация, недостаток информации, а также повышенная утомляемость работников при сжатых сроках разработки. Спецификой разработки РЭС является то, что на всех стадиях и этапах различные специалисты взаимодействуют друг с другом с самого начала разработки.

#### **Основные этапы проведения НИР:**

- 1) предплановый патентный поиск;
- 2) разработка и согласование с заказчиком технического задания, государственная регистрация НИР;
- 3) подготовительный этап – выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных технических заданий на основные части НИР;
- 4) основной этап – теоретические и экспериментальные исследования (выполнение теоретических изысканий, расчетов, математического моделирования), обработка результатов исследований, составление и оформление технической документации;
- 5) заключительный этап – обобщение результатов и оценка выполненной НИР (составление карты технического уровня, оценка полноты и

качества проведенной НИР, подготовка к предъявлению работы к приемке);

б) приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

**Этапы ОКР:** техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, разработка рабочей документации.

*Техническое задание (ТЗ)* составляется исполнителем на основании технических требований заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков. Объем экономических и производственных требований в этих ТЗ меньше, а технические требования более подробны, чем в основном ТЗ.

*Техническое предложение* – этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными в ТЗ характеристиками, и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ. На этом этапе составляют частные ТЗ для различных подразделений предприятия, оформляется технический отчет, иногда выполняются конструкторские документы.

*Эскизный проект* – совокупность конструкторских документов, содержащих проработанные конструкторско-технологические решения, дающие общие представления об изделии, а также данные, определяющие возможность использования по назначению и основные параметры разрабатываемого изделия. На основании эскизного проекта разрабатывается технический проект.

*Технический проект* – это совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и технические данные для разработки рабочей документации. На этом этапе проводятся различные расчеты и обоснования.

*Рабочая документация* – это совокупность конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца, установочной серии, серийного образца. После заводских испытаний опытного образца конструкторской документации присваивается литера «О»; после государственных, межведомственных, приемочных и других видов испытаний – литера «О<sub>1</sub>» на последующих стадиях (после повторных испытаний изготовленных изделий) – литеры «О<sub>2</sub>», «О<sub>3</sub>» и т. д. Конструкторская документация на изделие для установочной серии имеет литеру «У»; после испытаний установочной серии – литеру «А». После корректировки документации испытательной (головной) серии конструкторской документации присваивается литера «Б», что дает право наладить серийное или массовое производство изделия. Документации на изделие

для разового изготовления или нескольких изделий присваивают литеру «И».

В зависимости от сроков разработки, квалификации исполнителей, наличия прототипов и базовых несущих конструкций по согласованию с заказчиком отдельные этапы могут быть объединены. Это отражается в техническом задании.

Конструкторские документы (текстовые и графические) разрабатываются, начиная с этапа эскизного проекта. На разных этапах имеются обязательные конструкторские документы и документы, выполняемые по усмотрению разработчика. Номенклатура документации, выполняемой на том или ином этапе, называется комплектом (табл. 1.1, столбцы). Необходимо отличать комплект конструкторской документации от комплекта – вида изделия. Наибольшую номенклатуру конструкторских документов имеет рабочая документация на сборочную единицу, по объему наибольшее число документов может иметь комплекс изделия.

Таблица 1.1

Номенклатура конструкторских документов,  
разрабатываемых на различных этапах конструирования РЭС

Наименование документа	Шифр	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация на изделие			
					Детали	Сборочные единицы	Комплексы	Комплекты
Чертеж детали	-	-	-	+	⊕	-	-	-
Сборочный чертеж	СБ	-	-	-	-	⊕	-	-
Чертеж общего вида	ВО	+	+	⊕	-	-	-	-
Теоретический чертеж	ТЧ	-	+	+	+	+	+	-
Габаритный чертеж	ГЧ	+	+	+	+	+	+	-
Монтажный чертеж	МЧ	-	-	-	-	+	+	-
Схемы	-	+	+	+	-	+	+	+

Продолжение таблицы 1.1

Наименование документа	Шифр	Техническое предложение	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация на изделие			
					Детали	Сборочные единицы	Комплексы	Комплекты
Спецификация	СП	-	-	-	-	⊕	⊕	⊕
Ведомость спецификаций	ВС	-	-	-	-	+	+	+
Ведомость ссылочных документов	ВД	-	-	-	-	+	+	+
Ведомость покупных изделий	ВП	-	+	+	-	+	+	+
Ведомость согласования применения	ВИ	-	+	+	-	+	+	+
Ведомость держателей подлинников	ДП	-	-	-	-	+	+	+
Ведомость технического предложения	ПТ	⊕	-	-	-	-	-	-
Ведомость эскизного проекта	ЭП	-	⊕	-	-	-	-	-
Ведомость технического проекта	ТП	-	-	⊕	-	-	-	-
Пояснительная записка	ПЗ	⊕	⊕	⊕	-	-	-	-
Технические условия	ТУ	-	-	-	+	+	+	+
Программа и методика испытаний	ПМ	-	+	+	+	+	+	-
Таблицы	ТБ	+	+	+	+	+	+	+
Расчеты	РР	+	+	+	+	+	+	+
Патентный формуляр	ПФ	+	+	+	+	+	+	-
<p>Примечание:                      «□» – обязательный документ;                      «+» – документ, составляемый по усмотрению разработчика;                      «-» – документ не составляется.</p>								

## 1.2. Стандартизация конструкций РЭС

Стандартизация является важным звеном в системе управления техническим уровнем и качеством продукции, в том числе РЭС. Особое значение стандартизация приобретает в условиях перевода народного хозяйства на интенсивные методы, ускорения темпов научно-технического прогресса, сокращения сроков морального износа конструкций (РЭС гражданского назначения – до 6...8 лет; технологического оборудования – до 4...5 лет; изделий специального назначения – до 2...3 лет), что требует сокращения сроков конструирования и внедрения при одновременном улучшении качества конструкций.

По определению Международной организации по стандартизации, *стандартизация* – это процесс установления и применения правил с целью упорядочения деятельности в данной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии, с соблюдением функциональных условий и требований безопасности. Она основывается на результатах развития науки, техники, практического опыта, определяет основу не только настоящего, но и будущего развития и должна быть неразрывна с прогрессом. Это определение отражает все многообразие функций стандартизации, характеризует ее как деятельность, направленную на упорядочение, а не только на соблюдение каких-то правил и условностей.

*Задачи стандартизации:*

- превращение стандартов в средство внедрения новой техники;
- улучшение качества сырья, материалов и готовых изделий;
- применение стандартизации для управления техническим уровнем продукции и ее качеством;
- создание крупных межотраслевых систем стандартов, обеспечивающих оптимальные условия для проведения сложных работ в различных отраслях народного хозяйства.

*Формы стандартизации:* комплексная, опережающая и стандартизация межотраслевых систем. По определению Постоянной комиссии по стандартизации, при комплексной стандартизации осуществляется целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимосвязанных требований как к объекту стандартизации в целом, так и к его основным элементам в целях обеспечения оптимального решения конкретной проблемы. При этом стандартизации подлежит не только сам объект производства (его конструкция), но и материалы, полуфабрикаты, оснастка, оборудование, технологические процессы.

Опережающий характер стандартизации достигается разработкой стандартов на изделия, которые не начали проектироваться, внедряться, изготавливаться серийно. Особое внимание при этом обращается на организацию внедрения опережающего стандарта, для чего одновременно с его

разработкой готовят директивный документ о внедрении, план организационно-технических мероприятий, перечень предприятий, на которых будет внедрен стандарт. Контроль осуществляется базовыми и головными организациями отрасли, а также Госстандартом РФ.

Стандарт считается внедренным на предприятии, если установленные им нормы, требования и правила отражены в действующей технической документации, полностью выполняются в производстве и выпускаемая продукция полностью им соответствует. Направление стандартизации при переходе от опытного образца к серийному смещается от стандартизации объекта производства к стандартизации оборудования, технологической оснастки, технологических процессов.

Межотраслевая стандартизация широко применяется в РФ. Ярким примером этого является осуществление принципа стандартизации в самой стандартизации: создана Государственная система стандартизации, представляющая комплекс взаимосвязанных стандартов.

Кроме того, существует ряд крупных межотраслевых систем:

- Единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- Единая система технологической документации (ЕСТД);
- Система разработки и постановки продукции на производство (СППП);
- Система стандартов в области автоматизированного проектирования и др.

В настоящее время существует большое число стандартов, вид которых зависит от нескольких групп фактов:

- способа реализации стандарта – документа, содержащего нормы (требования), подлежащие выполнению, основной единицы или физической константы (ампер, абсолютный нуль температуры), предмета для физического сравнения (метр);

- категории стандарта по масштабу охвата народного хозяйства: государственный стандарт, отраслевой стандарт, стандарт предприятия, республиканский стандарт, международный стандарт (СТ СЭВ);

- вида стандарта по назначению для конкретного изделия: технические условия, параметры (размеры, напряжения и т. д.), марки материалов, сортамент, методы испытания, правила приемки, типовой технологический процесс и т. д.;

- вида стандарта по методическим признакам: организационно-методический, общетехнический (ЕСКД), проектно-конструкторский, производственно-технический.

При проектировании используют стандарты в виде документа, содержащего нормы (требования), подлежащие выполнению. Рассмотрим стандарты по масштабу охвата народного хозяйства.

*Государственные стандарты* РФ (ГОСТ) устанавливаются преимущественно на продукцию массового или серийного производства: имеющую межотраслевое применение. В частности, ГОСТ определяют терминологию, требования по устойчивости РЭС к механическим, климатическим, радиационным воздействиям, параметры некоторых конструктивных систем РЭС.

*Отраслевые стандарты* (ОСТ) устанавливаются на те виды продукции, которые не являются объектами государственной стандартизации, – на нормы, правила, требования, понятия и обозначения, регламентация которых необходима для обеспечения оптимального качества продукции данной отрасли, а также для упорядочения производства, обеспечения координации производственно-технической деятельности предприятий отрасли. Отраслевые стандарты могут также устанавливать ограничения (по номенклатуре, типоразмерам, нормам, требованиям и т. д.) или развивать государственные стандарты применительно к особенностям отрасли, если это не нарушает параметрических (например, размерных) рядов, не снижает качественных и эксплуатационных показателей, установленных государственными стандартами. Объектами отраслевой стандартизации, в частности, могут быть: отдельные виды продукции ограниченного применения, технологическая оснастка, предназначенная для производства и применения в данной области, сырье, материалы, полуфабрикаты внутриотраслевого применения, отдельные виды товаров народного потребления. Отраслевыми стандартами определяются размеры многих конструктивных систем РЭС и элементов.

*Республиканские стандарты* (РСТ) устанавливаются по согласованию с Государственным комитетом стандартов РФ и с соответствующими министерствами и ведомствами по закрепленным группам продукции, изготавливаемой предприятиями министерств и ведомств союзных республик. Республиканские стандарты устанавливаются также на товары народного потребления. Как правило, при конструировании РЭС специального назначения РСТ не используются.

*Стандарты предприятий* (СТП) устанавливаются на нормы, правила, требования, методы и другие объекты, имеющие применение только на данном предприятии. Объектами стандартизации на предприятии могут быть детали, узлы и агрегаты изготавливаемых (разрабатываемых) изделий, нормы для разработки продукции предприятия и методы расчета, нормы в области организации и управления производством предприятия, технологические нормы и требования, типовые технологические процессы, оснастка, инструмент и т. д. Стандарты предприятия могут носить характер ограничений или развития (по номенклатуре, типоразмерам, применяемым материалам и т. п.) государственных, отраслевых, республиканских стандартов применительно к особенностям данного предприятия при условии, что это не ухудшает пока-

зателей, установленных государственными, отраслевыми или республиканскими стандартами.

Особое место в системе стандартизации занимает совместная работа, проводимая странами СНГ и ЕС для дальнейшего повышения эффективности производства, удовлетворения потребностей людей, производства товаров с показателями качества выше мирового уровня. Это достигается путем сокращения сроков разработки и внедрения отечественных стандартов (уменьшения объема работ по разработке новых стандартов благодаря использованию опыта социалистических стран) и обеспечения специалистов информацией о передовом зарубежном опыте. К объектам международной стандартизации в области РЭС относятся термины и определения, требования к материалам, элементам (соединителям, ИС и т. д.), аппаратуре для радиовещания, телевидения, записи и воспроизведения информации, средствам измерения и автоматизации и т. д.

Особая роль отводится стандартизации с внедрением автоматизированных систем управления (АСУ, АСУ ТП) и необходимостью выпуска продукции на уровне лучших мировых образцов. Для успешного выполнения этих задач требуется дальнейшее совершенствование самой стандартизации. Так, система присвоения десятичных номеров конструкторским документам недостаточно удобна, так как составлена по геометрическим признакам изделий, без учета их функционального назначения. Поэтому платы бытовых РЭС и РЭС специального назначения имеют одинаковый десятичный номер, хотя технологическая характеристика их разная. Это затрудняет управление производством с использованием АСУ.

В настоящее время число ГОСТов достигает более 20000, ОСТов и СТП – еще больше, что затрудняет поиск информации при разработке конструкции и контроль на соответствие требованиям стандартов. Технический уровень и качество продукции на внутреннем и мировом рынке постоянно повышаются. Поэтому стандарты не являются чем-то неизменным. Устаревшие стандарты аннулируются, вместо них вводятся новые.

Все изменения отражаются в специальных периодических изданиях Госстандарта РФ, к которым в первую очередь относятся:

- Указатель государственных стандартов РФ (ежегодник);
- Указатель отраслевых и республиканских стандартов (ежегодник);
- Информационный указатель ГОСТ РФ (ежемесячник);
- Информационный указатель отраслевых и республиканских стандартов (выходит два раза в месяц);
- Информационный указатель технических условий (ежемесячник).

В указателях содержатся номера и названия стандартов, действующих в текущем году. Все изменения отражаются в информационных указателях.

### 1.3. Конструкционные системы РЭС

Несущие конструкции предназначены для размещения компонентов РЭС и обеспечения их функционирования в реальных условиях эксплуатации. Использование несущих конструкций позволяет улучшить компоновку, теплоотвод, экранирование и заземление, а также повысить надежность и технологичность составных частей и изделия в целом.

Одним из самых важных объектов стандартизации являются конструкционные системы РЭС, представляющие совокупность базовых несущих конструкций, находящихся в определенной соподчиненности на основе единого модуля и оптимальной технологии производства. Они предназначены для создания оптимальных компоновок РЭС с учетом функциональных, механических, тепловых факторов, требований эргономики и ремонтпригодности.

Существует большое число конструкционных систем РЭС, предназначенных для различных видов аппаратуры, в том числе базовые несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры, система унифицированных типовых конструкций государственной системы приборов и средств автоматизации, стойки аппаратуры систем передачи информации по проводным линиям связи, конструкционная система телевизионной студийной аппаратуры, шкафы и корпуса блоков электронных измерительных приборов, блочные унифицированные конструкции на основе плат в дюймовой системе, конструкционная система самолетной аппаратуры, базовые несущие конструкции судовой аппаратуры и т. д.

Существует также ряд конструкционных систем стран. Все эти конструкционные системы появились в разных ведомствах в разное время и имели разное число и название уровней разукрупнения из числа (ряда):

- элемент (ЭРЭ, ИС, соединитель и т. п.);
- плата (ячейка, корпус частичный, типовой элемент замены);
- блок (кассета, каркас, кожух, корпус комплектный, панель, крейт);
- шкаф (стойка, тумба, пульт, стол, блок комплексный).

Старые названия остались в технической литературе прежних выпусков, например:

– корпус частичный – базовая конструкция (рис. 1.1) с несущими элементами в виде платы и передней панели или стержней, соединяющих переднюю и заднюю панели, предназначенная для размещения компонентов, плат и других изделий;

– корпус комплектный – базовая конструкция (рис. 1.2) с несущими элементами в виде боковых стенок или стержней, соединяющих переднюю и заднюю балки и рамки, предназначенная для размещения плат, частичных корпусов и других изделий;

– корпус комплексный (рис. 1.3) – базовая конструкция, предназначенная в основном для размещения комплектных корпусов в соответствии

с техническими требованиями; выполняется в виде шкафа, стойки, стола или тумбы;

– кожух – конструкция (рис. 1.4) с несущими элементами в виде боковых стенок, соединенных крышками, предназначенная для компоновки плат, ячеек, частичных и комплектных корпусов.

Конструкционные системы РЭА и уровни их разукрупнения характеризуются размерами на основе единого модуля – 2,5 мм при использовании метрической системы мер и 2,54 мм для дюймовой системы, допустимой рассеиваемой мощностью, габаритами, массой, механической прочностью, защищенностью от климатических воздействий, конструкцией электрических соединений, наличием или отсутствием магистральности, соответствием международным стандартам, стоимостью. Параметры конструкционных систем чаще всего приведены в отраслевых стандартах.

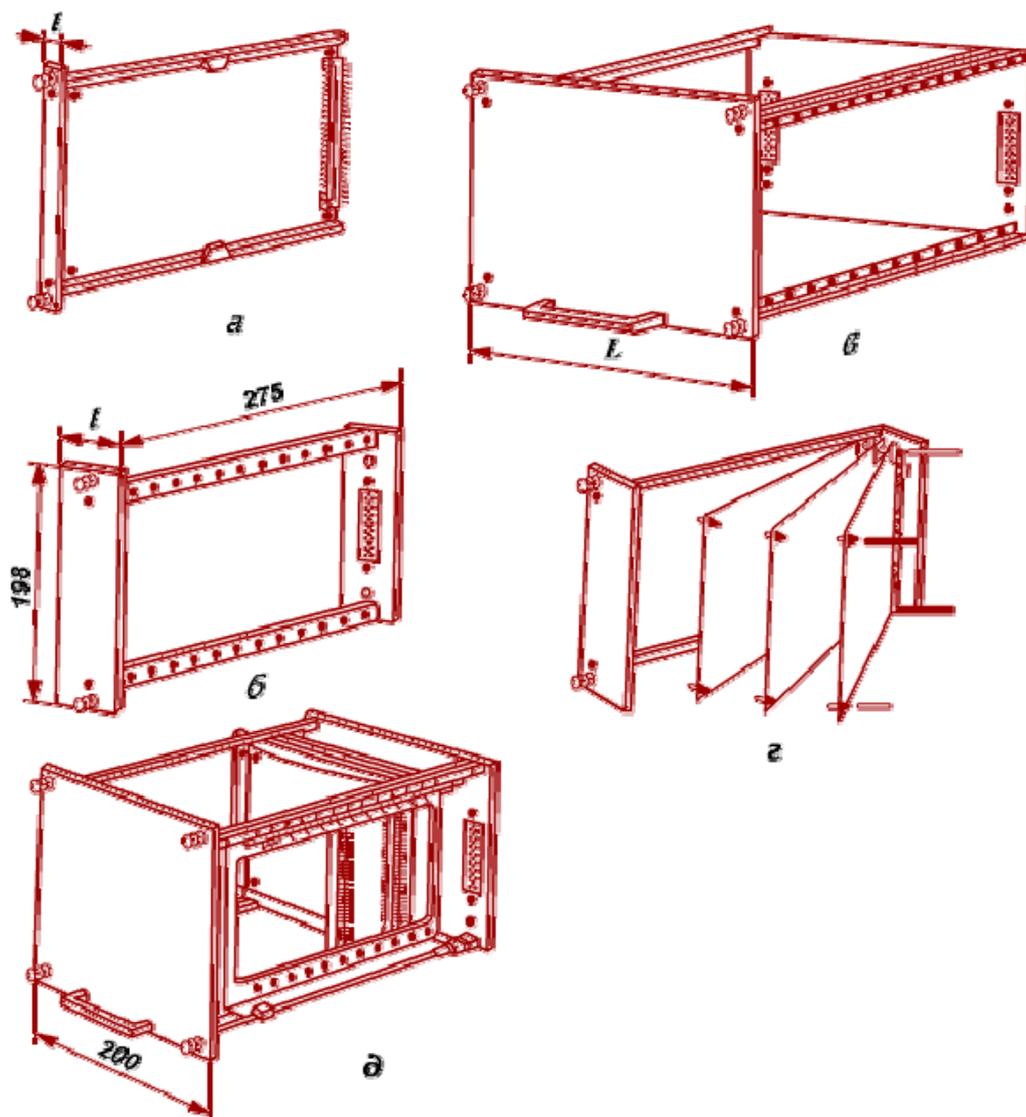


Рис. 1.1. Схема конструкций частичных корпусов

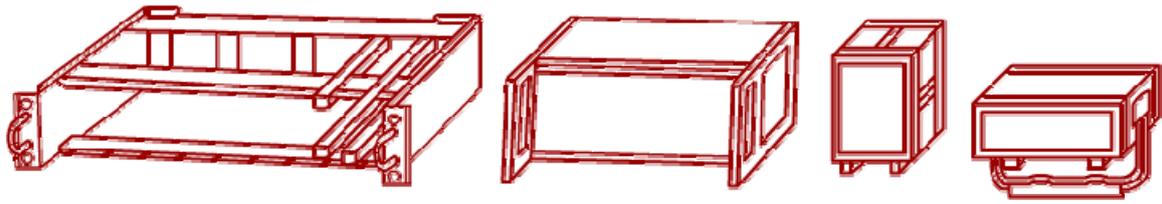


Рис. 1.2. Схема конструкций комплексных корпусов

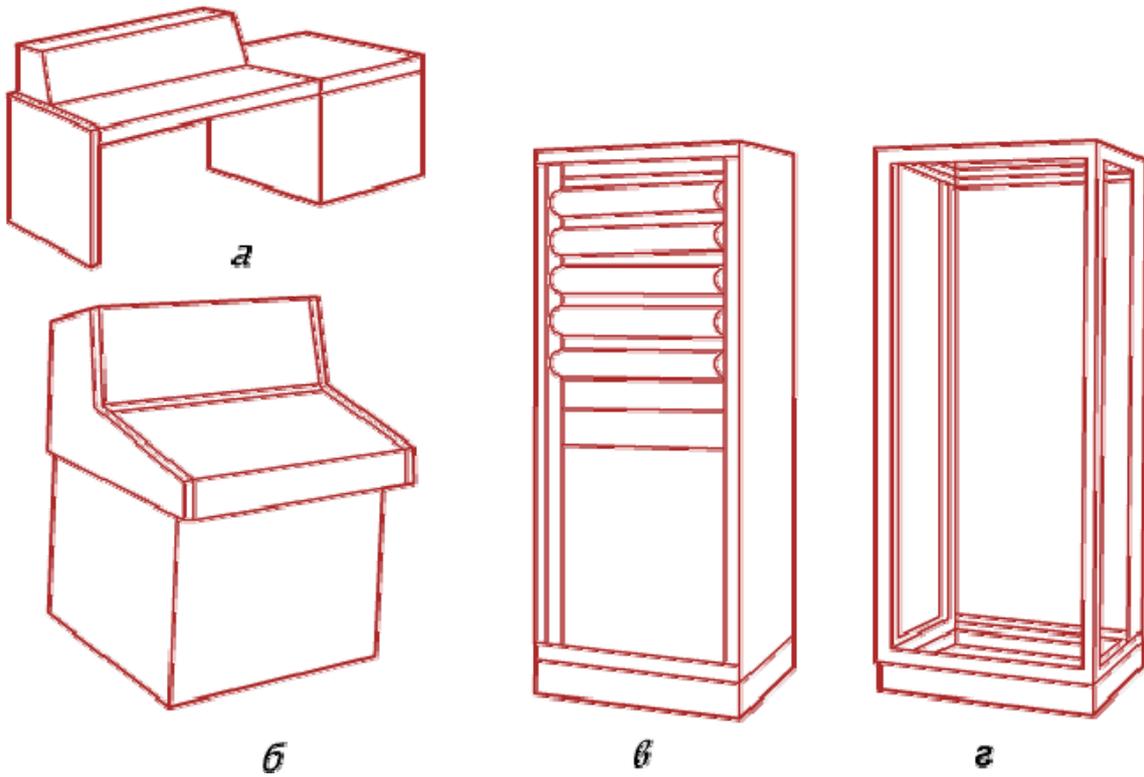


Рис. 1.3. Корпуса комплексных блоков

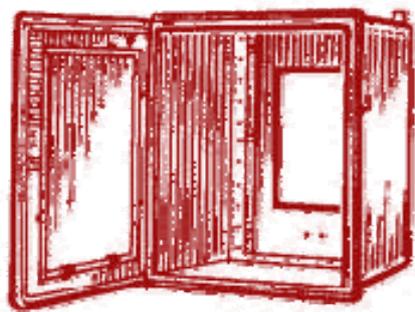


Рис. 1.4. Навесной кожух

## Конструкция корпусов ИМ

Параметры конструкционных систем РЭС в значительной степени определяются типом и параметрами элементов (ИС, ЭРЭ), используемых в модулях нулевого уровня (РЭМ 0). Поэтому другим важным объектом стандартизации является конструкция корпусов ИС. Различают корпусные и бескорпусные элементы, в том числе на носителях (пленочных, керамических, полимерных).

*Корпусные элементы* используются в основном в негерметичных конструкциях. Их достоинством является защищенность элементов ИС от дестабилизирующих факторов, а к недостаткам – увеличение габаритов, массы и стоимости из-за наличия корпуса и усложнения сборки, ухудшения теплоотвода, а также электрических параметров (из-за увеличения длины выводов, их сопротивления и индуктивности, межвыводной емкости). Однако применение корпусированных ИС не исключает необходимости защиты от дестабилизирующих факторов других элементов РЭС (проводников печатных плат, электрических соединителей, электрических соединителей из объемного провода). Используют пять типов корпусов ИС (табл. 1.2).

Таблица 1.2

### Корпуса ИС

Тип корпуса	Форма	Расположение выводов		Шаг выводов $e$ , мм
		относительно проекции тела корпуса	относительно плоскости основания	
1	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное	2,5
2	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное	2,5; 1,25
3	Круглая	В пределах и за пределами тела корпуса по окружности	Перпендикулярное	Под углом $360^\circ / n$ ( $n$ – число выводов круглого корпуса)
4	Прямоугольная	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное	2,25; 0,625
5	Прямоугольная	В пределах проекции тела корпуса	Без выводов	1,25

Они различаются формой, видом и расположением внешних выводов, которые бывают штырьковыми и планарными, расположенными с шагом 2,5; 1,25; 0,625 мм с двух сторон корпуса, по всем его сторонам или по всему его основанию (рис. 1.5). Современные микросхемы, в основном импортные, выпускаются в корпусах с очень высокой плотностью расположения выводов по периметру корпуса.

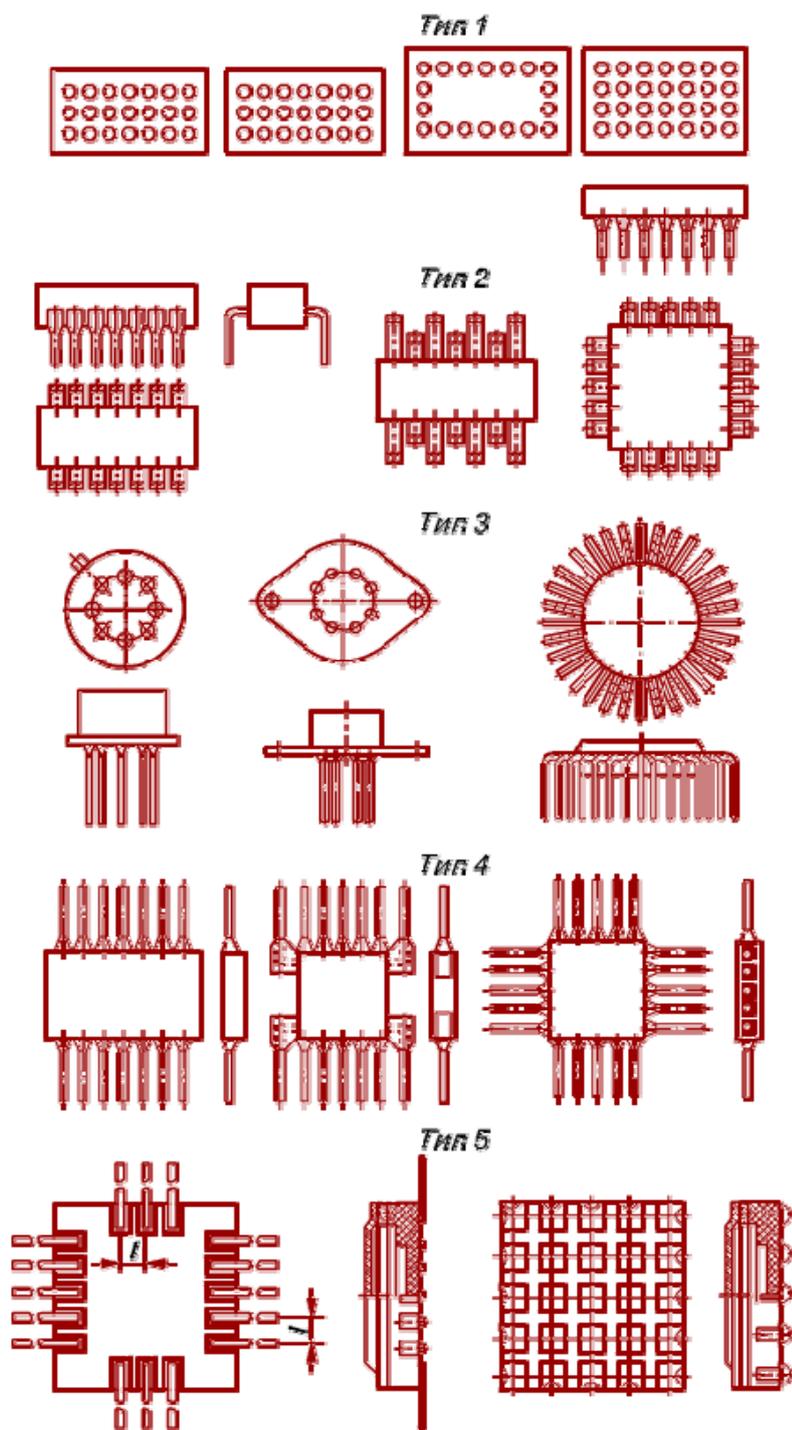


Рис. 1.5. Типы корпусов ИС (1 – шаг расположения выводов)

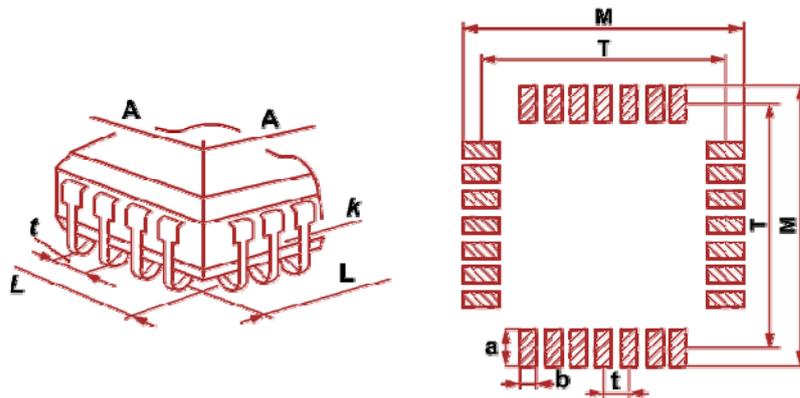


Рис. 1.6. Корпус микросхемы с  $J$ -выводами

На рис. 1.6 изображен корпус микросхемы с  $J$ - выводами. Подобные микросхемы обычно компонуются на плате с минимальными конструктивными зазорами, вот почему осуществить пайку вручную здесь не возможно. Корпуса имеют 18, 24, 28, 40, 48, 52, 64 и более выводов. 40-выводные корпуса с расположением выводов в два ряда показаны на рис. 1.7. Корпуса с двухрядным расположением внешних выводов называются *DIP*-корпусами (*dual – in – line – package*).

Увеличение разрядности микропроцессоров требует увеличения числа внешних выводов ИС. Увеличение разрядности позволяет увеличить быстродействие вычислительной системы и объем адресуемой памяти. Площадь 40-выводного корпуса с двумя рядами выводов в несколько раз превышает площадь расположенного в нем кристалла. Это объясняется тем, что при шаге расположения выводов 2,5 мм длина корпуса с двухрядным расположением выводов получается очень большой. Кроме того, из-за значительной длины выводов недопустимо (для быстродействующих схем) увеличиваются омическое сопротивление выводов (более 0,5 Ом) и паразитная емкость (более 5 пФ). Выходом из положения является использование корпусов типа 5 с выводами, расположенными по периметру (периферии) или по всей площади основания (рис. 1.5, тип 5). Такие корпуса называют в нашей стране микрокорпусами (периферийными и матричными), а за рубежом – кристаллодержателями или кристаллоносителями. В тех случаях, когда корпус выполнен из материала с малой теплопроводностью (например, из полимерного материала), в него могут быть введены теплоотводящие шины (рис. 1.8).

*Бескорпусные элементы* являются объектом отраслевой стандартизации. Они имеют малые габариты (рис. 1.9) и массу и используются в составе микросборок или герметизированных блоков (часто для бортовых РЭС и РЭС СВЧ). Выводы бескорпусных элементов выполняются в виде контактных площадок, могут быть проволочными или балочными.

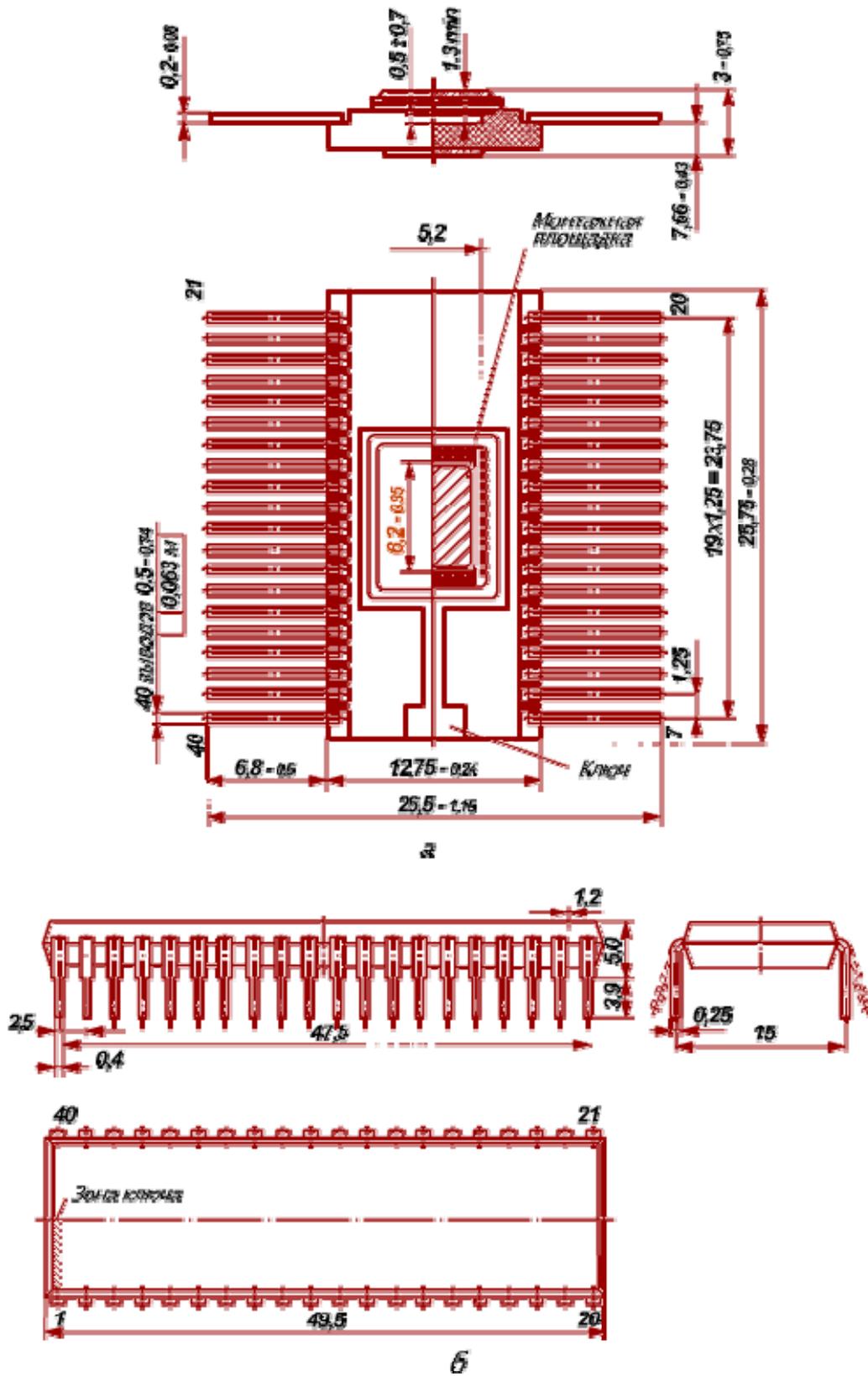


Рис. 1.7. Конструкция металлокерамического корпуса (а) и пластмассового корпуса (б)

В ряде случаев бескорпусные элементы располагаются на ленточном пленочном носителе (рис. 1.10), что облегчает их контроль, электротренировку, автоматизацию сборки и монтажа. Лентой-носителем служит тонкая (толщиной 0,05...0,15 мм) пластмассовая (полиамидная, полиэфирная и др.) одно-, двух-, трехслойная пленка (лента) шириной 8...70 мм. Полиамидные ленты обладают высокой термостойкостью (возможен их кратковременный нагрев до 400° С), а также стабильными физическими и химическими свойствами при воздействии кислот. Кроме того, их можно подвергать селективной химической обработке и использовать в качестве подложек для вакуумного напыления металлических пленок. Полиэфирные пленки Mylar на основе полиэтилентереффоля толщиной 35 мкм закрепляется клеем на предварительно нанесенном адгезионном слое толщиной 10...25 мкм. Травлением получают систему «паучковых» выводов шириной 60...100 мкм и покрывают их защитным слоем золота. Типы корпусов микросхем, широко применяемых в настоящее время, приведены на рис.1.11.

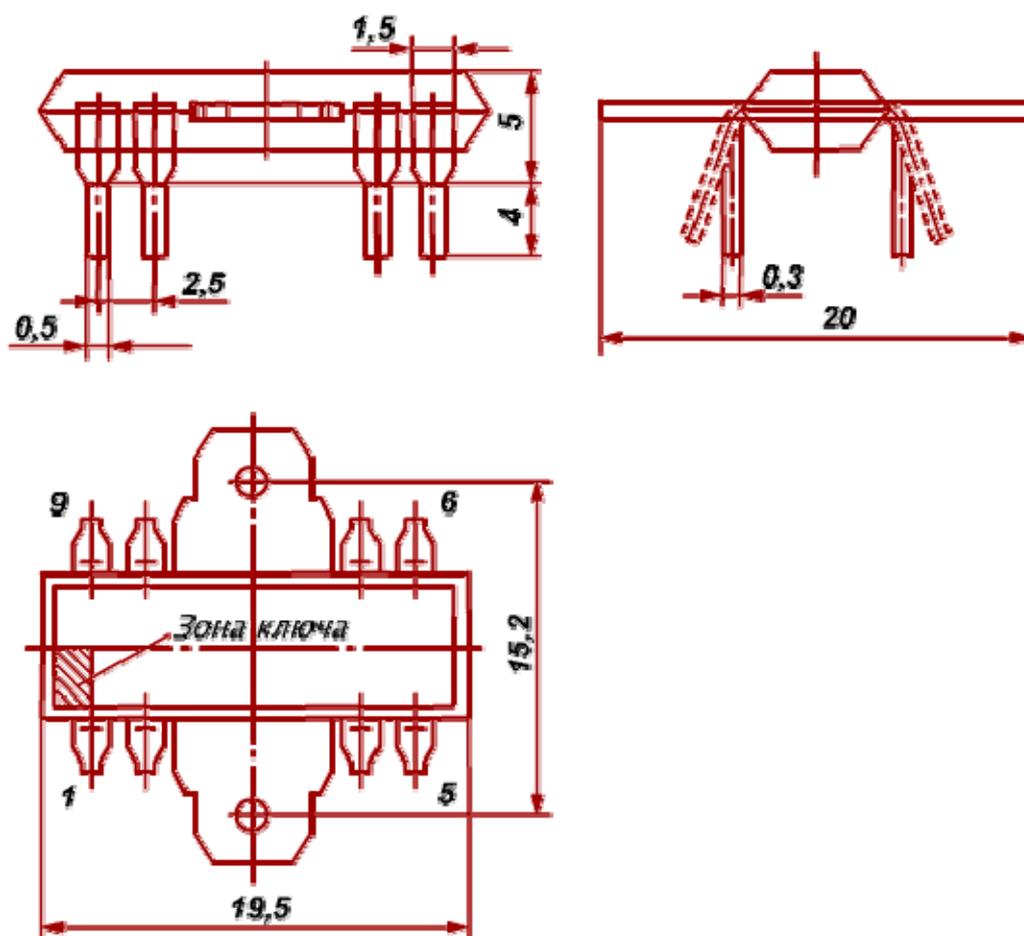


Рис. 1.8. Полимерный монолитный корпус с теплоотводящей шиной

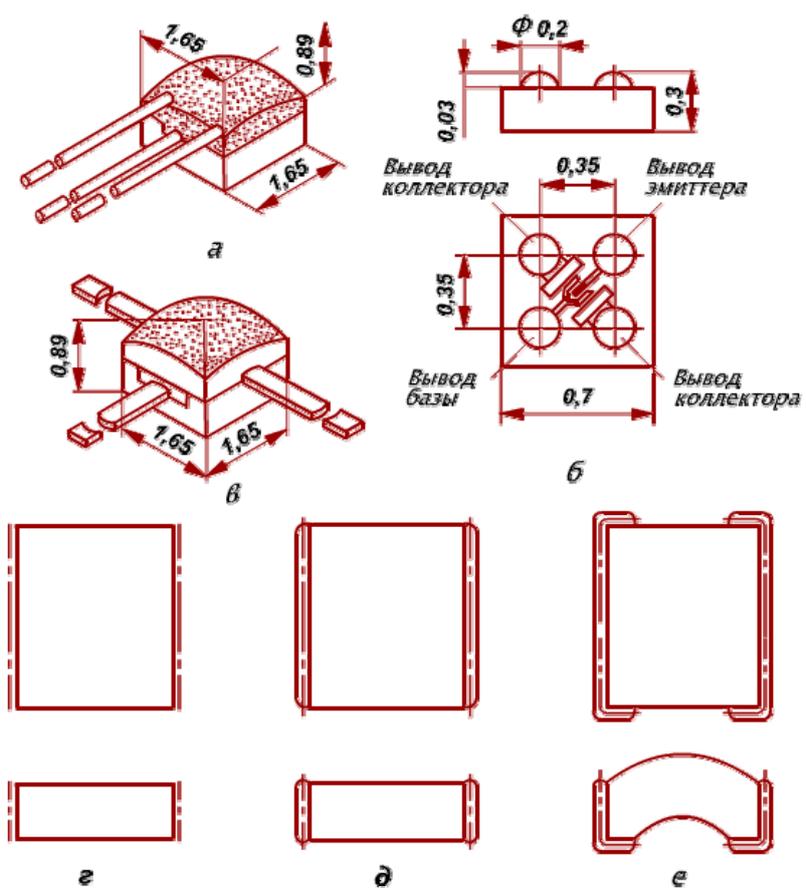


Рис. 1.9. Бескорпусный транзистор с гибкими (а), шариковыми (б) и балочными (в) выводами; нелуженый (z) и луженый (д, е) бескорпусные конденсаторы

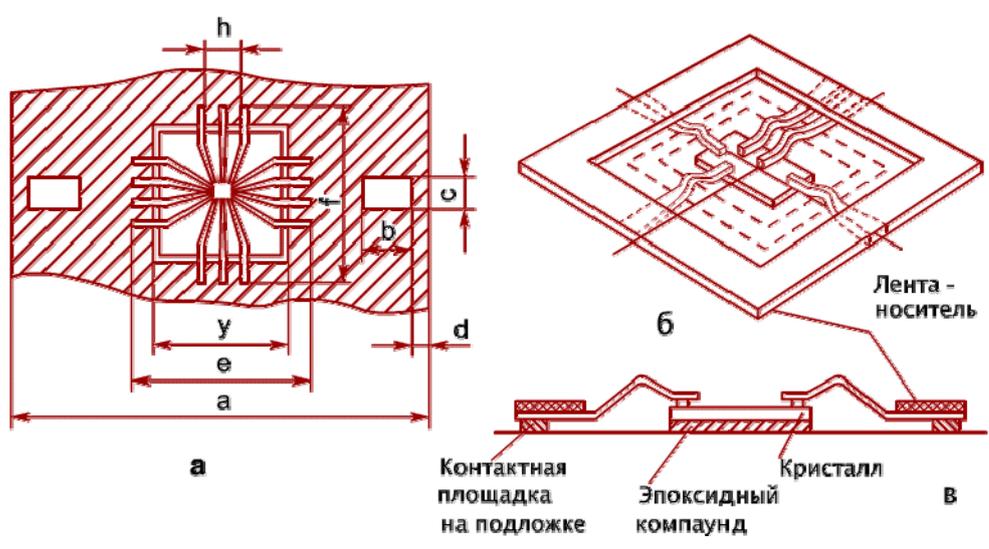


Рис. 1.10. Пленочный (ленточный) носитель с кристаллом:  
 а – размещение кристалла на ленте-носителе до обрезки;  
 б – после обрезки внешнего контура; в – установка на подложку

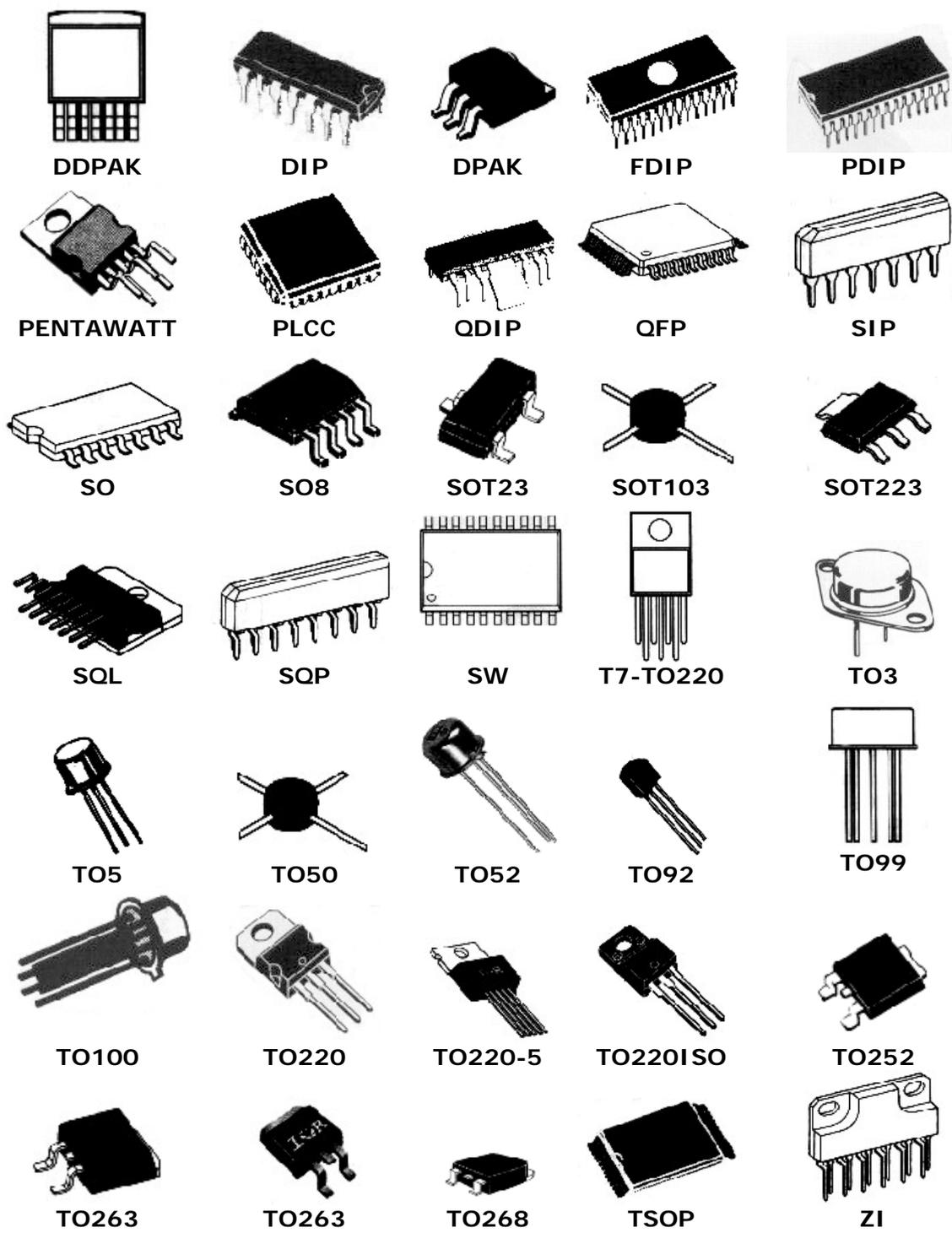


Рис. 1.11. Типы корпусов микросхем

## 1.4. Конструкция электронной системы как объекта производства

Конструкция РЭС (радиоэлектронных систем) реализуется в соответствии с конструкторской документацией в процессе производства. Основной частью производственного процесса является технологический процесс (ТП), в результате которого происходит направленное изменение свойств и формы материалов, полуфабрикатов (заготовок), деталей, а также механическое и электрическое соединение их между собой с определенной точностью и производительностью. Конструкция и технология изготовления РЭС тесно связаны и взаимообусловлены.

Характер используемых ТП не только оказывает влияние на конструкцию, но и определяет такие свойства, как экономически целесообразная плотность компоновки узлов, стоимость и надежность РЭС на этапе производства и расходы при эксплуатации; масса, габариты, энергопотребление; конструкция узлов для подключения испытательной аппаратуры. В свою очередь, конструкция определяет структуру ТП производства РЭС, т. е. номенклатуру используемых частных ТП, последовательность их реализации (последовательное, параллельное или смешанное производство узлов); требования к точности поддержания технологических режимов; требования к структуре и типу средств контроля (испытания) элементов, узлов и конструкции в целом; возможность механизации и автоматизации производства (возможность использования роботов и манипуляторов).

Конструкция РЭС зависит:

- от типа производства (единичное, серийное, массовое);
- его вида (механическая обработка, диффузия примесей, эпитаксия, гальваника и т. д.);
- типа элементов (корпусные, бескорпусные ИС, степень их интеграции);
- номенклатуры и параметров уже освоенных ТП;
- возможности освоения новых прогрессивных ТП.

Изделия специального назначения выпускаются на предприятиях единично или мелкими сериями. Бытовая электроника производится серийно или массово. Чем выше серийность производства, тем меньше стоимость аппаратуры (увеличение объема выпуска изделий на три порядка снижает стоимость изделий на порядок), но подготовка производства занимает больше времени.

Обычно в состав конструкции РЭС входят элементы, изготавливаемые на специализированных производствах (цехи или предприятия): ЭРЭ и ИС, электрические соединители, печатные платы, крепежные и кабельные изделия и т. д. Если подобные изделия приобретаются по кооперации, то они называются комплектующими. От конструкции зависит соотношение изделий комплектующих и собственного производства, а следовательно, и

характер ТП. Большое влияние на характер ТП оказывает элементная база. Для корпусированных ИС малой степени интеграции в качестве коммутационных оснований обычно используют двухсторонние печатные платы, и не всегда требуется герметизация всего блока. Для бескорпусных элементов высокой степени интеграции используют многослойные монтажные основания (керамические, полимерные, стеклотекстолитовые и т. д.), гибкие печатные шлейфы и обязательна герметизация компонентов в составе блока. Естественно, что ТП в первом и втором случае существенно различаются.

### **1.5. Надежность электронных узлов и электрооборудования**

*Надежность* – это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Надежность один из важнейших показателей качества изделий. Для большинства изделий народного хозяйства повышение надежности дает большой экономический эффект, так как увеличивается время безотказной работы, уменьшается время простоев при ремонтах и техническом обслуживании, сокращается численность персонала, занятого на эксплуатации изделий, сокращается ремонтная база, уменьшается количество запасных деталей и, в конечном итоге, уменьшается количество изделий, необходимых для выполнения поставленной задачи.

Для изделий, ремонт которых в процессе эксплуатации невозможен, надежность как показатель качества имеет еще большее значение. Особую важность надежность приобретает для летательных аппаратов.

#### **Оценка надежности**

Состояние надежности оценивается различными количественными критериями:

- вероятностью исправной работы;
- средним временем исправной работы;
- сроком службы;
- техническим ресурсом;
- интенсивностью (опасностью) отказов;
- частотой отказов;
- коэффициентом профилактики;
- коэффициентом вынужденного простоя;
- коэффициентом использования изделия;
- коэффициентом отказов;
- коэффициентом расхода комплектующих элементов и др.

Для оценки надежности может быть использован или один или одновременно несколько критериев. Выбор конкретных критериев определяется назначением изделия, конструктивными особенностями и условиями эксплуатации. Использование количественных критериев для оценки надежности позволяет:

- производить расчет надежности;
- четко определять требования, предъявляемые к надежности вновь разрабатываемых изделий;
- рассчитывать сроки службы изделий;
- определять необходимое количество ЗИП (запасного имущества и приборов);
- определять периодичность и содержание технического обслуживания;
- определять количество изделий, необходимых для выполнения поставленной задачи.

В то же время количественный критерий надежности должен отвечать определенным требованиям: позволять с достаточной простотой вычислять надежность изделия. По его величине можно сравнительно легко судить о надежности, т. е. незначительные изменения в надежности должны находить отражение в изменении величины количественной характеристики; включать максимальное количество факторов, влияющих на надежность.

Получение данных для вычисления количественного критерия не должно представлять большой сложности. Базой для расчета большинства количественных показателей надежности являются статистические данные, накопленные в процессе эксплуатации аналогичных изделий. В качестве математического аппарата при расчетах применяются математическая статистика и теория вероятности.

### **Определение некоторых количественных характеристик надежности**

**Интенсивность (опасность) отказов  $\lambda(t)$**  – это отношение количества изделий (элементов), отказавших в течение рассматриваемого отрезка времени, к произведению среднего числа изделий (элементов), сохранивших работоспособность, на продолжительность рассматриваемого отрезка времени:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{\text{ср}}(t)\Delta t},$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов;  $n(t)$  – число отказавших изделий за определенный отрезок времени;  $\Delta(t)$  – рассматриваемый отрезок времени

(обычно 1 ч);  $N_{cp}(t)$  – среднее число изделий, сохранивших работоспособность в расчетном отрезке времени.

$$N_{cp}(t) = \frac{N(t) + N(t + \Delta t)}{2},$$

где  $N(t)$  – число исправно работающих изделий на начало расчетного интервала времени;  $N(t + \Delta t)$  – число исправно работающих изделий на конец расчетного интервала времени.

**Пример**

Определить интенсивность отказов электромашин, установленных на изделия. Количество электромашин, исправно работавших на начало расчетного периода,  $N(t) = 150$  шт. Расчетный период работы  $\Delta t = 600$  ч. Число отказавших электромашин за расчетный период  $n(t) = 3$  шт.

**Решение**

$$N(t + \Delta t) = N(t) - n(t) = 150 - 3 = 147 \text{ шт.};$$

$$N_{cp}(t) = \frac{N(t) + N(t + \Delta t)}{2} = \frac{150 + 147}{2} = 148 \text{ шт.}$$

Интенсивность отказов составляет

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N_{cp}(t)\Delta t} = \frac{3}{148 \cdot 600} = 0,38 \cdot 10^{-4} \text{ (1/ч)}.$$

Кривая изменения интенсивности отказов показана на рис. 1.12.

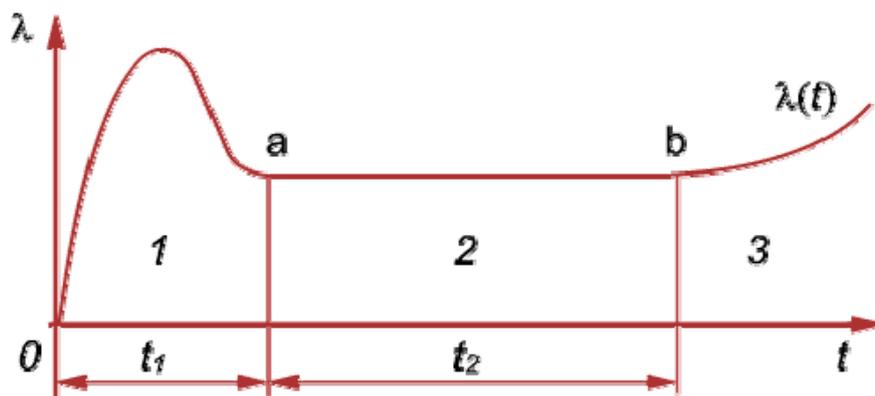


Рис. 1.12. Кривая интенсивности отказов

На участке 1 (от 0 до  $a$ ) происходит процесс приработки изделий, при этом вскрываются внутренние дефекты составляющих элементов и

дефекты качества сборки изделия. Этот участок характеризуется повышенной интенсивностью отказов.

Для повышения надежности приборов в период эксплуатации целесообразно время  $t_1$  выработать на испытательном стенде в условиях предприятия. Участок 2 характеризует равномерную интенсивность отказов при эксплуатации приборов:

$$\lambda(t) = \text{const} = \lambda.$$

Таким образом, на этом участке интенсивность отказов в различные отрезки времени будет одинаковой. При таком положении вероятность исправной работы изделий будет равна

$$P(t) = e^{-\lambda(t)},$$

где  $P(t)$  – надежность работы изделия;  
 $e$  – основание натурального логарифма.

Если интенсивность отказов не зависит от времени, то среднее время исправной работы будет

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}.$$

При этом вероятность исправной работы может быть записана следующим образом:

$$P(t) = e^{-\lambda(t)} = e^{-\frac{t}{T_{\text{ср}}}}.$$

На участке 3 (после точки  $b$ ) происходит увеличение интенсивности отказов. Это происходит оттого, что все большее количество составляющих элементов и изделие в целом вырабатывают свой ресурс и, в конечном итоге, наступает полный невосстанавливаемый отказ изделия. Во избежание этого в конце второго этапа, т. е. в точке  $b$ , изделие должно быть снято с эксплуатации для ремонта, а невосстанавливаемые изделия подлежат списанию или переводятся на выполнение других менее ответственных функций.

Интенсивность отказов является наиболее характерным количественным показателем надежности. Он более объективно определяет состояние надежности, т. к. для его расчета используются статистические данные, полученные при длительной эксплуатации аналогичных или подобных изделий. И, кроме того, интенсивность отказов используется при определении других количественных показателей надежности.

### Частота отказов (для невосстанавливаемых изделий)

Под *частотой отказов* понимается отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

$$\alpha(t) = \frac{n(t)}{N_0 \Delta t},$$

где  $\alpha(t)$  – частота отказов;

$n(t)$  – число отказавших изделий в установленном интервале времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ ;

$\Delta t$  – интервал времени;

$N_0$  – первоначальное число испытываемых изделий.

Кривая изменения частоты отказов строится на основании опытных данных (рис. 1.13). На этой кривой точки  $a$  и  $b$  соответствуют аналогичным точкам на кривой интенсивности отказов. Участок от 0 до  $t_1$  соответствует периоду приработки. Число отказов на этом участке сравнительно большое, но они быстро уменьшаются. На участке от  $t_1$  до  $t_2$ , который характеризует период нормальной эксплуатации, изменение идет в сторону уменьшения частоты отказов сравнительно медленными темпами.

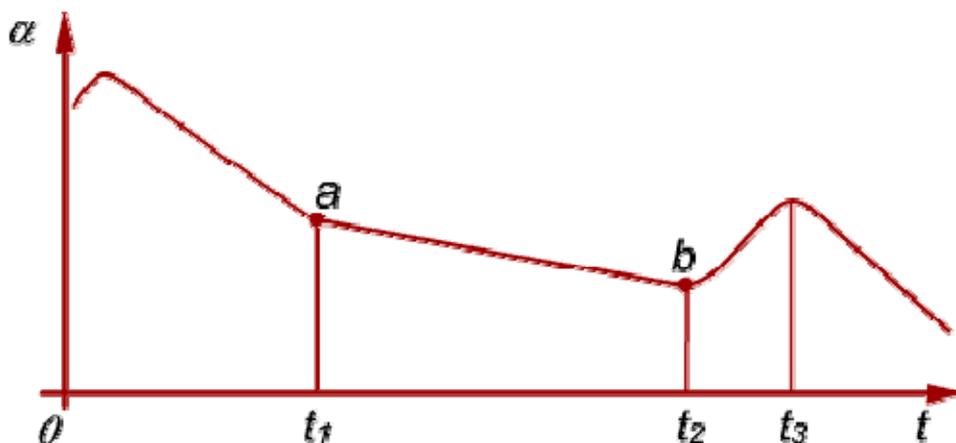


Рис. 1.13. Кривая изменения частоты отказов

За точкой  $b$  ( $t_2$ ) частота отказов резко возрастает и достигает наибольшего значения во время  $t_3$ . В дальнейшем (после точки  $t_3$ ) частота отказов снова резко уменьшается, т. к. значительно сокращается число эксплуатируемых изделий.

Частота отказов может быть рекомендована для оценки надежности изделий и элементов изделий, которые после отказов снимаются с эксплуатации

и не ремонтируются. Этот показатель надежности можно использовать также для определения запасных изделий и их элементов, необходимых для выполнения поставленной задачи в течение установленного периода времени:

$$n(t) = \alpha(t)N_0 \Delta t.$$

### ***Средняя частота отказов (для восстанавливаемых изделий)***

Под *средней частотой отказов* понимается отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия заменяются новыми:

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N\Delta t},$$

где  $\omega(t)$  – средняя частота отказов;

$n(t)$  – число вышедших из строя изделий (элементов изделий) в интервале времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ ;

$N$  – число испытываемых изделий (элементов изделий);

$\Delta t$  – интервал времени.

Эта характеристика дает возможность определить число отказов изделий по вине определенных элементов за определенный отрезок времени. Она достаточно полно характеризует надежность ремонтируемых изделий. Причем, если средняя частота отказов в определенный отрезок времени имеет постоянное значение  $\omega(t) = \text{const}$ , то ее можно приравнять к постоянному значению интенсивности отказов в тот же отрезок времени:

$$\omega(t) = \lambda(t) = \text{const}.$$

### ***Среднее время между двумя соседними отказами***

*Средним временем между двумя соседними отказами* называется математическое ожидание времени исправной работы изделия между соседними отказами:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{n-1} + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где  $n$  – число отказов изделия за время испытания  $t$ ;

$t_i$  – время исправной работы изделий между  $i = 1$  и  $i$ -м отказами изделия.

Этот показатель является величиной случайной и, несмотря на то, что является весьма наглядной характеристикой, недостаточно полно оценивает время исправной работы от отказа к отказу.

### **1.6. Факторы, влияющие на надежность**

Все факторы, влияющие на надежность, делятся на три основные группы:

- 1) конструкторские;
- 2) производственные;
- 3) эксплуатационные.

В процессе конструирования закладывается определенная теоретическая надежность изделия. В процессе производства обеспечивается фактическая надежность каждого конкретного изделия. В процессе эксплуатации надежность поддерживается на требуемом уровне правильной организацией технического обслуживания и соблюдением установленных режимов работы изделия.

#### **Обеспечение надежности в процессе конструирования**

Более 1/3 отказов изделий происходит по причинам, возникающим в процессе конструирования. Эти причины могут быть объективными, зависящими от уровня развития техники. Наряду с этим, в процессе разработки изделий могут иметь место погрешности расчетов, отклонения от оптимального схемного и конструктивного решения или прямые промахи в разработках.

Для обеспечения большей надежности изделий в процессе конструирования следует:

- максимально снижать количество элементов, входящих в состав изделия;
- использовать в изделии элементы высокого качества;
- подбирать элементы с такими номинальными данными, которые создавали бы облегченный режим их работы;
- резервировать соединения и элементы;
- предусматривать защитные устройства от воздействия внешней среды и терморегуляторы;
- проводить граничные испытания макетов;
- включать в схему автоматические сигнальные устройства для определения места отказа и информации об этом обслуживающего персонала;
- компоновать конструкцию с учетом удобства технического обслуживания.

### **Количество элементов**

Для повышения надежности создаваемых изделий необходимо стремиться к уменьшению количества мест, в которых может возникнуть отказ, т. е. необходимо стремиться к уменьшению элементов изделий. Если рассматривать каждый любой элемент изделия как источник возникновения отказов, надежность которого всегда меньше единицы:  $P(t) < 1$ , то суммарная надежность изделия за время  $t$  при последовательном соединении будет

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot \dots \cdot P_N(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^N \left( \int_0^t \lambda_i(t) dt \right) \right].$$

На практике наиболее часто интенсивность отказов изделий является величиной постоянной. При этом время возникновения отказов обычно подчиняется экспоненциальному закону распределения.

Тогда

$$P(t) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^N \lambda_i t \right].$$

Если имеется  $r$  типов элементов и  $i$ -й тип содержит  $N_i$  равнонадежных элементов, то

$$P(t) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i t \right].$$

Для расчета надежности необходимо знать:

- 1) вид соединения элементов расчета надежности;
- 2) типы элементов, входящих в изделие, и число элементов каждого типа;
- 3) величины интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$ , входящих в изделие.

Примерные значения  $\lambda(t)$  для некоторых видов элементов по данным отечественных и зарубежных источников приведены в табл. 1.5. Принимая во внимание режим работы элементов, требуется ввести поправочные коэффициенты:  $a_i$ , учитывающий температуру и электрическую нагрузку (табл. 1.7), и  $k_i$ , учитывающий механические нагрузки и относительную влажность окружающего воздуха (табл. 1.6 – 1.8).

При таком положении надежность изделия в целом будет всегда ниже надежности одного составного элемента и, следовательно, чем больше элементов входит в состав изделия, тем меньше вероятность безотказной работы его (рис. 1.14). Таким образом, в процессе разработки изделий необходимо стремиться к уменьшению количества составных элементов изделия.

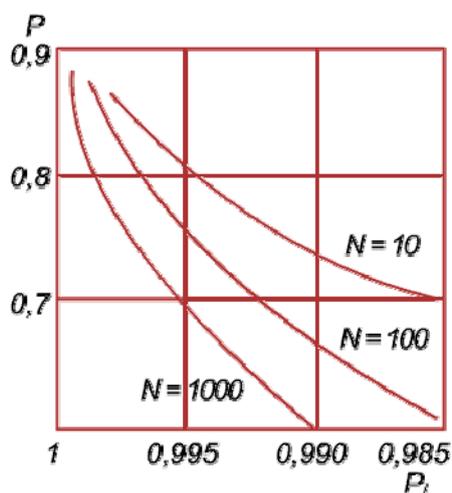


Рис. 1.14. Кривые изменения надежности изделия  $P$  в зависимости от количества элементов  $N$  и надежности этих элементов  $P_i$

### Качество элементов

Качество элементов, используемых в изделиях, является одним из основных факторов, влияющих на надежность изделий. Наиболее распространенной характеристикой надежности элементов является интенсивность (опасность) отказов на 1 час работы  $\lambda(t)$  (табл. 1.5).

Таблица 1.5

### Интенсивность отказов

Наименование изделий	Интенсивность отказов $10^{-6}$ 1/ч		
	максимальная	средняя	минимальная
1	2	3	4
Автопилоты	30,11	18,38	7,35
Акселерометры	7,5	2,5	0,35
Амортизаторы кольцевые	0,057	0,037	0,002
Батареи:			
одноразовые (сухие)	300	30,00	10,00
кисотно-свинцовые	12,1	1,1	0,5
Выводы:			
высокочастотные	4,22	2,63	1,131
электрические	0,08	0,045	0,02

Продолжение табл. 1.5

1	2	3	4
Выпрямители:			
<i>разные</i>	0,75	0,6	0,20
<i>селеновые</i>	1,6	0,76	0,26
Гироскопы:			
<i>высокоскоростные</i>	11,45	7,5	3,95
<i>компасные</i>	–	3,82	–
<i>особо точные</i>	25	10,00	2,5
Гнезда на один контакт	0,02	0,01	0,002
Головки записи (магнитные)	0,26	0,18	0,13
Двигатели:			
<i>асинхронные</i>	11,2	8,6	4,49
<i>гидравлические</i>	7,15	4,3	1,45
<i>синхронные</i>	6,25	0,359	0,159
<i>шаговые</i>	0,71	0,37	0,22
Диоды:			
<i>германиевые</i>	0,678	0,157	0,002
<i>кремниевые</i>	0,452	0,2	0,021
<i>мощные</i>	1,58	1,0	0,012
Дроссели низкой частоты	0,280	0,175	0,070
Кабели	2,2	0,475	0,002
Катушки индуктивности	0,031	0,02	0,01
Конденсаторы:			
<i>бумажные до 600 В</i>	0,04	0,025	0,01
<i>бумажные свыше 600 В</i>	0,235	0,09	0,0083
<i>воздушные переменные</i>	0,082	0,034	0,013
<i>керамические</i>	0,213	0,1	0,063
<i>керамические переменные</i>	0,35	0,155	0,008
<i>слюдяные</i>	0,132	0,075	0,005
<i>танталовые</i>	1,934	0,6	0,103
<i>электрические</i>	0,513	0,035	0,003
Коробки соединительные	0,58	0,4	0,23
Крепежные детали монтажные	0,55	0,012	0,003
Кристаллы кварцевые	0,6	0,03	0,025
Кристаллодержатели	0,1	0,02	0,01
Панели:			
<i>модульные (на одно гнездо)</i>	–	0,0244	–
<i>электронных ламп</i>	0,009	0,005	0,002
Переключатели:			
<i>кнопочные</i>	0,11	0,7	0,042
<i>волноводные</i>	0,71	0,48	0,26
<i>микроминиатюрные</i>	0,5	0,25	0,09
<i>блокировочные</i>	1,0	0,5	0,25
Потенциометры:			
<i>проволочные</i>	2,0	1,2	0,72
<i>проволочные миниатюрные</i>	2,04	1,23	0,8
(20 кОм)			

Продолжение табл. 1.5

1	2	3	4
Предохранители проволочные	0,83	0,5	0,38
Приводы: <i>следящих систем</i>			
<i>общего назначения, крупногабаритные</i>	33,6	12,5	0,86
<i>общего назначения, малогабаритные</i>	18,5	6,9	0,6
<i>ременные</i>	9,6	3,6	0,17
	15,0	3,875	0,142
Прокладки:			
<i>шайбы</i>	0,015	0,001	0,0005
<i>резиновые</i>	0,03	0,02	0,011
Разъемы:			
<i>штепсельные банановые</i>	15,1	0,062	0,025
<i>штепсельные коаксиальные</i>	0,193	0,003	0,001
Резисторы:			
<i>угольные композиционные</i>	0,297	0,043	0,005
<i>композиционные переменные</i>	0,533	0,053	0,007
<i>металлопленочные</i>	0,400	0,040	0,004
<i>проволочные</i>	0,165	0,087	0,046
<i>проволочные переменные</i>	0,807	0,09	0,02
Реле:			
<i>электромагнитные</i>	0,500	0,300	0,110
<i>герметически закрытые</i>	0,190	0,040	0,020
<i>миниатюрные</i>	0,25	0,06	0,03
<i>термические</i>	1,00	0,4	0,12
Серводвигатели	5,61	1,51	0,101
Сельсины:			
<i>синхронных передач</i>	0,61	0,35	0,09
<i>решающих устройств</i>	1,14	1,113	0,29
Соединения:			
<i>гибкие</i>	1,348	0,6875	0,027
<i>механические</i>	1,96	0,02	0,011
<i>паяные</i>	0,005	0,004	0,0002
<i>шарнирные</i>	4,0	2,4	0,80
Соленоиды	0,55	0,05	0,036
Схемы задержки импульсов	0,96	0,60	0,24
Тахометры	0,55	0,3	0,25
Тензометры	15,0	11,6	1,01
Термовыключатели	0,261	0,161	0,114

Продолжение табл. 1.5

1	2	3	4
Трансформаторы:			
<i>анодные</i>	0,052	0,025	0,012
<i>звуковой частоты</i>	0,04	0,02	0,01
<i>импульсные</i>	0,235	0,17	0,03
<i>накала</i>	0,06	0,027	0,012
<i>силовые</i>	2,08	1,04	0,46
Электронные лампы:			
<i>приемно-усилительные</i>	2,60	1,70	1,10
<i>миниатюрные</i>	15,00	1,90	0,55
<i>мощные</i>	13,5	10,00	5,80
<i>субминиатюрные</i>	4,31	1,15	0,36
<i>газонаполненные</i>	6,50	3,90	2,70
<i>генераторные импульсные</i>	43,00	30,00	20,00

Таблица 1.6

Условия эксплуатации аппаратуры	Поправочные коэффициенты		
	от вибрации $k_1$	ударных нагрузок $k_2$	при суммарном воздействии $k_1 k_2$
Лабораторные	1,0	1,0	1,0
Стационарные (полевые)	1,04	1,03	1,07
Корабельные	1,3	1,05	1,37
Автофургонные	1,355	1,08	1,46
Железнодорожные	1,4	1,1	1,54
Самолетные	1,46	1,13	1,65

Таблица 1.7

Влажность, (%)	Температура, (°C)	Поправочный коэффициент $k_3$
60...70	20...40	1,0
90...98	20...25	2,0
90...98	30...40	2,5

Таблица 1.8

Высота, (км)	Поправочный коэффициент $k_4$	Высота, (км)	Поправочный коэффициент $k_4$
0...1	1,0	8...10	1,25
1...2	1,05	10...15	1,3
2...3	1,1	15...20	1,35
3...5	1,14	20...25	1,38
5...6	1,16	25...30	1,4
6...8	1,2	30...40	1,45

### Пример

Электронное устройство непрерывно работает в течение 500 ч. Изделие содержит: один конденсатор бумажный, четыре конденсатора слюдяных, резистор углеродистый, один резистор композиционный, десять резисторов металлопленочных, три трансформатора анодных, один силовой трансформатор, 100 элементов пайки. Требуется вычислить вероятность безотказной работы  $P(t)$  и среднюю наработку до первого отказа  $T_{ср}$ .

Воспользовавшись данными табл. 1.5 – 1.8, запишем табл. 1.9 расчета надежности.

Таблица 1.9

Наименование и тип элемента	Обозначения на цепи	Количество элементов	Интенсивность отказов при комплексном режиме	Коэффициент нагрузки	Поправочный коэффициент	Интенсивность отказов $i$ -го элемента	Интенсивность отказов изделия из-за элементов $i$ -го типа
		$N_i$	$\lambda_{oi} \cdot 10^{-6}$ (1/ч)	$k_n$	$a_i$	$\lambda_{oi} \cdot a_i \cdot 10^{-6}$ (1/ч)	$N_i \cdot \lambda_{oi} \cdot a_i \cdot 10^{-6}$ (1/ч)
1	2	3	4	5	6	7	8
Конденсатор бумажный	$C_1$	1	0,05	0,6	0,77	0,0385	0,0385
Конденсатор слюдяной	$C_2$ и $C_5$	4	0,075	0,8	0,8	0,0600	0,248

Продолжение табл. 1.9

1	2	3	4	5	6	7	8
Резистор углеродистый	$R_1$	1	0,045	0,7	0,95	0,430	0,430
Резистор композиционный	$R_2$	1	0,053	0,6	1,2	0,0636	0,0636
Резистор металлопленочный	$R_3 - R_{12}$	10	0,04	0,7	0,8	0,032	0,32
Трансформатор анодный	$T_1 - T_3$	3	0,025	1,0	1,0	0,025	0,075
Трансформатор анодный	$T_4$	1	1,04	1,0	1,0	1,04	1,04
Пайки		$\frac{10}{0}$	0,004	–	–	0,004	0,4

Из данных табл. 1.9 запишем результирующую интенсивность отказов системы с  $k$  элементами:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i = 2,22 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}];$$

$$P(500) \exp \left[ -t \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i \right] = \exp(-500 \cdot 2,22 \cdot 10^{-6}) = 0,9989;$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{2,22 \cdot 10^{-6}} = 450000 [\text{ч}].$$

Для повышения надежности изделий необходимо использовать стандартные элементы, конструкция и технология изготовления которых отработаны, они выпускаются крупными сериями или в массовом производстве на специализированных предприятиях.

Процесс изготовления и контроля таких элементов максимально автоматизирован, что способствует повышению их качества. Кроме того, для ответственных изделий, к которым относятся гироскопические приборы, разрешается применять элементы особо высокого качества, устанавливаемого дополнительной отбраковкой.

Значительные резервы надежности появились в связи с разработкой функциональных элементов на принципиально новой конструктивной основе: в радиоэлектронике на смену малонадежным электровакуумным приборам пришли полупроводниковые приборы, а затем и интегральные твердые схемы с высокой степенью надежности; в электромеханике значи-

тельным сдвигом в сторону повышения надежности явилось создание бесконтактных электромашин; в механических устройствах повышение надежности стало возможным за счет применения новых высокопрочных материалов, за счет новейших способов формообразования деталей за счет усовершенствования методов термообработки и т. д.

### ***Режимы работы элементов***

Режимы работы элементов в большей степени влияют на их работоспособность. Перегрузки элементов в процессе работы резко снижают их надежность и, в то же время, ослабление режимов по сравнению с номиналом дает возможность значительно увеличить срок их службы. Это положение наглядно иллюстрируется кривыми интенсивности отказов при номинальном и разгруженном режимах работы элементов, показанных на рис. 1.15.

В связи с этим при выборе элементов для изделия целесообразно предусматривать разгруженные режимы их работы путем установки элементов с повышенными номиналами или с повышенным ресурсом работы.

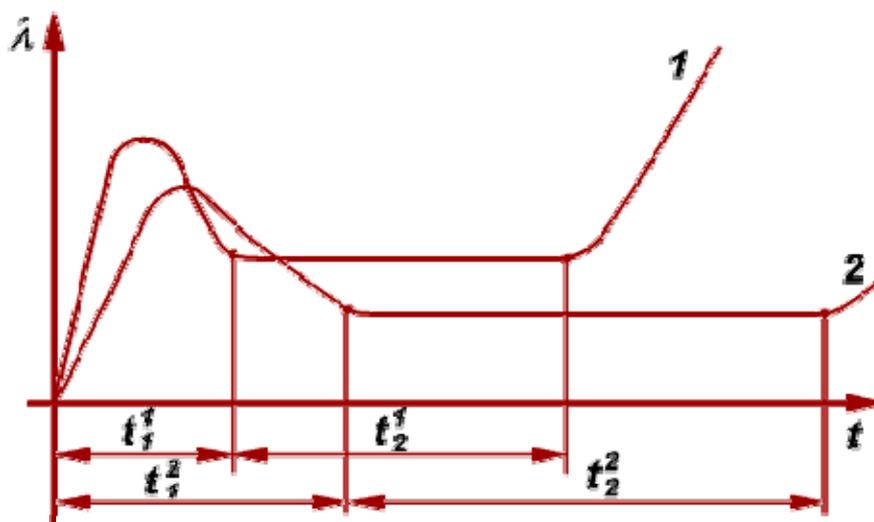


Рис. 1.15. Кривые интенсивности отказов при номинальном 1 и разгруженном 2 режимах

### ***Резервирование***

В тех случаях, когда от надежности работы изделия зависит выполнение сложных ответственных задач, в том числе безопасность людей при полетах, осуществление полетов космических аппаратов, выполнение заданий оборонного значения, повышение и гарантия надежности становятся основной задачей.

На современном уровне развития техники эта проблема решается путем введения в изделие дополнительных элементов, узлов и целых соединений, которые работают одновременно с основными или включаются в работу после выхода их из строя. Эти дополнительные элементы, узлы и соединения называются резервными. Различают два вида соединения элементов: основное и резервное.

*Основное* соединение характеризуется тем, что отказ одного элемента приводит к отказу всего изделия. При *резервном* соединении отказ изделия наступает только при отказе основных и всех резервных элементов. При таком положении отказ одного или нескольких элементов и даже отказ целого соединения не нарушает нормальной работы изделия, т. к. в работе продолжают участвовать дополнительные резервные элементы и соединения.

Следовательно, при резервировании надежность изделия может быть выше надежности любого элемента. В этом и заключается принципиальное отличие резервирования от всех других способов повышения надежности. В зависимости от уровня резервирования различают общее и раздельное (поэлементное) резервирование.

При *общем резервировании* резервируется все соединение в целом (рис. 1.16, а). При *раздельном резервировании* резервируются отдельные элементы соединения (рис. 1.16, б, в, г). Раздельное резервирование может быть равномерным или локальным, т. е. могут резервироваться не все элементы. В некоторых случаях один резервный элемент предусматривается на несколько основных однотипных элементов.

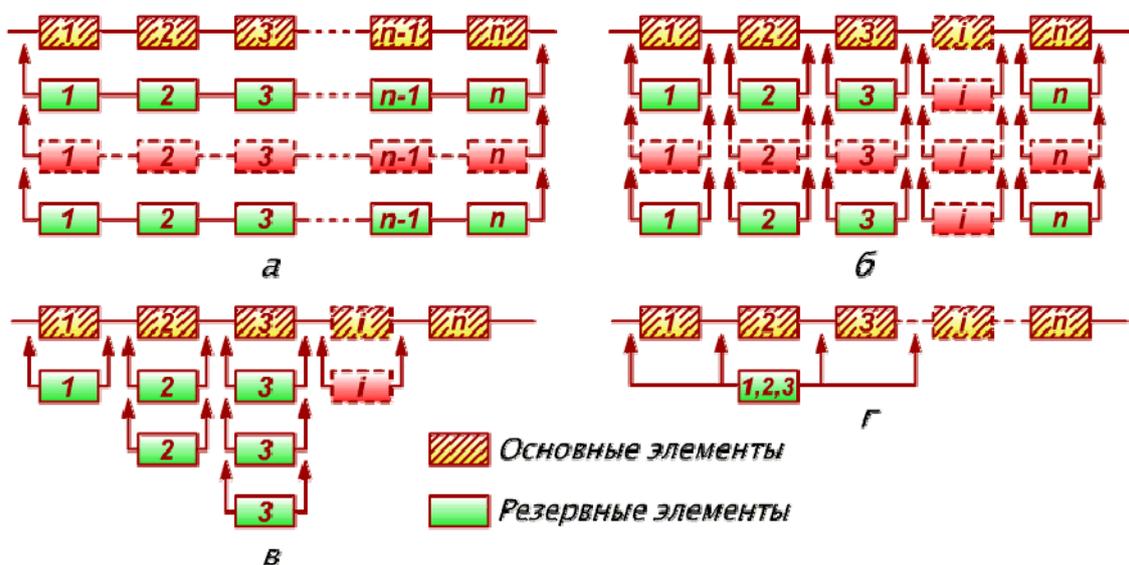


Рис. 1.16. Уровни резервирования: а – общее; б – раздельное равномерное; в, г – раздельное локальное

Во всех случаях резервные элементы и целые резервные соединения подключаются параллельно. С учетом этого условия надежность работы изделия при общем резервировании будет

$$P_{\text{общ}}(t) = 1 - \left[ 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1},$$

где  $n$  – число основных элементов в соединении;

$m$  – число резервных соединений;

$P_i(t)$  – вероятность исправной работы  $i$ -го элемента.

Если все элементы соединения имеют одинаковую надежность, то

$$P_{\text{общ}}(t) = 1 - \left[ 1 - P_i^n(t) \right]^{m+1}.$$

При раздельном резервировании

$$P_{\text{общ}}(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \left[ 1 - P_i(t) \right]^{m+1} \right\},$$

где  $n$  – число основных элементов в соединении;

$m$  – число резервных элементов у каждого из основных элементов.

Если все элементы соединения имеют одинаковую надежность, то

$$P_{\text{общ}}(t) = \left\{ 1 - \left[ 1 - P_i(t) \right]^{m+1} \right\}^n.$$

Сравнение способов резервирования показывает, что при прочих равных условиях  $[P_i(t), n, m]$ .

На практике наиболее часто интенсивность отказов изделий является

$$P_{\text{общ}}(t) < P_{\text{разд}}(t).$$

Резервирование по элементам особенно выгодно при большом числе элементов  $n$  и увеличении кратности резервирования  $m$ . Под *кратностью резервирования* понимается число резервных элементов или резервных соединений, приходящихся на один резервируемый элемент или резервируемое соединение.

Резервирование может быть однократное, многократное и дробное (рис. 1.17).

По способу подключения резерва различают постоянное подключение и подключение замещением. Резервирование при постоянном подключении и характеризуется тем, что резервные элементы или целые соедине-

ния подключены одновременно с основными элементами и постоянно находятся в работе.

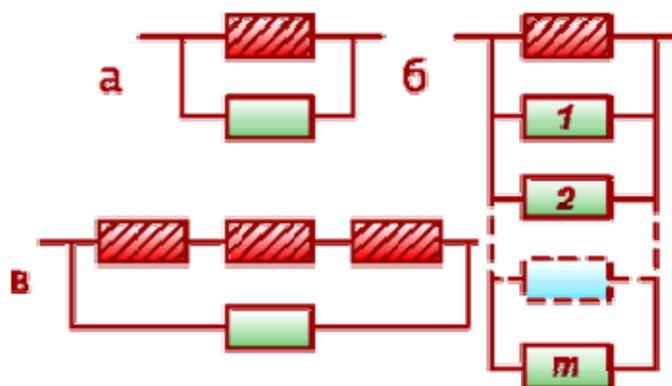


Рис. 1.17. Кратность резервирования:  
 а – однократное; б – многократное; в – дробное

Такое подключение отличается простотой, т. к. не требует дополнительных переключающих устройств, которые сами по себе могут иметь ограниченную надежность, отсутствует перерыв в работе изделия при отказе отдельных элементов или целых соединений. В то же время при выходе из строя основного элемента повышается нагрузка на оставшиеся в работе элементы. Надежность изделия при постоянном подключении резерва будет

$$P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^{m+1},$$

где  $P_c(t)$  – суммарная надежность изделия;

$P(t)$  – надежность основного и таких же резервных элементов;

$m$  – кратность резервирования.

Для случая экспоненциального закона распределения отказов

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda(t)}]^{m+1}.$$

### Пример

Определить вероятность безотказной работы изделия, состоящего из одного основного элемента с интенсивностью отказа  $\lambda = 6 \cdot 10^{-3}$  (1/ч) и двух таких же резервных элементов, в течение 150 ч непрерывной работы.

$$\begin{aligned} P_c(150) &= 1 - (1 - e^{-6 \cdot 10^{-3} \cdot 150})^{2+1} = 1 - (1 - e^{-0,9})^3 = \\ &= 1 - (1 - 0,40657)^3 = 1 - 0,20898 = 0,791017. \end{aligned}$$

Для нерезервируемого соединения

$$P_c(150) = e^{-\lambda(150)} = e^{-6 \cdot 10^{-3} \cdot 150} = 0,406569.$$

Выигрыш по вероятности безотказной работы

$$G_p = \frac{P_{c.резерв.}}{P_{c.нерезерв.}} = \frac{0,791017}{0,406569} = 1,9455.$$

Резервирование замещением характеризуется тем, что резервные элементы включаются в работу только при отказе основных.

Резервные элементы до включения их в работу могут находиться:

1. В ненагруженном (холодном) состоянии. Такое состояние для электрических изделий характеризуется отсутствием на резервных элементах питающего напряжения. С точки зрения сохранения резерва, такой режим способствует сохранению его, но при включении резерва требуется определенное время для того, чтобы резерв вошел в установленный рабочий режим, что недопустимо для ответственных изделий.

2. В нагруженном (горячем) состоянии. Такой режим содержания резерва обеспечивает мгновенное включение резерва в работу, т. к. резерв постоянно находится под рабочим напряжением, но сохранность резерва уменьшается.

3. В облегченном (теплом) состоянии. Такой режим резервных элементов создается путем подачи неполного питающего напряжения. Облегченный режим содержания резерва позволяет значительно сократить время ввода резерва в работу и в то же время максимально сохранить резерв.

Во всех случаях подключение резерва замещением позволяет применять дробное резервирование, т. е. предусматривать один резервный элемент на несколько основных. Серьезным недостатком подключения резерва замещением является необходимость в специальных устройствах контроля и переключения (УКП), которые сами по себе могут быть источником отказа.

В заключение следует отметить, что при всех положительных качествах резервирования оно имеет серьезный недостаток – происходит увеличение массы и габаритов изделия, что не всегда приемлемо.

### ***Защита изделий от воздействия внешней среды***

Изменение температуры, повышенная и пониженная температура, повышенная влажность и другие, климатические и механические воздействия являются причинами снижения надежности, как отдельных элементов, так и целых соединений. Поэтому в процессе разработки изделий необходимо предусматривать конструктивные меры, обеспечивающие защиту приборов от воздействия указанных факторов,

В гироскопических приборах высокие и низкие температуры, а также перепад температур приводит к изменению зазоров в кинематических звеньях, изменяется состояние смазки в подшипниковых узлах со всеми вытекающими последствиями, меняются свойства поддерживающей жидкости в поплавковых приборах. Механические воздействия могут привести к прямым повреждениям элементов изделий. Влага окружающей среды отрицательно влияет на работоспособность, особенно электрических цепей.

Для защиты приборов от воздействия внешних факторов применяют герметичные корпуса и кожухи. Для защиты от влаги электроэлементы подвергают пропитке, заливке, обволакиванию, опрессовке пластмассами. Для стабилизации температуры применяют специальные терморегуляторы. Но наиболее эффективным путем следует считать применение специальных материалов и элементов, которые обладают стабильными свойствами при разных температурах, не боятся резких колебаний температур, обладают механической прочностью и антикоррозионной стойкостью. Этот путь дает возможность повысить надежность, не усложняя конструкцию и не увеличивая ее массу.

### ***Метод граничных испытаний***

В большинстве случаев процесс разработки изделий включает изготовление макета, на котором проводятся предварительные исследования работы изделия и при необходимости вносятся требуемые конструктивные изменения.

В комплекс исследований макета целесообразно включить граничные испытания на надежность, с помощью которых определяются предельные граничные значения режимов, в промежутках между которыми гарантируется надежная работа макета (изделия). На основании полученных данных строится график граничных испытаний, на котором устанавливается зона безотказной работы. Построенный график граничных испытаний дает возможность в процессе разработки приборов правильно подбирать номинальные значения элементов и режимы работы их, гарантирующие надежность изделия.

### ***Включение в схему автоматических сигнальных устройств***

Автоматические сигнальные устройства позволяют определить место отказа и известить об этом обслуживающий персонал, что значительно сокращает время на обнаружение и устранение неисправности, которое является одним из количественных показателей надежности аппаратуры. Эта мера особенно актуальна для резервируемых систем с ручным включением резерва. К недостаткам этого метода следует отнести то, что дополнительные устройства обнаружения и сигнализации увеличивают массу конструкции и снижают надежность изделия.

## **Обеспечение надежности в процессе производства**

Процесс производства является важнейшим этапом обеспечения надежности, при этом закладывается фактическая надежность каждого конкретного элемента изделия и изделия в целом.

В то же время в процессе производства имеет место множество источников и причин возникновения отказов. Статистикой установлено, что около 30 % отказов возникает по причинам, зависящим от производства. К ним можно отнести:

- Отсутствие должного входного контроля материалов, полуфабрикатов и комплектующих элементов, поступающих с других предприятий. Несмотря на тщательный контроль, проводимый отделами технического контроля предприятия-изготовителя и представителями заказчика, необходимость входного контроля объясняется следующим:

- а) очень часто в условиях крупносерийного и массового производства материалов и элементов окончательный контроль выпускаемой продукции по экономическим соображениям проводится выборочно, что связано с вероятностью появления бракованной продукции – «риск заказчика»;

- б) материалы и комплектующие элементы могут выйти из строя в процессе хранения и транспортировки;

- в) при производстве сложных и ответственных изделий комплектующие элементы, отвечающие общим требованиям ТУ, подвергаются дополнительному отбору с учетом специальных требований, которым могут удовлетворять не все поставляемые элементы;

- г) в процессе входного контроля осуществляется дополнительная «тренировка» элементов, позволяющая выявить скрытые дефекты.

- Возможную установку в изделиях элементов, подвергшихся длительному хранению на данном предприятии без предварительной проверки, особенно если хранение элементов осуществлялось с отклонениями от установленных требований.

- Неидентичную замену и нарушение сортности используемых материалов.

- Нарушение технологических процессов сборки и электрического монтажа.

- Нарушение режимов выполнения специальных операций (пропитка, термообработка, покрытия и т. п.).

- Отсутствие должного промежуточного пооперационного и окончательного контроля.

- Нарушение технических инструкций проведения регулировки и испытаний выпускаемых приборов.

- Отсутствие культуры производства. Под культурой производства понимается совокупность условий, способствующих повышению качества

выпускаемой продукции, повышению производительности труда, снижению утомляемости рабочих. К таким условиям следует отнести: правильную организацию рабочего места; специальный микроклимат производственных помещений (чистота, температура, влажность, освещенность); при сборке точных приборов жесткие требования предъявляются к запыленности воздуха; культуру производственных рабочих (общеобразовательная и специальная подготовка, состояние личной гигиены рабочих и др.).

Анализ всех производственных причин, вызывающих отказы, позволяет определить надежность производства следующим образом:

$$P_{\text{пр}}(t) = P_{\text{м}}(t) \cdot P_{\text{т}}(t) \cdot P_{\text{к}}(t),$$

где  $P_{\text{м}}(t)$  – надежность исходных элементов и материалов;

$P_{\text{т}}(t)$  – надежность технологического процесса;

$P_{\text{к}}(t)$  – надежность операционного и окончательного контроля.

Надежность исходных элементов и материалов определяется надежностью входного контроля элементов, длительностью и условиями хранения, эквивалентностью осуществляемых замен материала и элементов:

$$P_{\text{м}}(t) = \frac{N - n_{\text{м}}}{N},$$

где  $N$  – число изделий в начале эксплуатации;

$n_{\text{м}}$  – число изделий, вышедших из строя за период  $t$  из-за отказов исходных материалов и элементов.

Учитывая, что до 75 % всех отказов, возникающих в результате производственных погрешностей, происходят по причинам, зависящим от надежности исходных материалов и элементов, необходимо:

- обеспечить надежность входного контроля за счет 100 % охвата контролируемых элементов, повышенных требований к основным параметрам элементов, автоматизации контроля;
- не допускать установки элементов, подвергшихся длительному хранению, и тем более элементов, хранившихся в неудовлетворительных условиях;
- не допускать некачественной замены материалов и нарушения сортности используемых материалов и элементов.

Надежность технологического процесса определяется количеством изделий, отказавших в процессе эксплуатации по причинам, связанным с отклонениями в технологическом процессе и в результате нарушения условий производства:

$$P_{\text{т}}(t) = \frac{N - n_{\text{т}}}{N},$$

где  $n_r$  – число изделий, отказавших в работе за период  $t$  из-за несовершенства технологического процесса и нарушения условий производства.

В это число входят только те изделия, которые имеют скрытый брак, т. е. прошедшие пооперационный и окончательный контроль.

Надежность технологического процесса может быть обеспечена:

- за счет применения более совершенных методов изготовления;
- максимальной автоматизации процессов;
- строгого соблюдения режимов выполнения операций;
- обязательного выполнения требований ЕСТД;
- неукоснительного соблюдения технологической дисциплины;
- обеспечения необходимых производственных условий, в том числе решения комплекса вопросов, направленных на повышение культуры производства.

Надежность промежуточного и окончательного контроля гарантирует, что на эксплуатацию не поступят изделия, не соответствующие требованиям ТУ. Надежность в этом случае может быть определена следующим образом:

$$P_k(t) = \frac{N - n_k}{N},$$

где  $n_k$  – число изделий, отказавших в работе за время  $t$  в результате недостатков в организации операционного и выходного контроля.

К мероприятиям, обеспечивающим надежность контроля, можно отнести:

- обеспечение 100 %-го контроля изделий по всем операциям технологического процесса;
- проведение выходного контроля со 100 %-м охватом изделий;
- периодический контроль технологического процесса как мероприятия, обеспечивающего профилактику брака;
- соблюдение периодичности установленного комплекса и режимов типовых испытаний;
- максимальную автоматизацию контроля, позволяющую исключить случайные погрешности измерений.

### **Обеспечение надежности в процессе эксплуатации**

Надежность изделий в процессе эксплуатации зависит от многих факторов и в том числе от режимов эксплуатации, от продолжительности каждого режима и соотношения продолжительности режимов между собой.

Различают следующие режимы эксплуатации:

– работу;

- транспортировку;
- хранение;
- профилактику;
- ремонт.

Продолжительность каждого режима и соотношение продолжительности режимов определяются конструктивными особенностями изделия, надежностью составляющих элементов, назначением изделия, кратностью использования, целесообразностью восстановления в случае отказа.

В период эксплуатации изделие может находиться в состоянии работоспособности или неработоспособности. В свою очередь состояние работоспособности делится на два состояния:

- *функционирование*, т. е. изделие в данный момент выполняет заданные функции в соответствии с установленными требованиями;
- *ожидание*, т. е. в данный момент изделие не выполняет установленные для него рабочие функции, но соответствует всем требованиям ТУ и готово к использованию в любой момент.

Состояние неработоспособности появляется в результате возникновения отказа, оно характеризуется тем, что изделие в данный момент не соответствует хотя бы одному из требований к основным параметрам. Для возврата изделия из состояния неработоспособности в работоспособное состояние необходим ремонт.

*Ремонт* – режим эксплуатации, при котором устраняется отказ.

Для поддержания изделия на требуемом уровне надежности проводится профилактика.

*Профилактика* – режим эксплуатации, в результате которого надежность изделия приводится к установленному уровню (возможно к первоначальному).

Между состоянием работоспособности и режимом эксплуатации существует определенная зависимость, т. е. определенному состоянию эксплуатации соответствует определенный режим.

Состояние изделия в период эксплуатации		Режим эксплуатации
Работоспособность	Функционирование	Работа
	Ожидание	Работа
Неработоспособность		Хранение Транспортирование Ремонт Профилактика

Для каждого из этих состояний и режимов существуют свои показатели надежности:

- для состояния работоспособности – среднее время наработки на отказ  $T_{ср}$ ;
- для состояния неработоспособности – среднее время хранения  $T_{хр}$  и среднее время восстановления  $T_{в}$ .

В зависимости от особенностей применения, особенностей восстановления и режима работы изделия могут быть разделены по категориям следующим образом:

- изделия разового применения, которые подразделяются:
  - а) на изделия, применяемые в неопределенный момент времени. Они должны быть готовы к действию в течение заданного времени;
  - б) на изделия, применяемые с предварительной проверкой. Они должны функционировать в течение определенного промежутка времени с определенной степенью безотказности.
- изделия многократного применения, которые подразделяются:
  - а) на невосстанавливаемые, которые должны безотказно работать в течение расчетного времени;
  - б) на восстанавливаемые с непрерывной и периодической работой. Эксплуатационные состояния изделий различных категорий графически показаны на рис. 1.18.

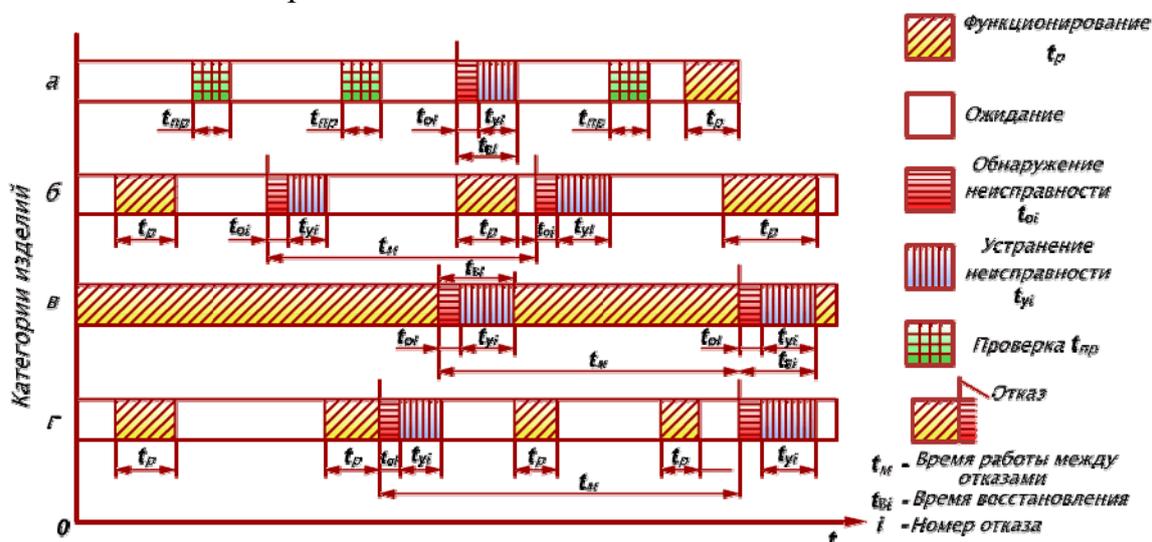


Рис. 1.18. Эксплуатационные состояния изделий различных категорий:  
 а – невосстанавливаемые изделия разового применения; б – невосстанавливаемые изделия многократного применения; в – восстанавливаемые изделия непрерывной работы; г – восстанавливаемые изделия периодической работы

Для сохранения надежности изделия в процессе эксплуатации необходимо:

1. Строго соблюдать предписанные правила эксплуатации. Здесь имеется в виду соблюдение внешних климатических и механических условий эксплуатации; соблюдение графиков технического обслуживания и профилактических ремонтов; соблюдение технологии консервации, упаковки и хранения в соответствии с внешними условиями и сроками хранения; соблюдение правил транспортировки изделий.

2. Соблюдать рекомендованные ТУ технические режимы функционирования: электрические и механические нагрузки не должны превышать установленных норм, длительность функционирования также не должна превышать рекомендаций ТУ.

3. Соблюдать правила технического обслуживания и ремонта. Техническое обслуживание обычно состоит из профилактических и регламентных проверок, которые проводятся в соответствии с установленным графиком по календарю или после наработки определенного числа часов.

В состав профилактических проверок входят:

– внешний осмотр с целью выявления ненадежных контактов и элементов, которые по внешним признакам могут свидетельствовать о неисправности;

– очистка приборов от пыли и коррозии;

– смазка механических деталей и узлов;

– снятие рабочих характеристик отдельных элементов, блоков и изделия в целом;

– регулировка приборов;

– проверка работы запасных приборов;

– проверка и доукомплектование ЗИПа.

Проведение этих работ предотвращает постепенные отказы, уменьшает число внезапных отказов. Профилактические проверки должны выполняться только исправной измерительной аппаратурой, прошедшей заводскую или государственную аттестацию в установленные сроки.

Ремонт изделий может быть текущим, когда приходится устранять небольшое количество и сравнительно простые отказы, и капитальным, когда приходится устранять большое количество сложных отказов.

Если текущий ремонт может быть выполнен в полевых условиях, то капитальные ремонты производятся в стационарных условиях.

Проведению ремонта предшествует стадия обнаружения неисправности. Выявить места неисправностей можно следующими способами:

– с помощью автоматических устройств и сигнализаторов;

– по таблицам неисправностей;

– по внешним признакам;

– путем снятия технических характеристик;

– путем анализа признаков неисправностей.

4. Производить «тренировку» элементов. Этот процесс значительно повышает надежность в процессе эксплуатации. Сущность этого метода заключается в том, что при замене элементов, вышедших из строя, запасной элемент перед установкой в изделие подвергается приработке («тренировке») на стенде с режимами, соответствующими режиму эксплуатации. Длительность «тренировки» соответствует периоду приработки элементов, когда интенсивность отказов наибольшая. За счет этого уменьша-

ется вероятность отказов, т. е. повышается надежность изделия. Недостатком этого метода является уменьшение ресурса элементов, но для особо важных и сложных изделий он полностью оправдывает себя.

5. Осуществлять прогнозирование. Прогнозирование отказов позволяет заранее предопределять возможные отказы и производить своевременную замену малонадежных элементов. Прогнозирование осуществляется двумя методами: инструментальным и статистическим.

*Инструментальный метод прогнозирования* применяется для выявления постепенных отказов. Сущность этого метода заключается в том, что путем многократного измерения основных параметров и характеристик элементов или изделия в целом строят кривые изменения основных параметров и по характеру изменения кривых делают выводы о предполагаемом периоде появления отказа. Точность прогнозирования во многом зависит от точности контрольной аппаратуры и возможностей проникновения в физико-химические свойства материалов и элементов, от возможностей фиксирования самых незначительных изменений этих свойств при изменении режимов работы и во времени.

*Статистический метод прогнозирования* рекомендуется для предопределения внезапных отказов элементов, работающих в сложных, тяжелых режимах, у которых распределение отказов подчиняется не экспоненциальному, а нормальному закону распределения.

6. Собирать материалы об отказах в условиях эксплуатации. Это дает возможность накопить статистические данные, крайне необходимые при расчете надежности вновь разрабатываемой аппаратуры; они позволяют внести необходимые конструктивные улучшения в серийные образцы, на основании этих данных разрабатываются и корректируются инструкции по эксплуатации изделий.

Наиболее целесообразно для накопления статистических данных об отказах проводить опытную эксплуатацию разработанных образцов приборов в конкретных реальных условиях работы. Проводимые при опытной эксплуатации испытания дают возможность собрать обширный статистический материал об отказах, позволяющий с достаточно большой точностью рассчитать надежность отдельных элементов и изделий в целом.

7. Правильно подбирать обслуживающий персонал. Эксплуатация изделий должна поручаться хорошо обученному техническому персоналу, знающему теоретические основы и принципы работы изделий, глубоко изучившему материальную часть и управление.

Такие требования вытекают из особенностей конструкции, сложности и точности приборов. Обслуживающий персонал должен не только правильно эксплуатировать приборы в период функционирования, но и доброкачественно проводить профилактические и регламентные проверки, быстро

находить и устранять неисправности. Грамотно вести техническую документацию.

### 1.7. Технологичность электронных систем

В целом соответствие конструкции ТП характеризуется *технологичностью*, которая носит относительный характер (для конкретной конструкции и конкретных условий производства).

От технологичности зависят:

1) объем и длительность конструкторской подготовки производства (проектирование оснастки, инструмента) и технологической (разработка ТП, приобретение оборудования, материалов, обработка режимов и т. д.);

2) надежность ТП (процент явного и скрытого брака), а следовательно, стоимость РЭС в производстве и расходы при эксплуатации.

Для оценки мер по повышению технологичности вновь разрабатываемой конструкции РЭС проводится технико-экономический анализ, в результате которого устанавливается технико-экономический эффект, обусловленный внедрением новой техники и технологии с учетом дополнительных затрат на проектирование и подготовку производства. Основной предпосылкой повышения экономического эффекта, как при изготовлении, так и при эксплуатации, является повышение технологичности конструкции.

Различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность конструкции. *Производственная технологичность* определяет объем работ по технологической подготовке производства, сложность изготовления, удобство монтажа вне предприятия-изготовителя; *эксплуатационная технологичность* определяет объем работ при подготовке изделия к использованию по назначению, техническому ремонту и утилизации (возвращению в производство отходов); *ремонтная технологичность* характеризует свойства изделия при всех видах ремонта, кроме текущего.

Производственная технологичность конструкции изделия характеризуется конструкторскими и технологическими показателями технологичности. *Конструкторские показатели определяют конструктивную приемственность* – совокупность свойства изделия, характеризующую повторяемостью в нем составных частей, относящихся к изделиям данной классификационной группы, и применяемостью новых составных частей, обусловленных его функциональным назначением, а также некоторые требования к сложности ТП сборки.

**К конструкторским показателям технологичности** конструкции относятся:

- *коэффициент повторяемости деталей*

$$K_{\text{пд}} = 1 - \frac{D_{\text{тр ор}}}{D_{\text{тр общ}}},$$

где  $D_{\text{тр ор}}$  – число типоразмеров оригинальных деталей;  
 $D_{\text{тр общ}}$  – общее число типоразмеров деталей без учета крепежа;

- коэффициент применяемости электрорадиоэлементов

$$K_{\text{п эрэ}} = 1 - \frac{H_{\text{тр ор эрэ}}}{H_{\text{тр эрэ}}},$$

где  $H_{\text{тр ор эрэ}}$  – общее число типоразмеров оригинальных ЭРЭ;  
 $H_{\text{тр эрэ}}$  – общее число типоразмеров ЭРЭ;

- коэффициент применяемости узлов

$$K_{\text{п у}} = 1 - \frac{E_{\text{тр ор}}}{E_{\text{тр}}},$$

где  $E_{\text{тр ор}}$  – число типоразмеров оригинальных узлов;  
 $E_{\text{тр}}$  – общее число типоразмеров узлов в изделии;

- коэффициент повторяемости деталей и узлов

$$K_{\text{пов де}} = 1 - \frac{D_{\text{т}} - E_{\text{т}}}{D - E},$$

где  $D_{\text{т}}$  и  $E_{\text{т}}$  – общее число типовых деталей и узлов в изделии;

- коэффициент повторяемости ЭРЭ

$$K_{\text{пов ис}} = 1 - \frac{H_{\text{т эрэ}}}{H_{\text{эрэ}}},$$

где  $H_{\text{т эрэ}}$  – число типовых ЭРЭ в изделии;  
 $H_{\text{эрэ}}$  – общее число ЭРЭ в изделии;

- коэффициент повторяемости ИС и микросборок

$$K_{\text{пов ИС}} = 1 - \frac{H_{\text{тр ИС}}}{H_{\text{ИС}}},$$

где  $H_{\text{тр ИС}}$  – число типоразмеров корпусов ИС и микросборок;  
 $H_{\text{ИС}}$  – число ИС и микросборок;

- коэффициент повторяемости печатных плат

$$K_{\text{пов пп}} = 1 - \frac{H_{\text{тр пп}}}{H_{\text{пп}}},$$

где  $H_{\text{тр пп}}$  – число типоразмеров печатных плат;  
 $H_{\text{пп}}$  – число печатных плат;

- коэффициент повторяемости материалов

$$K_{\text{пов м}} = 1 - \frac{H_{\text{мм}}}{D_{\text{тр ор}}},$$

где  $H_{\text{мм}}$  – число макросортаментов;

- коэффициент использования ИС и микросборок

$$K_{\text{исп ИС}} = 1 - \frac{H_{\text{ИС}}}{(H_{\text{ИС}} + H_{\text{эрэ}})};$$

- коэффициент установочных размеров

$$K_{\text{ур}} = 1 - \frac{H_{\text{ур}}}{H_{\text{эрэ}}},$$

где  $H_{\text{ур}}$  – число видов установочных размеров ЭРЭ;

- коэффициент сложности печатных плат

$$K_{\text{с пп}} = 1 - \frac{H_{\text{мпп}}}{H_{\text{пп}}},$$

где  $H_{\text{мпп}}$  – общее число многослойных печатных плат;

- коэффициент освоенности деталей

$$K_{\text{осв}} = 1 - \frac{D_{\text{ор}}}{D},$$

где  $D_{\text{ор}}$  – число оригинальных деталей;

- *коэффициент сложности сборки*

$$K_{\text{с сб}} = 1 - \frac{E_{\text{тр сп}}}{E_{\text{тр}}},$$

где  $E_{\text{тр сп}}$  – число типоразмеров узлов, требующих регулировки или пригонки в составе изделия с использованием специальных устройств или совместной обработки с разборкой и повторной сборкой;

$E_{\text{тр}}$  – общее число типоразмеров узлов;

- *коэффициент сборности*

$$K_{\text{сб}} = 1 - \frac{E}{(E + D)};$$

- *коэффициент точности обработки*

$$K_{\text{тч}} = 1 - \frac{D_{\text{тч}}}{D},$$

где  $D_{\text{тч}}$  – число деталей с допуском качества 10 и менее.

**Технологические показатели технологичности конструкции** определяют технологическую преимущество конструкции, приспособленность ее к механизации и автоматизации при изготовлении, а также сложность ТП обработки деталей. Под технологической преимуществом понимают совокупность свойств изделия, характеризующую применяемость и повторяемость технологических методов выполнения узлов и их конструктивных элементов, относящихся к изделиям данной классификационной группы. К технологическим показателям конструкции относятся:

- *коэффициент автоматизации и механизации монтажных соединений*

$$K_{\text{ам}} = \frac{H_{\text{ам}}}{H_{\text{м}}},$$

где  $H_{\text{ам}}$  – число монтажных соединений, выполняемых с использованием автоматизации и механизации;

$H_M$  – общее число монтажных соединений;

- коэффициент механизации подготовки ЭРЭ к монтажу

$$K_{\text{мп эрэ}} = \frac{H_{\text{мп эрэ}}}{H_{\text{эрэ}}},$$

где  $H_{\text{мп эрэ}}$  – число ЭРЭ, механизировано подготовленных к монтажу;

- коэффициент автоматизации контроля и настройки

$$K_{\text{м кн}} = \frac{H_{\text{м кн}}}{H_{\text{кн}}},$$

где  $H_{\text{м кн}}$  – число операций автоматизированного контроля и настройки;

$H_{\text{кн}}$  – общее число операций контроля и настройки;

- коэффициент применения типовых ТП

$$K_{\text{тп}} = \frac{H_{\text{тп}}}{H_{\text{п}}},$$

где  $H_{\text{тп}}$  – число типовых ТП;

$H_{\text{п}}$  – общее число ТП;

- коэффициент прогрессивности формообразования деталей

$$K_{\text{ф}} = \frac{D_{\text{пр}}}{D},$$

где  $D_{\text{пр}}$  – число деталей, выполненных с использованием прогрессивных способов формообразования (штамповка, литье под давлением, пресование пластмасс, порошковая металлургия и т. д.);

- коэффициент сложности обработки

$$K_{\text{со}} = 1 - \frac{D_{\text{м}}}{D},$$

где  $D_{\text{м}}$  – число деталей, выполненных со снятием стружки;

- коэффициент использования материалов

$$K_{\text{им}} = \frac{M}{M_{\text{м}}},$$

где  $M$  – общая масса деталей и узлов;  
 $M_{\text{м}}$  – масса исходных материалов.

К технологическим показателям технологичности относятся также *энергоёмкость изделия*, характеризующая расход топлива или энергии на производство, *обслуживание и ремонт изделий*, а также его *трудоемкость, материалоемкость, металлоёмкость*.

*Технологичность конструкции РЭС определяется с помощью комплексного показателя* для разрабатываемого нового изделия ( $K_{\text{кр}}$ ) и для изделия-аналога ( $K_{\text{а}}$ ), которые вычисляются по формуле

$$K_{\text{ка}}(K_{\text{кр}}) = \frac{\sum_1^n K_i \varphi_i}{\sum_1^n \varphi_i} = \frac{K_1 \varphi_1 + K_2 \varphi_2 + \dots + K_n \varphi_n}{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n},$$

где  $K_1, \dots, K_n$  – базовые показатели, номенклатура которых зависит от типа блока (электронный, радиотехнический, соединительный, коммутационный, распределительный, электромеханический, механический); радиотехнические блоки отличаются от электронных наличием приемопередающих и антенно-фидерных устройств;

$\varphi_1, \dots, \varphi_n$  – коэффициенты значимости каждого базового показателя.

Для электронных блоков в качестве базовых показателей выбирают, например:

$$K_{\text{исп ис}} (\varphi = 1);$$

$$K_{\text{ам}} (\varphi = 1);$$

$$K_{\text{мп}} \text{ ЭРЭ} (\varphi = 0,75);$$

$$K_{\text{м кн}} (\varphi = 1);$$

$$K_{\text{пов}} \text{ ЭРЭ} (\varphi = 3,1);$$

$$K_n \text{ ЭРЭ} (\varphi = 0,187);$$

$$K_{\text{ф}} (\varphi = 0,11).$$

В нормативной документации приводят номенклатуру базовых показателей и их коэффициенты значимости и для других типов блоков.

### Пример

В качестве примера рассчитаем комплексный показатель качества для вновь разрабатываемого электронного блока, если

$$K_{\text{ам}}=0,65;$$

$$K_{\text{исп ис}}=1;$$

$$K_{\text{мп ЭРЭ}}=1;$$

$$K_{\text{м кн}}=0,8;$$

$$K_{\text{пов ЭРЭ}}=1;$$

$$K_{\text{ф}}=0,2.$$

Тогда

$$K_{\text{кр}} = \frac{(0,65 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0,75 + 0,8 \cdot 0,5 + 0,95 \cdot 0,31 + 1 \cdot 0,187 + 0,2 \cdot 0,11)}{(1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11)} = 0,6$$

Формула для определения нормативного комплексного показателя разрабатываемого изделия при серийном производстве имеет вид

$$K_{\text{нр}} = K_{\text{ка}} \cdot K_{\text{сл}} \cdot K_{\text{ту}} \cdot K_{\text{оп}} \cdot K_{\text{от}} \cdot K_{\text{п}},$$

где  $K_{\text{ка}}$  – комплексный показатель изделия-аналога;

$K_{\text{сл}}=1,02\dots 1,2$  – коэффициент сложности нового изделия по сравнению с изделием-аналогом;

$K_{\text{ту}}$ ,  $K_{\text{оп}}$ ,  $K_{\text{от}}$  – соответственно коэффициенты, учитывающие изменение технологического уровня основного производства, уровня организации производства и труда завода-изготовителя нового изделия по отношению к заводу-изготовителю изделия-аналога;

$K_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий изменение типа производства (серийности изделия).

Расчет коэффициентов  $K_{\text{ту}}$ ,  $K_{\text{оп}}$ ,  $K_{\text{от}}$ ,  $K_{\text{п}}$  осуществляется по формуле

$$K_j = \frac{Z_{\text{н}}}{Z_{\text{а}}},$$

где  $Z_{\text{н}}$  и  $Z_{\text{а}}$  – значения соответствующих показателей для нового изделия

и для аналога, определяемые на основе статистических данных.

Показатель технологичности оценивается по формуле:

$$\frac{K_{кр}}{K_{нр}} \geq 1,$$

где  $K_{кр}$  – достигнутый комплексный показатель разрабатываемого изделия;  $K_{нр}$  – нормативный комплексный показатель разрабатываемого изделия.

Кроме технологичности конструкции на технико-экономический эффект влияет улучшение технических показателей конструкции, которое также может дать экономию как при изготовлении, так и при эксплуатации нового изделия.

Существуют и другие показатели, характеризующие, например, эргономические и эстетические свойства конструкции. Чем выше эти показатели, тем меньше ущерб в эксплуатации вследствие выхода из строя технических средств из-за ошибок человека-оператора и тем меньше затраты на хранение изделий при реализации. Некоторые группы показателей РЭС стандартизованы.

Начальным этапом при оценке экономической эффективности разработки является анализ прогрессивности разрабатываемой конструкции, который основан на определении показателя ее технологичности и сопоставлении с показателем технологичности аналога. Если в результате расчета и сопоставления выявлено повышение показателя технологичности, это является основанием для вывода о положительном эффекте при изготовлении или эксплуатации разрабатываемой конструкции. Далее анализируется улучшение технических (как абсолютных, так и относительных) показателей, т. к. это, как правило, обуславливает эффект из-за сокращения эксплуатационных затрат. Такой подход к технико-экономическому анализу конструкции РЭС позволяет комплексно оценить составляющие экономического эффекта, т. е. выявить (а затем и рассчитать) один из основных показателей – суммарную условно-годовую экономию как в сфере изготовления, так и в сфере эксплуатации:

$$\mathcal{E}_{уг} = \mathcal{E}_{уг \text{ изг}} + \mathcal{E}_{уг \text{ эксп}}$$

Полный учет всех составляющих экономического эффекта является, в свою очередь, залогом достоверности технико-экономического обоснования разрабатываемого изделия. Эффективность определяется отношением достигнутой условно-годовой экономии к затратам, с помощью которых эта экономия достигнута. Если это отношение больше единицы, то можно говорить о наличии эффективности.

К основным конструкторским методам обеспечения технологичности относятся:

1) использование наиболее простой и отработанной в производстве конструкторской иерархии (базовой конструкции);

2) выбор размеров и форм компонентов, деталей и узлов конструкции

с учетом экономически целесообразных для заданных условий производства способов формообразования, при этом учитывается, что прогрессивные способы формообразования, используемые в массовом и серийном производстве, позволяют уменьшить материалоемкость изделий за счет уменьшения толщины элементов конструкции и сокращения отходов;

3) уменьшение числа уровней разукрупнения конструкции РЭС и выбор их формы и размеров с учетом унифицированной оснастки и стандартного оборудования;

4) уменьшение номенклатуры используемых материалов и полуфабрикатов;

5) уменьшение применения дефицитных или токсичных материалов, драгоценных металлов;

6) обоснованный выбор качества точности, шероховатости поверхности, установочных и технологических баз;

7) конструктивная и функциональная взаимозаменяемость узлов, минимизация числа подстроечных и регулировочных элементов (особенно с механической подстройкой);

8) контролепригодность и инструментальная доступность элементов, деталей и узлов (в том числе подстроечных), особенно при автоматизированном и механизированном изготовлении.

Конструктор, ориентируясь на тот или иной ТП, должен учитывать его надежность. Наибольшей надежностью обладают автоматизированные операции изготовления и контроля изделий, обеспечивающие высокую точность поддержания режимов ТП изготовления и контроля. На неавтоматизированных этапах изготовления изделий, где определяющими являются действия операторов, возникает большинство дефектов готовой продукции. Особенно важно автоматизировать и обеспечить точность соблюдения режимов таких операций, результаты которых не могут быть выявлены непосредственно после их осуществления; несоблюдение режимов операций в свою очередь, может привести к появлению скрытого брака изделий. Примером операции, результат которой трудно проконтролировать непосредственно, является создание неразъемных контактных соединений на всех уровнях конструкции РЭС (пайка электрорадиоэлементов на платах, пайка или накрутка монтажных проводов на монтажных панелях и т. п.). При выполнении пропиточных работ возможны отклонения от вакуума, давления, температуры, времени. Если из-за недостаточной температуры в процессе сушки в обмотке останется влага, то может произойти обрыв провода вследствие электрохимической коррозии. Если при опресовке ИС полимером малы температура или время выдержки, то полиме-

ризация будет неполной и влагозащитные свойства полимерной оболочки ухудшатся.

Принятые конструктивные решения во многом определяют надежность изделий. При этом стремятся к максимально возможной типизации и унификации конструкций, использованию нормированных геометрических размеров, что позволяет создать универсальную оснастку для различных по назначению узлов. Это сокращает время подготовки производства при запуске новых видов изделий. Под *типизацией* понимается сведение всего возможного многообразия конструктивных решений к небольшому числу. *Унификация* (от лат. *Unito* – единство, *facere* – делать) означает использование одних и тех же конструкций для создания аппаратуры различного назначения, т. е. расширение области использования типовых решений.

Типизация узлов осуществляется либо только по конструктивно-технологическим ограничениям (габариты и форма частей, число контактов разъемов, тип электро монтажа, число слоев коммутации и т. д.), либо по конструктивно-технологическим, и по функциональным признакам (регистр, дешифратор, микропроцессор, запоминающее устройство, модулятор, компаратор, генератор и т. д.). В первом случае конструктивная типизация позволяет уменьшить до минимума число уровней разукрупнения и, следовательно, число ТП и количество технологической оснастки, лучше оснастить ТП и более тщательно его отладить (создать типовой ТП). Во втором случае использование функционального принципа упрощает и обслуживание аппаратуры при эксплуатации, уменьшает номенклатуру блоков, контрольного оборудования, запасного комплекта. Негативной стороной любой типизации является возможность появления избыточности. При конструктивно-технологической типизации возможно неполное заполнение узлов элементами из-за ограниченного числа контактов в соединителях. Функциональная типизация может привести к неполному использованию всех элементов из-за того, что часть их (например, выход дешифратора или каскадов усилителя) в некоторых узлах может не использоваться. Кроме потерь объема это приводит к увеличению потребляемой мощности и уменьшению надежности.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Кто формулирует требования к новому заданию?
2. Какие разделы содержит техническое задание?
3. Кто участвует в разработке конструкции электронного устройства?
4. Какие существуют стадии и этапы разработки изделия?
5. Что такое стандартизация?
6. Какие стандарты Вам известны?

7. Что такое конструкционные системы электронных систем? Каков их состав?
8. Назовите типы корпусов интегральных микросхем.
9. Как взаимосвязаны конструкция и технологии изготовления электронных систем?
10. Что такое надежность изделия?
11. Назовите факторы, влияющие на надежность.
12. Методы повышения надежности в процессе конструирования.
13. Способы обеспечения надежности в процессе производства.
14. Как обеспечить надежность в процессе эксплуатации?
15. Назовите показатели технологичности электронных систем.
16. Каковы основные конструкционные методы повышения технологичности конструкции прибора?
17. Дайте определения основных понятий надежности изделий: срок службы, технический ресурс, вероятность исправной (безотказной) работы, интенсивность отказов, частота отказов.
18. С какой целью осуществляется резервирование?
19. Что понимается под кратностью резервирования?

## **2. КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

В настоящее время одним из наиболее распространенных методов создания электрических цепей в приборостроении является печатный монтаж, реализуемый в виде односторонних, двухсторонних и многослойных печатных плат, а также гибких печатных плат и гибких печатных кабелей. Печатные платы (ПП) служат основой функциональных узлов и несущим элементом конструкции. При сохранении всех возможностей проводного монтажа применение ПП позволяет: уменьшить массу и габариты приборов; гарантировать стабильную повторяемость параметров изделий; повысить надежность и качество аппаратуры; повысить вибро- и механическую прочность, условия теплоотдачи и устойчивость соединений к климатическим факторам; осуществить унификацию и стандартизацию функциональных узлов и блоков приборов, уменьшить трудоемкость изготовления аппаратуры и обеспечить возможность механизации и автоматизации ее производства.

Понятие «печатный» обусловлено сходством данного метода выполнения электрического монтажа с методами, применяемыми в полиграфической промышленности.

Основные термины печатного монтажа и их определения регламентированы ГОСТ 20406-75.

*Печатный монтаж* – система печатных проводников, обеспечивающая электрическое соединение элементов схемы или экранирование.

*Печатный проводник* – участок токопроводящего покрытия (слоя), нанесенного на изоляционное основание.

*Печатная схема* – система печатных проводников электро- и радиоэлементов, нанесенных на общее диэлектрическое основание.

*Печатный элемент* – сопротивление, емкость, индуктивность, разъем, контактный контакт и другие элементы, получаемые нанесением на изоляционное основание слоя металла или диэлектрика.

*Печатная плата* – изоляционное основание с нанесенными на его поверхность плоскими печатными проводниками, монтажом или печатной схемой.

## 2.1. Классификация ПП

В настоящее время разработано большое число конструктивно-технологических разновидностей ПП (рис. 2.1).

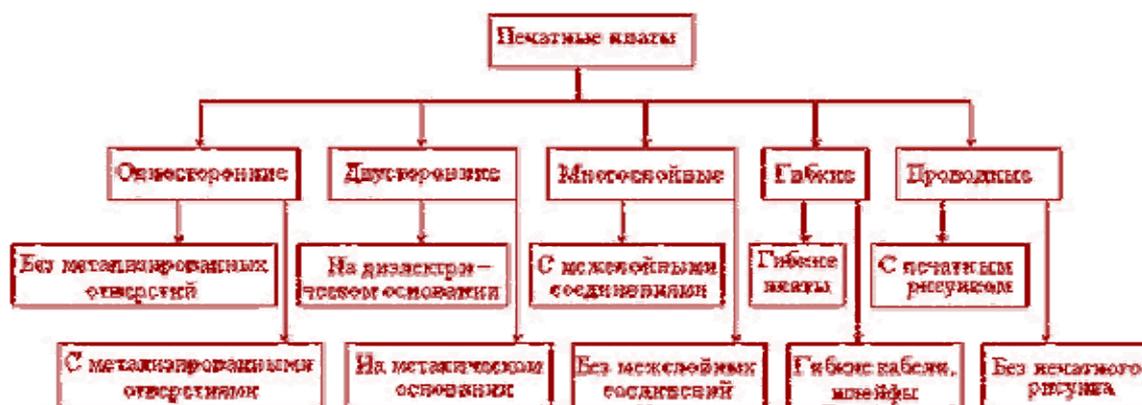


Рис. 2.1. Классификация печатных плат

**I. Односторонние печатные платы (ОПП)** (рис. 2.2, а, б) представляют собой диэлектрическое основание 1 с отверстиями 3, пазами, вырезами и т. п., на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок 2, а на другой при сборке узла размещают ИМС и ЭРЭ. В связи с ограниченной площадью для трассировки рисунка схемы такие платы применяют для простых электронных устройств бытового или вспомогательного назначения. Наиболее простые по конструкции и дешевы в изготовлении ОПП без металлизированных отверстий (рис. 2.2, а), более сложны, но и более надежны в эксплуатации платы с металлизированными отверстиями (рис. 2.2, б), зенковка 4 которых способствует лучшему закреплению металлизации (пистонов) в отверстиях.

**II. Двухсторонние печатные платы (ДПП)** (рис. 2.2, в, г) имеет проводящий рисунок 2 на обеих сторонах основания 1. Необходимые соединения выполняют с помощью металлизированных отверстий 3 и контактных площадок 4. Такие платы позволяют реализовывать более сложные схемы и имеют более широкое применение при изготовлении их на диэлектрическом основании (рис. 2.2, в). Менее распространенные ДПП на металлическом основании 1 (рис. 2.2, г) с нанесенным на него электроизоляционным покрытием 5 имеют лучший теплоотвод, что существенно при большой мощности навесных элементов. Платы могут иметь более сложную пространственную форму. У плат на металлическом основании коэффициенты линейного расширения материала подложки и слоя металлизации 2 приблизительно равны (для плат на диэлектрическом основании эти коэффициенты отличаются друг от друга в 5...10 раз). В сочетании с более благоприятной формой сечения металлизированных отверстий 3 слой металлизации таких плат выдерживает большие перепады температур без разрушения.

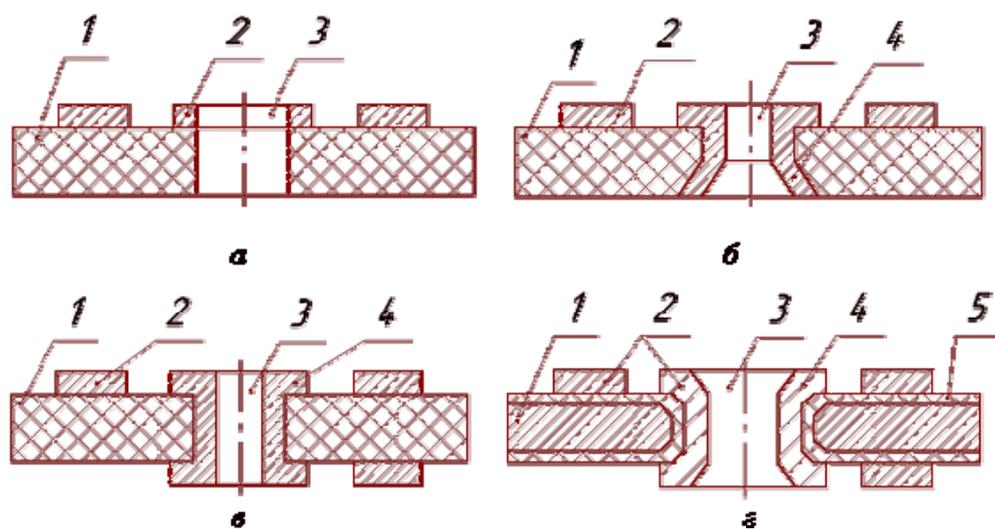


Рис. 2.2. Сечения ОПП и ДПП

*МПП с открытыми контактными площадками* (рис. 2.4, б) содержат до шести слоев, проводники 3 и 4 которых выполнены на диэлектрическом основании. Слои соединены склеивающимися прокладками 1. Лицевая поверхность платы имеет глухие окна, открывающие доступ к контактным площадкам 2 внутренних слоев, к которым при сборке и монтаже подпаивают планарные выводы ЭРИ. Установка ИМС и ЭРЭ со штыревыми выводами затруднена. Платы просты в изготовлении, имеют наименьшую трудоемкость, но требуют специальной, достаточно сложной формовки выводов навесных элементов, ограничены по числу слоев, плохо

ремонтируются. Процесс сборки узлов на таких платах практически не поддается механизации и автоматизации.

*МПП с открытыми контактными площадками* (рис. 2.4, б) содержат до шести слоев, проводники 3 и 4 которых выполнены на диэлектрическом основании. Слои соединены склеивающимися прокладками 1. Лицевая поверхность платы имеет глухие окна, открывающие доступ к контактными площадкам 2 внутренних слоев, к которым при сборке и монтаже подпаивают планарные выводы ЭРИ. Установка ИМС и ЭРЭ со штыревыми выводами затруднена. Платы просты в изготовлении, имеют наименьшую трудоемкость, но требуют специальной, достаточно сложной формовки выводов навесных элементов, ограничены по числу слоев, плохо ремонтируются. Процесс сборки узлов на таких платах практически не поддается механизации и автоматизации.

**III. Многослойные печатные платы (МПП)** состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка. Между проводящими слоями в структуре плат могут быть или могут отсутствовать межслойные соединения. Классификация основных конструктивно-технологических разновидностей МПП в зависимости от наличия и характера межслойных соединений приведена на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Классификация МПП

*МПП с выступающими выводами* (рис. 2.4, а) представляют собой многослойную структуру из слоев изоляционного материала (до 10 слоев) с проводящим рисунком 3, соединенных между собой склеивающимися диэлектрическими прокладками 4. Плата имеет сквозные перфорированные окна, в которые из внутренних слоев выходят выводы 2 в виде поло-

сок фольги, являющихся продолжением проводящего рисунка внутренних слоев. Выступающие в окна выводы отгибаются и закрепляются на внешних слоях платы с помощью колодок 1, устанавливаемых на клей. Платы применяют для монтажа ИМС с планарными выводами. Они обладают высокой механической прочностью, надежностью в эксплуатации, но не пригодны для монтажа элементов со штыревыми выводами и трудоемки в изготовлении. Процесс производства таких плат плохо поддается механизации и автоматизации.

*МПП с открытыми контактными площадками* (рис. 2.4, б) содержат до шести слоев, проводники 3 и 4 которых выполнены на диэлектрическом основании. Слои соединены склеивающимися прокладками 1. Лицевая поверхность платы имеет глухие окна, открывающие доступ к контактными площадкам 2 внутренних слоев, к которым при сборке и монтаже подпаивают планарные выводы ЭРИ. Установка ИМС и ЭРЭ со штыревыми выводами затруднена. Платы просты в изготовлении, имеют наименьшую трудоемкость, но требуют специальной, достаточно сложной формовки выводов навесных элементов, ограничены по числу слоев, плохо ремонтируются. Процесс сборки узлов на таких платах практически не поддается механизации и автоматизации.

*МПП с межслойными соединениями объемными деталями* (рис. 2.4, в, г) имеют 4...6 слоев 1 проводящего рисунка 2, соединенного послойно в зоне контактных площадок 3 с помощью штифтов 4 (рис. 2.4, в), пустотелых заклепок 4 (рис. 2.4, г) или других подобных деталей, предварительно покрытых легкоплавкими сплавами. Эти детали нагреваются после запрессовки их в отверстие, покрытие оплавляется и соединяет слои МПП. Изготовление таких плат трудоемко, процесс изготовления плохо поддается автоматизации, надежность межсоединений не всегда обеспечивается. Применение таких МПП ограничено.

В отечественной и зарубежной промышленности получили широкое распространение конструкции *МПП с межслойными соединениями, выполненными путем химико-гальванической металлизации* (рис. 2.4, д, з).

*МПП с послойным наращиванием рисунка* (рис. 2.4, д) имеют до 5 слоев 2 с проводящим рисунком 3 на каждом слое и межслойными соединениями в виде металлизированных переходов 1, соединяющих два или несколько слоев. Такие платы предназначены для монтажа на них навесных элементов с планарными выводами, имеют наивысшую плотность рисунка схемы и надежные межслойные соединения. Однако они практически не поддаются ремонту, непригодны для размещения на них элементов со штыревыми выводами, трудоемки в изготовлении, имеют очень большой технологический цикл изготовления, а их производство не поддается автоматизации и механизации.

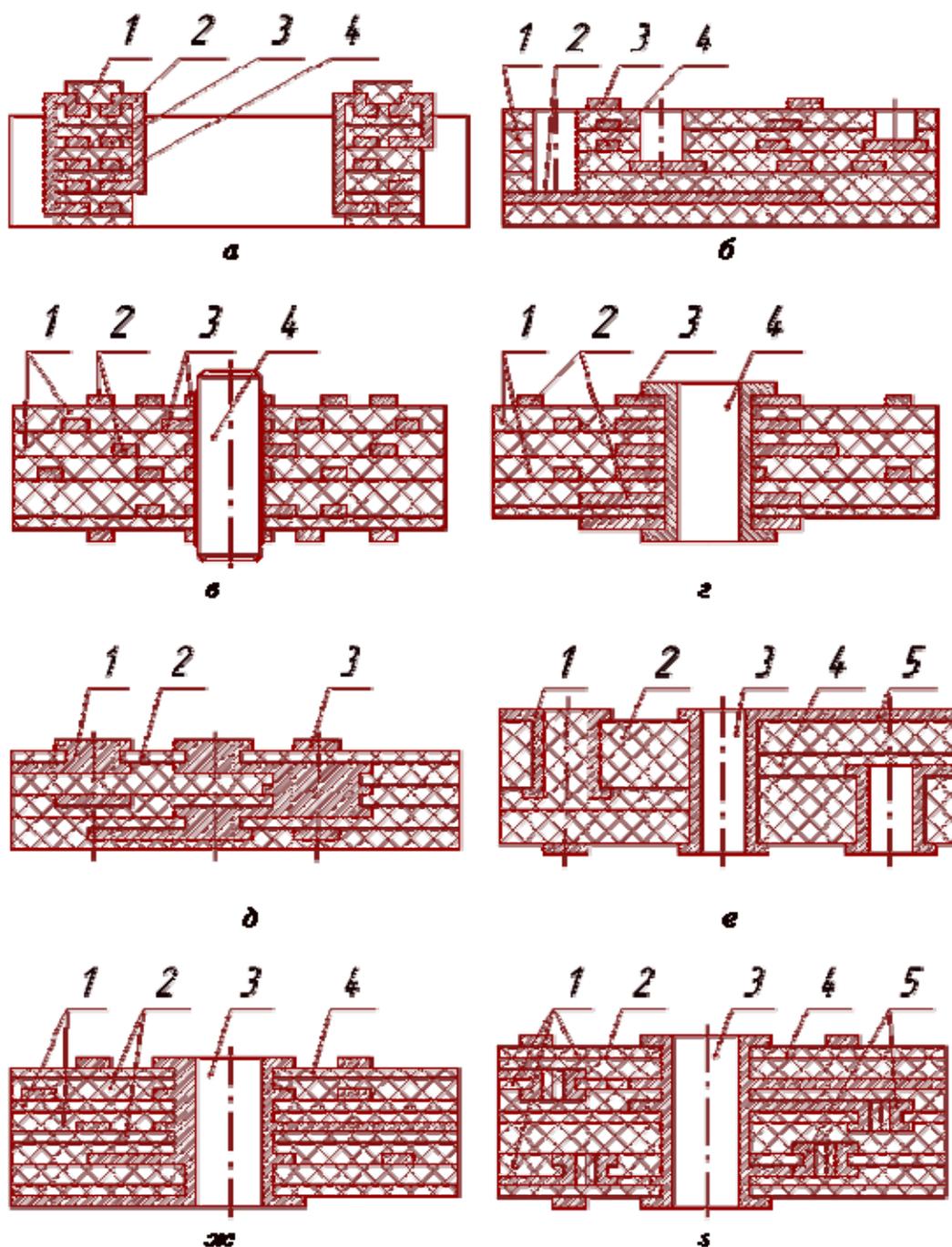


Рис. 2.4. Сечения МПП

МПП с попарным прессованием слоев и металлизацией отверстий (рис. 2.4, e) имеют четыре слоя с проводящим рисунком 5 и состоят из двух плат 2, соединенных склеивающей прокладкой 4.

Межслойные соединения выполнены попарно металлизированными отверстиями 1 и 3, на стенки которых осажден проводящий материал. Платы применяют для монтажа элементов с планарными выводами, но воз-

можно также установка элементов со штыревыми выводами (в отверстия 3) с несколько меньшей плотностью размещения. Они имеют высокую плотность печатного монтажа, достаточно технологичны и допускают возможность автоматизации сборки узлов на них.

К недостаткам этих плат относятся пониженное качество металлизированных отверстий 1 соседних слоев, затрудненность ремонта, малое число слоев и невозможность изготовления плат больших размеров.

*МПП со сквозными металлизированными отверстиями 3* (рис. 2.4, ж) представляют собой чередование проводящих слоев 4 и склеивающих диэлектрических прокладок 2. Платы не имеют ограничения числа слоев (оптимальное число до 12) и пригодны для установки элементов как со штыревыми, так и с планарными выводами. Наибольшее применение их в промышленности обусловлено высокой плотностью монтажа, хорошим качеством межслойных соединений, удовлетворительной ремонтоспособностью. Хорошо поддаются автоматизации и механизации как процесс изготовления самих плат, так и сборки на них узлов.

*МПП со сквозными металлизированными отверстиями 3* (рис. 2.4, з) и *межслойными металлизированными переходами 5*, соединяющими соседние слои, имеют меньшее число слоев по сравнению с МПП предыдущей конструкции при трассировке аналогичной схемы, т. е. имеют большую плотность монтажа. Однако эти МПП более трудоемки в изготовлении и технологический цикл их производства длиннее.

**IV. Гибкие печатные платы (ГПП)** имеют эластичное основание и выполняются, как правило, двусторонними с металлизированными отверстиями и контактными площадками для пайки навесных элементов. Толщина плат не превышает 0,6 мм, что позволяет изгибать их с определенным радиусом, сворачивать в цилиндр и т. п.

**V. Гибкие печатные кабели ГПК (шлейфы)** состоят из одного или нескольких непроводящих слоев, на которых размешены печатные проводники. Гибкие кабели хорошо выдерживают большое число перегибов, вибрацию и применяются для межсоединений узлов и блоков ЭВА, так как по сравнению с круглыми кабелями, они в несколько раз легче и занимают меньшие объемы.

**VI. Проводные платы** представляют собой сочетание ДПП, на которой выполнен постоянный проводящий рисунок схемы (контактные площадки, шины земли и питания), с проводным монтажом из изолированных проводов диаметров 0,1...0,2 мм.

## 2.2. Методы изготовления ПП

Методы изготовления печатных плат классифицируются в зависимости от сочетания способа получения токопроводящего слоя и способа

нанесения рисунка печатной платы. В настоящее время известно более двухсот методов изготовления печатных плат.

### **Способы создания токопроводящего слоя**

*Электрохимическое осаждение.* На основании печатной платы химическим способом осаждается тонкий слой меди (1...2 мкм), на базе которого гальваническим способом наращивается слой требуемой толщины.

*Электролитическое осаждение с переносом.* На металлическую матрицу гальваническим способом наносится медный слой рисунка платы, а затем этот рисунок наклеивается на основание платы. Осаждение меди на матрицу ведется по открытым поверхностям с постепенным увеличением плотности тока. При таком режиме получается более плотный слой меди на будущей поверхности проводника и более рыхлый, обеспечивающий лучшую адгезию, со стороны, которая приклеивается к основанию.

*Фольгирование.* На основание платы наносится сплошной слой медной фольги, которая при последующей обработке удаляется с токопроводящих участков основания.

*Вжигание.* Этот способ применяется для получения серебряного токопроводящего слоя на керамическом основании. Сначала на участки основания, которые должны быть токопроводящими, наносится паста, в состав которой входит углекислое серебро ( $\text{Ag}_2\text{CO}_3$ ) или окись серебра ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ).

*Шоопирование (металлизация).* Токопроводящий металлический слой наносится на основание через трафарет путем напыления расплавленного металла специальным пистолетом.

*Вакуумное испарение.* Токопроводящий слой наносится на поверхность основания через трафарет в вакуумной камере, в которой создается разрежение 0,1...0,01 Па. Медь или другой металл, находящийся в вакуумной камере в специальном лотке, плавится с помощью электронагрева. Расплавленный металл, испаряясь в вакууме, осаждается на открытых поверхностях основания.

*Катодное распыление.* На поверхность основания сначала химическим способом наносится тонкий слой меди (1...2 мкм) в соответствии с рисунком платы. Рисунок должен быть замкнут технологическими перемычками. Затем плата помещается в вакуумную камеру. Рисунок платы подключается к аноду, а катодом служит медная пластинка. Под действием тока напряжением 20...30 кВ в вакууме 0,1...0,01 Па происходит перенос частиц металла с катодной пластины на рисунок платы. Таким образом происходит наращивание слоя металла.

## Способы нанесения рисунка печатной платы

*Фотографический.* Рисунок платы печатается на основании, покрытом светочувствительной пленкой фоторезиста, с негатива или диапозитива, выполненного на стекле или прозрачной пленке (фотошаблона).

*Офсетный.* Токопроводящий или защитный слой платы наносится на основание с помощью полиграфических станков офсетной печати, где рисунок с плоского клише переносится на круглый валик, обтянутый офсетной резиной, а с валика – на основание платы.

*Сеточнографический.* На шелковой или металлической сетке, установленной в рамке, путем фотопечати или другим способом создается защитная пленка, соответствующая рисунку платы. Рисунок с полученного сетчатого трафарета на плату переносится продавливанием защитной краски через участки трафарета, свободные от ранее созданной защитной пленки.

*Прессование.* На поверхность основания наносится металлический порошок, а затем с помощью нагретого металлического рельефного клише рисунок платы вдавливается на основание в виде позитивного углубленного изображения. Порошок в этих местах опрессовывается и надежно скрепляется с основанием. Остатки порошка собираются для дальнейшего использования. При этом одновременно наносится рисунок и создается токопроводящий слой.

*Тиснение.* Фольга или токопроводящая краска на бумажной подложке, покрытой клеящим составом, вдавливаются в основание платы нагретым рельефным металлическим клише. Острыми кромками клише фольга обрезается по контуру проводников и с пробельных участков удаляется.

*Ксерография.* Физическое фотографирование рисунка непосредственно с чертежа.

*Применение шаблона.* Защитная краска или токопроводящий слой наносятся на основание через бумажный или металлический трафарет.

*Механический метод.* Прототипы печатных плат могут быть изготовлены без применения фотохимических процессов – методом фрезерования. Основное преимущество механического метода – высокая оперативность и простота реализации.

Приведенные способы создания токопроводящего слоя и нанесения рисунка печатной платы далеко не исчерпывают всех способов, применяемых

в отечественной и зарубежной практике. Разнообразные сочетания этих способов дают чрезвычайно большое количество различных методов изготовления печатных плат.

Выбор способа создания токопроводящего слоя и способа нанесения рисунка, т. е. выбор метода изготовления печатной платы, определяют многие факторы: конструкция платы (односторонняя или двухсторонняя),

наименьшая ширина проводника и наименьшее расстояние между проводниками (класс точности платы), способ металлизации отверстий, габариты платы, плотность монтажа; точность воспроизведения рисунка; разрешающая способность способа печати; материал основания и проводников; климатические и механические условия эксплуатации; назначение, конструкция и режимы эксплуатации изделия, на котором устанавливаются печатные платы; требования надежности; серийность производства.

К наиболее распространенным в приборостроении методами изготовления печатных плат (рис. 2.5) следует отнести: метод химического травления фольгированного диэлектрического основания (субтрактивный метод); электрохимический метод, метод переноса – аддитивные методы; комбинированный метод.



Рис. 2.5. Классификация методов изготовления печатных плат

В настоящее время применяют несколько методов изготовления ПП: субтрактивные (*subtratio* – отнимание), при которых проводящий рисунок образуется за счет удаления проводящего слоя с участков поверхности, образующих непроводящий рисунок (пробельные места); аддитивные (*ad-ditio* – прибавление), при которых проводящий рисунок получают нанесением проводящего слоя заданной конфигурации на непроводящее основание плат; полуаддитивные, при которых проводящий рисунок получают нанесением проводящего слоя на основание с предварительным нанесенным тонким (вспомогательным) проводящим покрытием, впоследствии удаляемым с пробельных мест.

Выбор метода изготовления ПП зависит от их конструктивного исполнения, необходимых конструкторских и эксплуатационных характеристик, а также результатов проведения технико-экономического анализа.

Если в одном производстве необходимо изготавливать ОПП, ДПП и МПП, то целесообразно при выборе методов изготовления учитывать возможность их совмещения по оборудованию и отдельным этапам технологического процесса.

ОПП и ГПК изготавливают преимущественно на одностороннем фольгированном диэлектрике субтрактивным химическим методом (рис. 2.6, а).

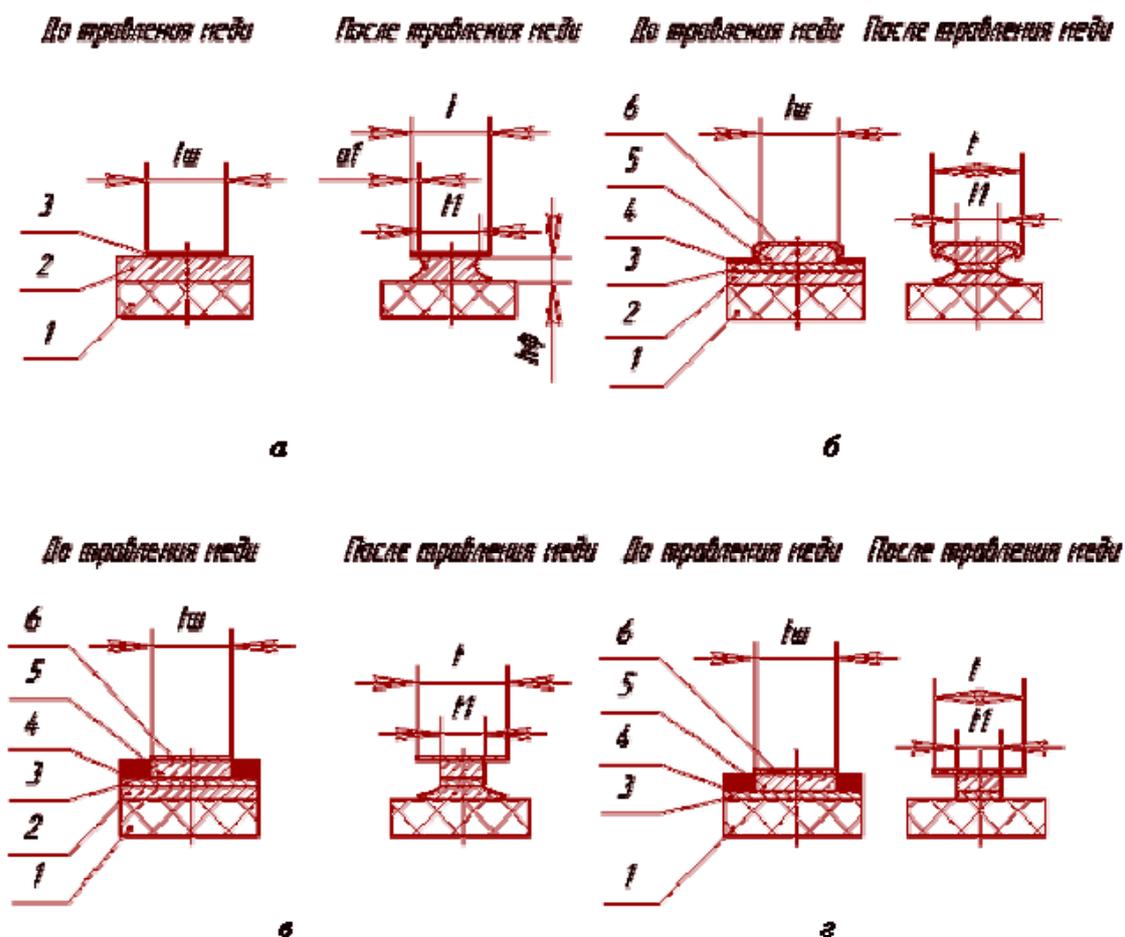


Рис. 2.6. Сечения проводников ПП

На медную фольгу 2 диэлектрика 1 защитным слоем 3, стойким к последующему воздействию травителей, наносится позитивный рисунок схемы. Незащищенные участки фольги стравливаются. После удаления защитного рисунка (маски) сверлятся необходимые отверстия. Плата обрабатывается по контуру и на нее наносится защитное покрытие, например, ацетонканифольный флюс.

Схема технологического процесса изготовления ОПП субтрактивным химическим методом с использованием сухого пленочного фоторези-

ста приведена на рис. 2.7. При изготовлении ГПК в качестве защитного покрытия на вытравленный медный рисунок напрессовывается лавсановая пленка, а соединительные места облуживаются. Процесс изготовления несложен, наименее трудоемок, по сравнению с другими методами изготовления ПП, имеет короткий технологический цикл, легко автоматизируется и механизмируется, обеспечивает высокую разрешающую способность. Производительность процесса зависит от организации производства и уровня автоматизации и достигает порядка 1000 плат/ч.

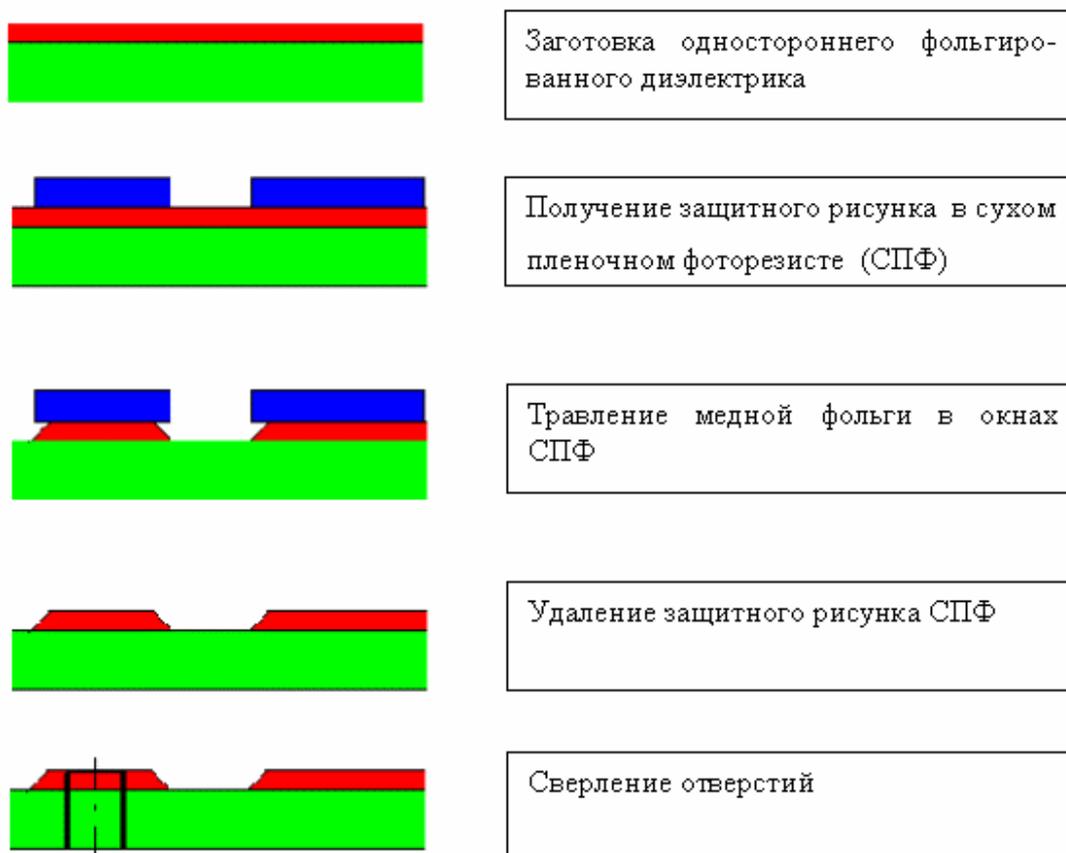


Рис. 2.7. Схема технологического процесса изготовления односторонних печатных плат субтрактивным химическим методом (травлением фольги) с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ)

Основным недостатком субтрактивного химического метода изготовления ПП является наличие эффекта бокового подтравливания элементов проводящего рисунка схемы (рис. 2.6, а), что уменьшает их сечение на величину и снижает адгезию фольги к диэлектрическому основанию, особенно критичную для узких проводников схемы.

Этого недостатка лишен аддитивный метод изготовления ПП, основанный на избирательном осаждении химической меди на нефольгированный диэлектрик с нанесенным на поверхностный слой специальным ката-

лизатором, инициирующим осаждение меди в местах, подвергшихся обработке в процессе производства плат. В этом случае не наносят защитные маски и не травят медь с пробельных мест. Последовательность технологических процессов изготовления ОПП и ГПК субтрактивным химическим методом и ОПП аддитивным методом приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Последовательность технологических процессов  
изготовления ОПП и ГПК\*

Основные технологические операции	Субтрактивный метод		Аддитивный метод
	ОПП	ГПК	ОПП
Нарезка заготовок	+	+	+
Образование базовых отверстий	+	–	+
Активация поверхности диэлектрика	–	–	+
Сенсибилизация диэлектрика	–	–	+
Получение рисунка схемы платы	+	+	+
Химическая металлизация диэлектрика	–	–	+
Термообработка платы	–	–	+
Травление меди с пробельных мест	+	+	–
Удаление маски	+	+	–
Образование необходимых отверстий	+	–	+
Подготовка поверхности платы перед склеиванием	+	–	+
Приклеивание защитной пленки (лавсана)	–	+	–
Травление лавсана в зоне выводов	–	+	
Обработка платы по контуру	+	+	+
Маркировка платы	+	+	+
Нанесение защитного покрытия на плату	+	–	+
Лужение выводов	–	+	–
Окончательный контроль платы	+	+	+
* В табл. 2.1 – 2.3: «+» – наличие операции, «–» – отсутствие операции			

ДПП и ГПП изготавливают преимущественно позитивным комбинированным методом (рис. 2.6, б, в), основанный на применении двустороннего фольгированного диэлектрика. Металлизацию отверстий производят электрохимическим способом, а проводящий рисунок схемы получают травлением меди с пробельных мест. После предварительной химикогалванической металлизации 4 поверхности фольги 2 и монтажных отверстий с помощью позитивного шаблона, сеткографической краски или фоторезист наносится негативный рисунок 3 схемы. На проводящий рисунок и

отверстия, незащищенные маской, гальванически осаждаются медь 5 и металлорезист 6, стойкий к травящим растворам.

Защитный слой (маска) снимается, и производится химическое травление с пробельных мест слоя предварительной металлизации и фольги. Защищенный металлорезистом проводящий рисунок остается невытравленным, однако происходит боковое подтравливание элементов схемы.

Такой метод обеспечивает удовлетворительную адгезию элементов проводящего рисунка к диэлектрику 1 и сохранение электроизоляционных свойств диэлектрика, защищенного во время обработки плат в агрессивных химических растворах медной фольгой. Разрешающая способность несколько ниже, чем химического, что объясняется большим боковым подтравливанием и разрачиванием (увеличением сечения) элементов схемы, характер которого зависит от толщины защитного слоя краски или фоторезиста, нанесенного перед металлизацией. Если применяют сеткографическую краску 3 толщиной 5...7 мкм, то в процессе гальванического осаждения меди 5 и защитного металлорезиста 6 происходит разрачивание элементов схемы (рис. 2.6, б). При использовании сухого пленочного фоторезиста 3 толщиной 40...60 мкм разрачивания меди не происходит (рис. 2.6, в).

Схема технологического процесса изготовления ДПП субтрактивным химическим методом с использованием сухого пленочного фоторезиста приведена на рис. 2.8.

Ширина проводников зависит также от вида металлорезиста. Если применяют неоплавляемый металлорезист, то их ширина увеличивается из-за разрачивания металлорезиста при металлизации, а расстояние между проводниками уменьшается. Оплавляемый металлорезист, например сплав олово-свинец, за счет сил поверхностного натяжения при его расплавлении стягивается в пределах медного слоя, что обеспечивает более оптимальное сечение элементов проводящего рисунка схемы.

При необходимости изготовления ДПП с концевыми печатными контактами (КПК) технологический процесс усложняется, а диэлектрические характеристики основания ухудшаются за счет того, что ряд операций в агрессивных растворах (гальваническое никелирование, палладирование или золочение КПК) происходит по открытой поверхности диэлектрика.

При полуаддитивном методе изготовления ДПП используют нефольгированные диэлектрики, поверхность которых покрыта слоем (50...80 мкм) полимерного материала (например, эпоксикаучуковой композицией). Обязательной является подготовка (активация) поверхности под металлизацию, обеспечивающая хорошую адгезию рисунка к диэлектрическому основанию. Малое боковое подтравливание проводящего рисунка (рис. 2.6, г) за счет сокращения времени травления (толщина слоя предварительной металлизации 5...7 мкм) и лучшая адгезия рисунка к ди-

электрику (прочность на отрыв примерно в 1,5 раза больше, чем при использовании фольгированных диэлектриков) дают возможность получить высокую разрешающую способность, а более оптимальное соотношение толщин меди в отверстиях и на поверхности улучшают механическую прочность металлизации.

При изготовлении ДПП на металлическом основании (рис. 2.2, з) применяют полуаддитивный метод формирования проводящего рисунка на металлической подложке с перфорированными отверстиями, которая предварительно покрывается полимерным материалом. Такое покрытие может быть получено способом вихревого напыления, электростатическим напылением, напылением в псевдосжиженном порошке полимера и т. п.

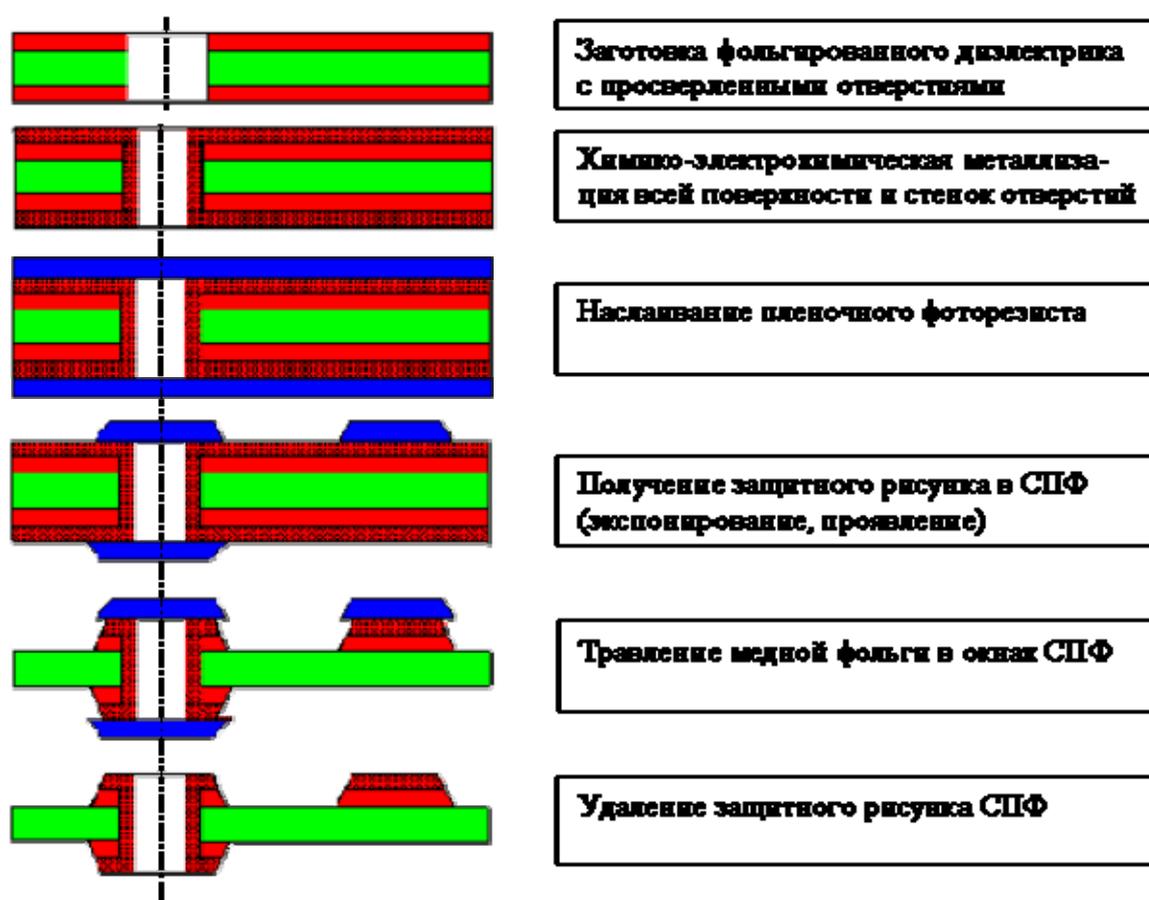


Рис. 2.8. Схема технологического процесса изготовления двухсторонней печатной платы с металлизированными отверстиями субтрактивным комбинированным методом с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ)

При аддитивном методе изготовления ДПП используют диэлектрик с введенным в его состав катализатором и адгезивным слоем на поверхности. После образования отверстий на поверхности нефольгированной заго-

товки (рис. 2.9, 2,10) выполняют негативный рисунок защитным слоем, обладающим повышенной стойкостью к высокощелочному составу ванны химического меднения.

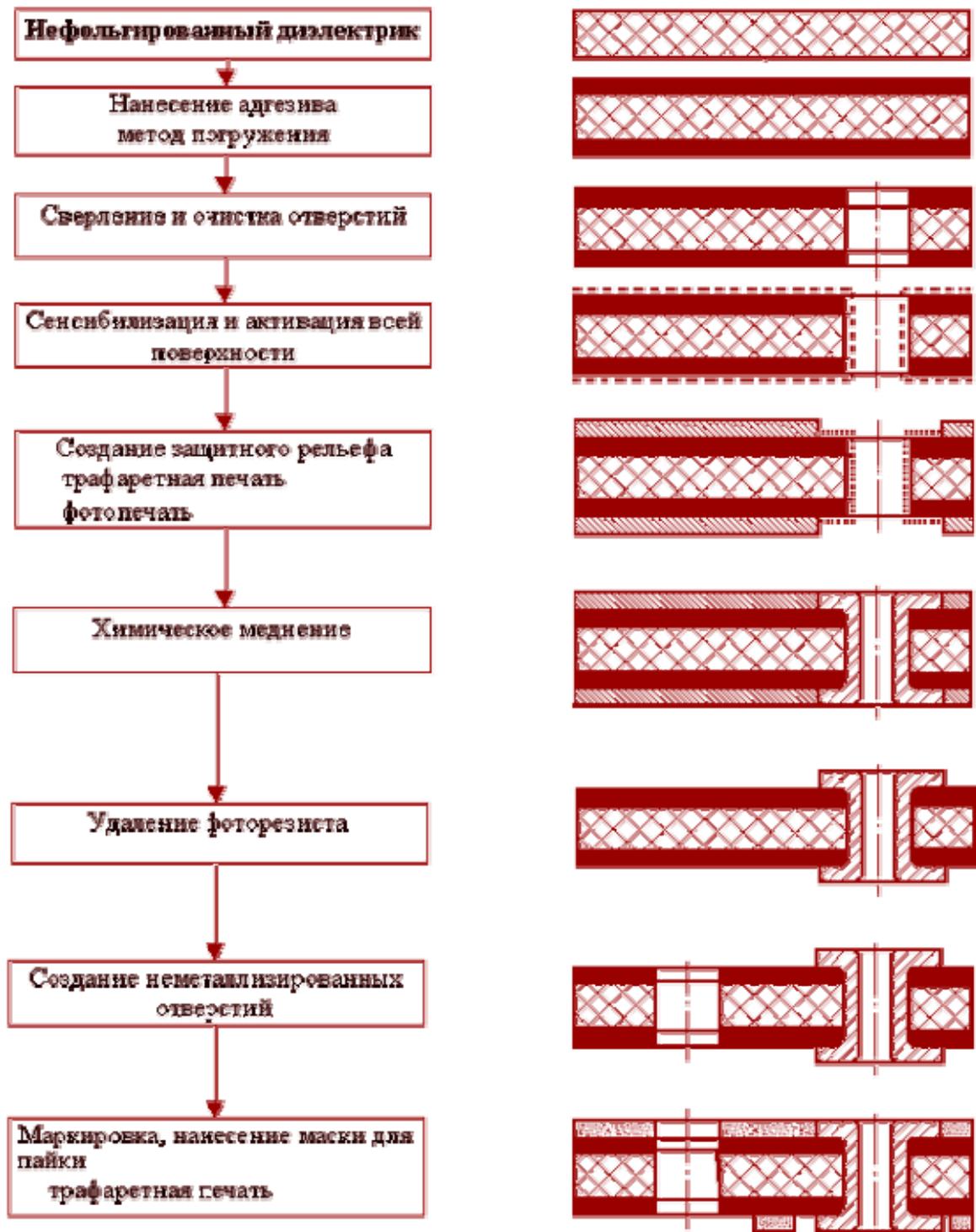


Рис. 2.9. Схема технологического процесса изготовления двухсторонней печатной платы химическим аддитивным методом

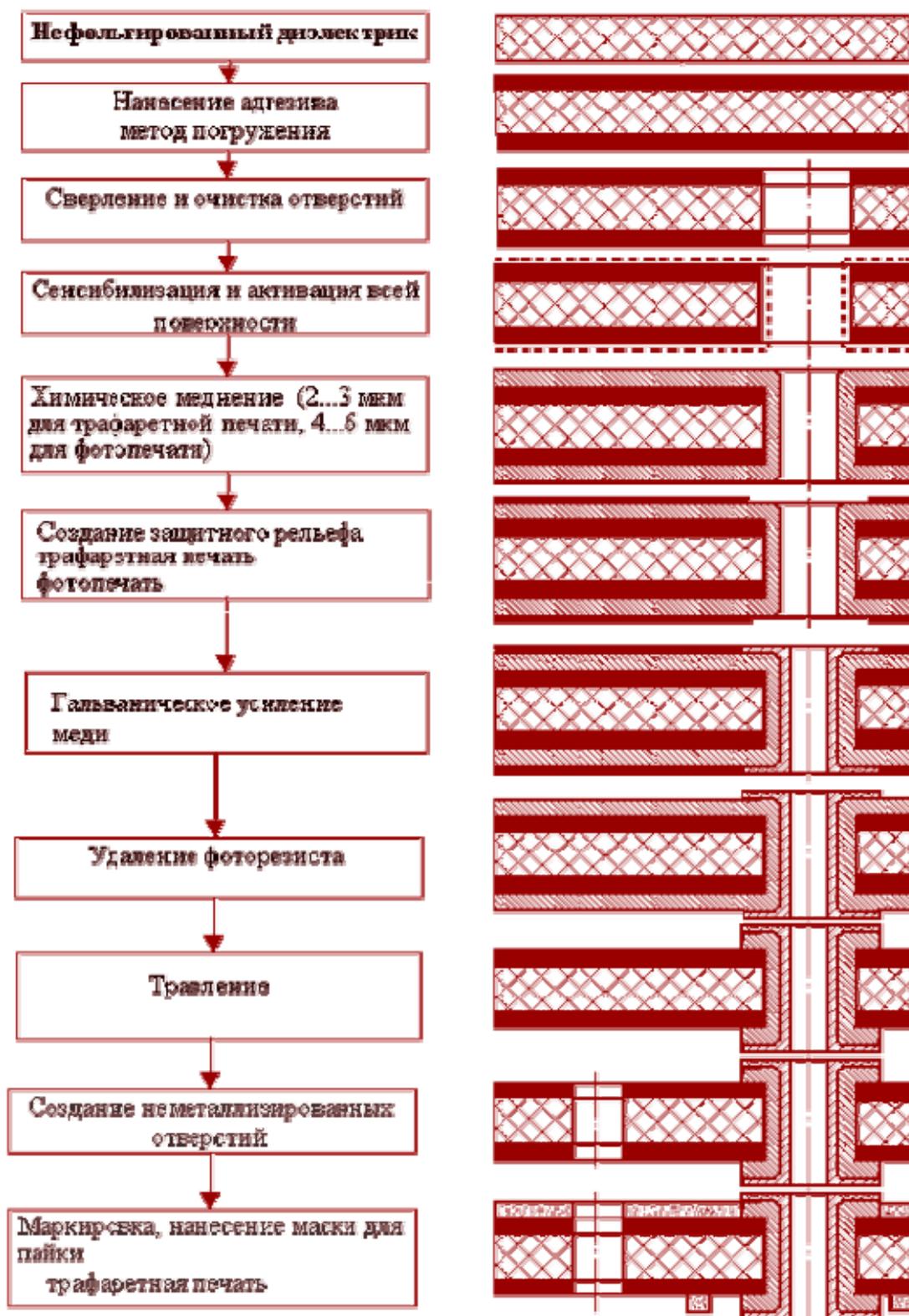


Рис. 2.10. Схема технологического процесса изготовления двухсторонних печатных плат химико-гальваническим аддитивным методом

Поверхности, открытые для нанесения меди, обрабатывают в травящем составе на основе фторборатной или хромовой кислоты (для улучшения адгезии проводников к подложке). После этого плата помещается на 8...16 часов в ванну для нанесения химической меди. Процесс нанесения толстослойной (25...35 мкм) химической меди требует специального оборудования, оснащенного системами дозирования добавок в ванну, непрерывная фильтрация раствора и АСУ ТП процесса.

ДПП, изготовленные аддитивным методом, имеют высокую разрешающую способность, практически соответствующей разрешающей способности нанесенного негативного рисунка схемы. Толщина меди получается одинаковой на всех участках ДПП и в металлизированных отверстиях. Могут металлизироваться отверстия с отношением их диаметра к толщине платы порядка 0,2. По оценке разработчиков процесса, стоимость таких плат на 20 % ниже стоимости ДПП, изготовленных субтрактивными методами.

Разновидностью аддитивного метода является фотоформирование проводящего рисунка схемы. В результате процесса фотоформирования создается поверхность проводящего рисунка схемы, инициирующая последующее осаждения на нее толстослойной химической меди. При этом не применяя защитных резистов. Осажденная медь обладает хорошей адгезией к диэлектрику, разрешающая способность зависит только от разрешающей способности применяемых фотошаблонов. Могут быть получены проводники с шириной 0,08...0,1 мм. Затраты на производство ДПП таким способом, по сравнению с субтрактивными методами, ниже на 30 %.

Последовательность технологических процессов изготовления ДПП рассмотренными методами приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Последовательность технологических процессов изготовления ДПП

Основные технологические операции	Комбинированный позитивный метод		Полуаддитивный метод		Аддитивный метод	Фотоформирование
	ДПП	ДПП с КПК	На диэлектрике	На металлическом основании		
Нарезка заготовок	+	+	+	+	+	+
Образование базовых отверстий	+	+	+	+	+	+
Образование отверстий под металлизацию	+	+	+	+	+	+

Продолжение табл. 2.2

Основные технологические операции	Комбинированный позитивный метод		Полуаддитивный метод		Аддитивный метод	Фотоформирование
	ДПП	ДПП с КПК	На диэлектрике	На металлическом основании		
Нанесение диэлектрического покрытия	-	-	-	+	-	-
Активация поверхности диэлектрика	-	-	+	+	-	+
Химическая металлизация диэлектрика	+	+	+	+	-	-
Гальваническая металлизация платы	+	+	+	+	-	-
Фотосенсибилизация диэлектрика	-	-	-	-	+	+
Получение рисунка схемы платы	+	+	+	+	+	+
Активация поверхности диэлектрика	-	-	-	-	+	-
Химическая металлизация диэлектрика	-	-	-	-	-	+
Гальваническая металлизация рисунка	+	+	+	+	-	-
Нанесение металлорезиста на рисунок	+	+	+	+	+	-
Удаление маски	+	+	+	+	+	-
Термообработка платы					-	+
Травление меди с пробельных мест	+	+	+	+	-	-
Снятие металлорезиста с КПК и нанесение подслоя никеля	-	+	-	-	-	-
Палладирование или золочение КПК	-	+	-	-	-	-
Оплавление металлорезиста	+	+	+	+	-	-
Обработка платы по контуру	+	+	+	+	+	+
Маркировка платы	+	+	+	+	+	+
Нанесение защитного покрытия	+	+	+	+	+	+
Окончательный контроль платы	+	+	+	+	+	+

МПП изготавливают методами, построенными на типовых операциях, применяемых в производстве ОПП и ДПП. Конструктивно-технологические особенности МПП требуют, кроме того, применения ряда специфических операций, таких, как прессование слоев, создание межслойных соединений и др. (табл. 2.3).

Таблица 2.3

## Последовательность технологических процессов изготовления МПП

Основные технологические операции	Изготовление МПП					
	С выступающими выводами	С открытыми контактными площадками	Послойным наращиванием	Попарным прессованием	Металлизацией сквозных отверстий	Металлизацией сквозных отверстий с внутренними перепадами
1	2	3	4	5	6	7
Нарезка заготовок слоев	+	+	+*	+	+	+
Образование базовых отверстий на заготовках	+	+	+	+	-	+
Прессование диэлектрика из стеклоткани	-	-	+	-	-	-
Нанесение клея на диэлектрик	-	-	+	-	-	-
Перфорация окон в диэлектрике	+	-	+	-	-	-
Склеивание диэлектрика и фольги	+	-	+	-	-	-
Защита лаком	+	-	-	+	-	-
Образование отверстий	-	-	-	-	-	+
Химическая металлизация отверстий	-	-	-	-	-	+
Гальваническая металлизация отверстий	-	-	+	-	-	+
Выравнивание поверхности меди	-	-	+	-	-	-
Химическая металлизация диэлектрика	-	-	+	-	-	-
Гальваническая металлизация диэлектрика	-	-	+	-	-	-
Получение рисунка схемы слоев	+	+	+	+	+	+
Травление меди с пробельных мест	+	+	+	+	+	+
Удаление маски	+	+	+	+	+	+
Перфорация окон в диэлектрике	-	+	-	-	-	-
Образование базовых отверстий	-	-	-	-	+	-
Прессование диэлектрической прокладки	-	+	+**	-	-	-
Снятие лака	+	-	-	+	-	-
Образование металлизированных отверстий	-	-	-	+	-	-
Защита лаком	-	-	-	+	-	-
Облуживание контактных площадок	-	+	-	-	-	-
Химическая металлизация отверстий	-	-	-	+	-	-
Снятие лака	-	-	-	+	-	-
Гальваническая металлизация отверстий	-	-	+	+	-	-
Выравнивание поверхности меди	-	-	+	-	-	-
Химическая металлизация диэлектрика	-	-	+	-	-	-
Гальваническая металлизация диэлектрика	-	-	+	-	-	-
Прессование слоев МПП	+	-	-	+	+	+
Образование металлизированных отверстий	-	-	-	+	+	+
Химическая очистка отверстий	-	-	-	+	+	+
Химическая металлизация отверстий	-	-	-	+	+	+
Гальваническая металлизация платы	-	-	-	+	+	+
Получение рисунка схемы	-	-	+	+	+	+
Гальваническая металлизация рисунка	-	-	-	+	+	+
Нанесение металлорезиста на рисунок	-	-	-	+	+	+
Удаление маски	-	-	-	+	+	+
Травление меди с пробельных мест	-	-	+	+	+	+
Удаление маски	-	-	+	-	-	-
Оплавление металлорезиста	-	-	-	+	+	+
Прессование диэлектрической прокладки	-	-	+	-	-	-

Продолжение табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7
Отгибка выступающих выводов	+	–	–	–	–	–
акрепление выводов на поверхности платы	+	–	–	–	–	–
Облуживание выводов	+	–	–	–	–	–
Обработка платы по контуру	+	+	+	+	+	+
Маркировка платы	+	+	+	+	+	+
Нанесение защитного покрытия	+	+	+	+	+	+
Окончательный контроль платы	+	+	+	+	+	+
* Изготовление первого слоя. ** Изготовление второго и последующих слоев						

Выбор варианта конструкции МПП определяется следующими факторами: универсальностью применения той или иной элементной базы; реализуемой плотностью монтажа; экономически целесообразными размерами плат; максимально возможным числом слоев; степенью надежности как межслойных соединений, так и самих плат; ремонтоспособностью и возможностью внесения изменений в схему; технологичностью, существующим парком технологического оборудования и себестоимостью производства; совместимостью и методами изготовления ОПП и ДПП; возможностью механизации и автоматизации производства, а также созданием предпосылок для механизации и автоматизации монтажно-сборочных процессов.

Анализ приведенных факторов и практический опыт изготовления МПП (табл. 2.4) заставляют отдать предпочтение варианту МПП с металлизацией сквозных отверстий, который получил наибольшее распространение. Основные этапы производства этих МПП – изготовление внутренних слоев химическим методом, прессование слоев в монолитную структуру, сверление сквозных отверстий с их последующей металлизацией и образованием рисунка наружных слоев комбинированным позитивным методом.

### 2.3. Конструктивные характеристики ПП

Общие конструктивные характеристики ПП зависят от вида и конструкции электрооборудования, сложности конкретной электрической схемы, условий эксплуатации аппаратуры, применяемой элементной базы, исполнения определенного узла или блока, технологических возможностей производства и ряда технико-экономических факторов. В зависимости от сложности реализуемой электрической схемы и применяемой элементной базы выбирают конструктивное исполнение платы, число слоев и плотность проводящего рисунка схемы. При выборе числа слоев платы следует иметь в виду, что наименее трудоемки и просты в изготовлении ОПП без металлизированных отверстий и приблизительно равны по затратам ОПП и ДПП с металлизированными отверстиями. Наиболее трудоемки и сложны в изготовлении МПП, число слоев которых ограничено предельно

Таблица 2.4

Сравнительные характеристики  
конструктивно-технологических вариантов МПП

Конструкция МПП	Установка ИМС и ЭРЭ		Относительная плотность печатного монтажа	Изготовление объединительных плат	Оптимальное число слоев платы	Качество межслойных соединений	Ремонтоспособность платы	Технологичность платы	Совместимость с изготовлением ОПП и ДПП	Автоматизация и механизация операций	Автоматизация и механизация операций на плате	Относительная трудоемкость изготовления платы
	С планарными выводами	Со штыревыми выводами										
Открытые контактные площадки	Возможна	Затруднена	0,6	Возможно	6	–	Затруднена	Хорошая	Удовлетворительная	Возможна	Невозможна	0,7
Выступающие выводы	Возможна	Затруднена	0,5	Затруднено	10	–	Высокая	Удовлетворительная	Плохая	Затруднена	Возможна	2
Попарное прессование	Возможна	Возможна	0,8	Возможно	4	Низкое	Затруднена	Хорошая	Хорошая	Возможна	Возможна	1
Прослойное наращивание	Возможна	Невозможна	1	Затруднено	5	Хорошее	Низкая	Плохая	Плохая	Затруднена	Возможна	5
Металлизация сквозных отверстий	Возможна	Возможна	0,8	Возможно	12	Хорошее	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Возможна	Возможна	1

допустимым соотношением между диаметром металлизированных отверстий и толщиной платы (не менее 1/3). Ориентировочно соотношение трудоемкости изготовления ОПП без металлизированных отверстий, к ДПП и МПП составляет 1:4:20. Плотность проводящего рисунка схемы определяется шириной проводников и расстоянием между ними.

В соответствии с ГОСТ 23751-86 в зависимости от плотности рисунка ПП и ГПК (рис.2.11) делят на пять классов (таблица 2.5.). Первый, допускает минимальную ширину проводников и расстояние между ними 0,75 мм, а пятый – 0,1 мм.

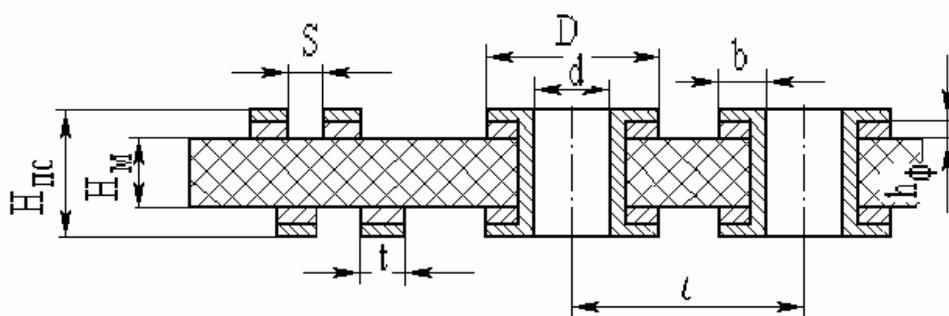


Рис. 2.11. Основные элементы конструкции двухсторонней ПП:

t – ширина печатного проводника; S – расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка; b – гарантированный пояс; D – диаметр контактной площадки; d – диаметр отверстия;  $h_{\text{ф}}$  – толщина фольги;  $H_{\text{пс}}$  – суммарная толщина ПП с химическим и (или) гальваническим покрытием;  $H_{\text{м}}$  – толщина материала основания; l – расстояние между центрами (осями) элементов конструкции ПП

Таблица 2.5

Условное обозначение	Номинальное значение размеров для класса точности				
	1	2	3	4	5
t, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
S, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
b, мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
f	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Здесь: f – отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине платы.

Трассировку рисунка схемы производят по координатной сетке с шагом 2,5;1,25 (ГОСТ Р51040-97) и 0,625 мм. Для унификации элементов рисунка рекомендуются стандартные формы и размеры контактных площадок, проводников, экранов и т. п. При разработке проводящего рисунка МПП применяют постоянный (одинаковый) рисунок наружных слоев определенного типоразмера плат, даже если это приводит к увеличению (в

пределах допустимого) числа слоев. Это дает ряд преимуществ: одинаковую программу сверления металлируемых отверстий плат, постоянную площадь гальванической металлизации, сокращение номенклатуры контактирующих устройств электроконтроля, упрощение процесса автоматизации и механизации сборки узлов.

Допустимые рабочие напряжения для проводников плат, расположенных в одной плоскости, зависят от минимальных расстояний между ними, материала диэлектрического основания и характера воздействия окружающей среды.

Плотность тока в печатных проводниках наружных слоев плат не должна превышать  $20 \text{ А/мм}^2$ , а во внутренних слоях МПП из-за худших условий теплоотвода –  $15 \text{ А/мм}^2$ .

Сопротивление изоляции зависит от материала диэлектрического основания, климатических условий и характера электрических цепей. Например, в камере влажности сопротивления изоляции плат из стеклотекстолита должно быть не менее  $10000 \text{ МОм}$ ; для протяженных цепей питания в МПП допускается снижение этого значения до  $1000 \text{ МОм}$ .

При необходимости должны быть рассчитаны распределенная емкость и индуктивность печатных проводников.

Ремонтопригодность – возможность восстановления электрических связей, внесения схемных изменений, замена навесных элементов или установки дополнительных элементов. Она снижается при повышении плотности монтажа, уменьшении ширины проводников и расстояний между ними. Число возможных перепаек навесных элементов снижается с уменьшением площади контактных площадок и диаметров металлизированных монтажных отверстий.

Для установки пустотелых заклепок, при ремонте металлизированного отверстия с целью создания дополнительного перехода со слоя на слой, ширина пояска контактной площадки должна быть такой, чтобы можно было надежно опаять бортики заклепки (рис. 2.12). При необходимости введения объемных проводников нужно предусмотреть возможность их подпайки к контактным площадкам или в металлизированные отверстия и прокладывания их по полю платы отдельно или в жгутиках с креплением к диэлектрику платы с помощью нанесения быстросохнущего клея с шагом  $25 \dots 40 \text{ мм}$ .

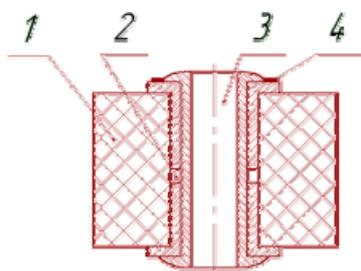


Рис. 2.12. Схема установки пустотелой заклепки в поврежденное отверстие ДПП: 1 – диэлектрическое основание платы; 2 – поврежденное металлизированное отверстие; 3 – установленная и развальцованная пустотелая заклепка; 4 – зона опайки бортиков заклепки

Разрыв печатных проводников на внутренних слоях МПП для устранения лишней связи или внесение схемного изменения можно осуществить сверлом, диаметр которого на 0,3...0,5 мм больше ширины проводника. Однако эта операция сложна, не гарантирует целостности соседних проводников, трудоемка и нетехнологична. Более технологично предусмотреть в конструкции МПП электрические связи внутренних слоев только по переходным отверстиям, а для монтажа навесных элементов – планарные контактные площадки или металлизированные отверстия, соединенные с переходными отверстиями перемычкой по наружному слою платы. Перемычку легко устранить, нарушив при этом коммутацию вывода навесного элемента с печатным монтажом, и выполнить нужную электрическую цепь объемным проводником.

Конструкция аппаратуры, конструктивное исполнение платы, плотность рисунка схемы и возможности производства определяют габариты ПП, выбираемые с требованиями ГОСТ 10317-79. Следует стремиться к сокращению типоразмеров плат и их унификации, что способствует увеличению производительности труда, позволяет сократить количество приспособлений и упростить такое дорогостоящее технологическое оснащение, как устройство для совмещения слоев, подвески в химических и гальванических ваннах, пресс-формы для прессования пакетов МПП, контактирующие устройства стендов электроконтроля и т. п. При проектировании отдельных типоразмеров ПП необходимо стремиться к кратности площадей плат разных типоразмеров. Это упростит производство плат и облегчит решение таких технологических вопросов, как рациональная загрузка гальванических ванн при одновременном изготовлении плат нескольких типоразмеров и др.

При определении размеров ПП необходимо отдавать предпочтение меньшим габаритам, даже если общее число плат при этом в блоке увеличивается. При производстве плат размером более 240 мм усложняется технологическое оборудование, увеличивается брак, связанный с некоторой нестабильностью качества исходного материала по полю заготовок, уменьшается допустимая плотность проводящего рисунка схемы и непропорционально возрастает трудоемкость изготовления ПП. Например, при переходе от типовой МПП, имеющей размеры 135x240 мм, к МПП, линейные размеры которой увеличены в 1,5 раза, трудоемкость изготовления увеличивается в 3 раза. Следует также учитывать, что при увеличении размеров плат снижается их жесткость, вибропрочность и увеличивается абсолютная величина возможного коробления. Толщину ПП выбирают в пределах 0,8...3,0 мм, толщину ГПК – в пределах 0,06...0,3 мм; толщина ГПП составляет 0,1...0,5 мм.

Предпочтительна прямоугольная конфигурация плат с соотношением сторон до 1:4, однако в технически обоснованных случаях могут быть

применены платы с большим соотношением сторон или с формой, отличной от прямоугольной.

При проектировании всех видов ПП следует стремиться к минимальному числу металлизированных отверстий и их диаметров. Как правило, отраслевые стандарты на конструирование ПП не рекомендуют применение более трех значений диаметров на одной плате из-за затруднений, связанных со сменой сверл при их сверлении на станках с ЧПУ. Сокращение числа диаметров отверстий ограничено условиями пайки штыревых выводов, размещаемых в отверстиях.

## **2.4. Конструкционные материалы для изготовления печатных плат**

Характеристики ПП и экономические показатели производства определяются видом и свойствами основных конструкционных материалов, в качестве которых обычно используют фольгированные медью и нефольгированные слоистые пластики различного типа и толщины. С развитием применения ПП и повышением требований к их свойствам растут требования к объемам выпуска и качеству изготовления конструкционных материалов, появляются новые их виды и марки, приспособленные для специального применения и различных способов производства.

### **Виды материалов и их производство**

Фольгированные диэлектрики представляют собой электроизоляционные основания, плакированные обычно электролитической медной фольгой с оксидированным гальваностойким слоем, прилегающим к электроизоляционному основанию. Стандартная толщина фольги на материалах, выпускаемых отечественной промышленностью, – 5, 20, 35 и 50 мкм. Ряд толщин фольги на материалах зарубежного производства составляет 5; 17,5; 35; 50; 70 и 105 мкм. Чистота меди не менее 99,5 %, а шероховатость открытой поверхности не ниже 0,4 мкм. За рубежом в ограниченных количествах выпускается также материал, плакированный никелевой фольгой и применяемый для монтажа навесных элементов методом сварки.

В зависимости от назначения фольгированные диэлектрики могут быть односторонними и двусторонними и иметь толщину от 0,06 до 3,0 мм. Они поставляются в виде листов размерами 500x700 мм (ГОСТ 10316–78 (6x6.95)). Зарубежные фирмы выпускают материалы для печатных плат толщиной от 0,03 до 6,25 мм.

В качестве электроизоляционного основания применяют гетинакс марки ГФ, представляющий собой спрессованные слои электроизоляционной бумаги, пропитанные фенольной смолой, или стеклотекстолиты марки СФ, представляющие собой спрессованные слои стеклоткани, пропитан-

ные эпоксифенольной смолой с содержанием смолы 40 %. В качестве прокладок (СПТ-3) для прессования МПП используют ткань из стеклянного волокна марки Э, пропитанную недополимеризованной термореактивной эпоксидной смолой.

Фольгированные диэлектрики используют при субтрактивных методах изготовления ПП и слоев МПП.

Нефольгированные диэлектрики, предназначенные для полуаддитивного и аддитивного методов производства ПП, имеют на поверхности специально нанесенный адгезивный слой толщиной 50...100 мкм (например, эпоксикаучуковой композиции), который служит для лучшего сцепления наносимой химической меди с диэлектриком и повышает качество поверхности диэлектрика, способствующее лучшему формированию проводящего рисунка. Для аддитивного метода производства создаются материалы с введенными в пропитывающую смолу мелкодисперсными катализаторами, которые способствуют лучшей адгезии химически осаждаемой меди. При производстве печатных кабелей применяют армированные фольгированные пленки из фторопласта-4 (Ф-4 МБСФ) и полиэтилентерефталатные пленки (ПЭТФ).

Изготовление фольгированных стеклотекстолитов, наиболее распространенных в производстве ЭВА, состоит из подготовки диэлектрика, изготовления фольги, прессования листов. При подготовке диэлектрика из стеклоткани путем обжига удаляют парафин, пропитывают ее смолой и сушат. Степень полимеризации смолы регулируется скоростью движения стеклоткани в сушильной печи и скоростью циркуляции воздуха. Медную фольгу получают электроосаждением меди на вращающиеся барабаны из нержавеющей стали или из титана. Подготовленные слои стеклоткани и фольга собираются в пакеты в термостатированном обеспыленном помещении и прессуются в листы на гидравлических прессах при температуре 160...180° С и давлении до 7 МПа. При этом происходит окончательная полимеризация смолы, обеспечивающая монолитную структуру диэлектрика. Предприятие-изготовитель проводит типовые испытания диэлектрика не реже одного раза в три месяца и контрольные испытания каждой партии на соответствие техническим условиям.

### **Требования к материалам**

Физико-механические свойства конструкционных материалов должны удовлетворять требованиям, установленным техническими условиями на их производство, и обеспечивать качественное изготовление ПП в соответствии с типовыми технологическими процессами. Слоистые пластики при производстве и эксплуатации ПП должны обладать высокой химической и термической стойкостью, минимальной деформацией, влагопоглощением не более 0,2...0,8 % и не должны выделять вредных примесей в

окружающую среду. Поверхностное сопротивление диэлектриков при 40° С и относительной влажности 93 % в течение 4 суток должно быть не менее 10<sup>10</sup> Ом и восстанавливаться до исходного значения через 1...2 ч после нахождения материала в нормальных условиях. Удельное объемное сопротивление при тех же условиях должно составлять не менее 5...10<sup>11</sup> Ом·см и также восстанавливаться в нормальных условиях.

Поверхность листов должна быть ровной и гладкой, без пузырей и посторонних включений, на фольге не допускаются оксидные пленки и вещества, не поддающиеся травлению, на диэлектрике не разрешается наличие пятен, следов смазки, не заполненных смолой участков стеклоткани и т. д. Диэлектрик и фольга не должны повреждаться при термоударе (260° С) в течение 5...20 с (в зависимости от марки материала). После травливания фольги с тонких диэлектриков линейная деформация основания не должна превышать 0,03...0,1 %. Фольгированные диэлектрики должны обладать заданной прочностью сцепления фольги с диэлектриком, определяемой усилием отрыва полоски фольги шириной 3 мм от диэлектрического основания (в зависимости от марки материала от 12 до 78 Н), теплостойкостью в течение 1000 ч при сохранении не менее 50 % прочности сцепления, стойкостью к воздействию травителей, растворителей и химикатов, применяемых при гальванических процессах.

### **Выбор материалов**

При проектировании и изготовлении ПП большое значение имеет правильный и тщательный выбор используемого материала в зависимости от необходимых конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик плат. После выбора конструктивных характеристик платы, ее толщины и числа слоев рассчитывают допустимую толщину материала с учетом обеспечения возможности металлизации отверстий необходимого диаметра. Затем подбирают марку материала, удовлетворяющую необходимым электрофизическим и физико-механическим свойствам. При этом должны быть приняты во внимание также соображения экономического характера. Наиболее дешевыми материалами с удовлетворительной обрабатываемостью и хорошими характеристиками в нормальных условиях являются гетинаксы. При повышенной влажности и тепловых воздействиях целесообразно использовать более дорогие, но обладающие лучшими эксплуатационными характеристиками стеклотекстолиты. При высоких температурных нагрузках применяют силиконовые стеклопластики.

В зависимости от принятого метода изготовления ОПП и ДПП используют фольгированные и нефольгированные диэлектрики. Для изготовления МПП, ГПП и ГПК применяют фольгированные диэлектрики (табл. 2.6). Фольгированные диэлектрики более дороги, и ПП на них имеют меньшую разрешающую способность (уменьшается с увеличением

толщины фольги). Однако они находят широкое применение, так как технологический процесс изготовления ПП на них в настоящее время хорошо освоен на большинстве предприятий. Для полосковых схем используют специальные высокочастотные фольгированные диэлектрики типа фольгированного армированного фторопласта марки ФАФ-4 и диэлектрики на основе полистирола и полиэтилена, плакированные тонкой (0,05 мм) медной фольгой.

Таблица 2.6

Материалы для изготовления печатных плат

Вид материала	Марка материала	Толщина		Область применения
		фольги, мкм	материала с фольгой, мм	
Фольгированный гетинакс	ГФ-1-35 ГФ-2-35	35	1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ОПП, ДПП
Фольгированный стеклотекстолит	СФ-1(2)-35	35	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ОПП
	СФ-1(2)-50	50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ДПП
	СФ-1Н(2Н)-50	50	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
Нефольгированный стеклотекстолит	СТЭК	–	1,0; 1,5	ДПП, изготовленные электрохимическим методом
Слофадит		5	1,0; 1,5	
Теплостойкий фольгированный стеклотекстолит	СТФ-1 (2)	35	0,13; 0,15; 0,20; 0,25; 0,35; 0,50; 0,80; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50; 3,00	ДПП, МПП ГПП
Травящийся фольгированный стеклотекстолит	ФТС-1-20А(20А0)	20	0,08; 0,15	МПП, ГПП
	ФТС-2-20А(20А0)	20	0,18; 0,27; 0,50	
	ФТС-1-35А(35А0)	35	0,10; 0,12; 0,19	
	ФТС-2-35А(35А0)	35	0,14; 0,23; 0,50	
Тонкий фольгированный диэлектрик	ДФМ-2	35	0,25; 0,35	ГПП
Гибкий фольгированный диэлектрик	ФДЛ	35	0,06; 0,07; 0,10	ГПК
	ФДЛ	50	0,08; 0,09; 0,12	
	ФДФ-3МС-1	20	0,12	
Прокладочная стеклоткань	СТП-3	–	0,025; 0,060; 0,1	МПП

Материал, применяемый для изготовления ПП с КПК, должен иметь жесткий допуск по толщине (не более  $\pm 0,05$  мм) и минимальное коробление. При производстве некоторых видов аппаратуры необходимо использование материалов теплостойких и нагревостойких марок. Для МПП, изготовленных методом металлизации сквозных отверстий, предпочтительно применение травящихся диэлектриков, так как подтравливание диэлектрика в отверстиях плат улучшает условия сцепления осаждаемой меди и фольги в металлизированных отверстиях.

### Зарубежные стандарты на материалы для печатных плат

- **IPC-3408** General Requirements for Anistropically Conductive Adhesives Films – Общие требования к анизотропным проводящим клейким пленкам.
- **IPC-A-142** Finished Fabric Woven from Aramid for Printed Boards – Фольгированные арамидные ткани для печатных плат.
- **IPC-CC-830** Qualification and **performance** of electrical insulation compounds for printed board assemblies – Изоляционные компаунды для защиты печатных плат. Параметры и методы испытаний.
- **IPC-CF-148** Resin Coated Metal for Multilayer Printed Boards – Покрытые смолой металлы для многослойных печатных плат.
- **IPC-CF-152A** Composite Metallic Material Specification for Printed Wiring Boards – Спецификация на **композитный** металлический материал для печатных плат.
- **IPC-EG-140** Fabric Woven From «E» Glass for Printed Boards – Стеклоткань типа «E» для печатных плат.
- **IPC-FC-231C** Flexible Bare **Dielectrics** for use in Flexible Printed Wiring (Amend. - 10/95) – Гибкие диэлектрики для печатных плат (Исправление – 10/95).
- **IPC-FC-232C** Adhesive Coated **Dielectric** Films for Use as Cover Sheets for Flexible Printed Wiring (Amend. - 10/95) – Покрытые адгезивом диэлектрические пленки для гибких печатных плат. (Исправление – 10/95).
- **IPC-FC-241C** Flexible Metal-Clad Dielectrics for Use in Fabrication of Flexible Printed Wiring (Amend. – 10/95) – Гибкие фольгированные диэлектрики для печатных плат. (Исправление – 10/95).
- **IPC-L-108B** Specification for thin **metal** clad base materials for multilayer printed boards – Материалы тонких металлокордов для многослойных печатных плат. Технические требования.
- **IPC-L-109B** Specification for resin preimpregnated fabric (prepreg) for multilayer printed boards – Препреги для многослойных печатных плат. Технические условия.

- **IPC-L-112A** Foil Clad, **Composite** Laminate – Фольгированные ламинаты.
- **IPC-L-115B** Specification for rigid metal clad base materials for printed boards – Металлокорды для **печатных** плат. Технические условия.
- **IPC-L-125A** Plastic Substrates, Clad or Unclad, for High Speed/High Frequency Interconnections – **Фольгированные** и нефольгированные подложки для высокоскоростных и высокочастотных схем.
- **IPC-M-107** Printed Board Materials Standards (14 document package) – Стандарты по материалам для печатных плат (14 документов).
- **IPC-MF-150F** Metal Foil for Printed Wiring Applications (Amend. 1 - 8/92) – Металлическая фольга для **печатных** плат. (Исправление 1 – 8/92).
- **IPC-MI-660** Incoming Inspection of Raw Materials Manual – Руководства по входному контролю сырья.
- **IPC-ML-960** Mass Lamination Panels for Multilayer Printed Boards – Массламинаты для многослойных печатных плат.
- **IPC-QF-143** Finished Fabric Woven from Quartz (Pure Fused Silica for Printed Boards) – Фольгированные кварцевые ткани для печатных плат.
- **IPC-SG-141** Finished Fabric **Woven** from «S» Glass for Printed Boards – Фольгированные стеклоткани типа «С» для печатных плат.
- **IPC-SM-839** Pre and Post **Solder** Mask Application – Применение паяльных масок.
- **IPC-SM-840C** Permanent Polymer Coating (Solder Mask) for Printed Boards – Полимерные **покрытия** (паяльные маски) для печатных плат. Параметры и методы испытаний.

#### **Зарубежные и отечественные стандарты проектирования печатных плат**

- **IPC-2141** Controlled **Impedance** Circuit Boards and High Speed Logic Design – Печатные платы с контролируемым импедансом и быстрые логические платы.
- **IPC-2221** Generic **Standard** on Printed Board Design - Includes Amendment 1 – Проектирование печатных плат. Общие технические условия (с дополнением 1). Взамен IPC D-275.
- **IPC-2222** Sectional **Standard** on Rigid Printed Board Design (replaces D-275) – Проектирование жестких печатных плат (взамен D-275).
- **IPC-2223** Sectional **Standard** for Flexible Printed Boards – Проектирование гибких печатных плат.
- **IPC-2224** Sectional **Standard** for Design of Printed Boards for PC Cards – Проектирование печатных плат для PC карт.

- **IPC-2225** Sectional **Standard** for Organic Multichip Modules (MCM-L) and MCM-L Assemblies – Проектирование органических многокристальных модулей (MCM-L) и MCM-L сборок.
- **IPC-2301** Design **Standard** for Organic Multichip Modules (MCM-L) and MCM-L Assemblies – Органические многокристальные модули (MCM-L) и сборки MCM-L Руководство по проектированию.
- **IPC-2511A** Generic **Requirements** for Implementation of Product Manufacturing Description Data & Transfer Method – Форматы данных для описания продукта в производстве и методы их передачи (серия из 8 стандартов - IPC-2511... IPC-2518).
- **IPC-2512A** Sectional Requirements for Implementation of Administrative Methods for Manufacturing Data Description (ADMIN).
- **IPC-2513A** Sectional Requirements for Implementation of Drawing Methods for Manufacturing Data **Description** (DRAWG).
- **IPC-2514A** Sectional Requirements for Implementation of Printed Board Fabrication Data Description (BDFAB).
- **IPC-2515** Sectional **Requirements** for Implementation of Bare Board Product Electrical Testing Data Description (BDTST).
- **IPC-2516A** Sectional **requirements** for.
- **IPC-2517A** Sectional **requirements** for – ASEMТ Published.
- **IPC-2518A** Sectional **requirements** for – PTLST Published.
- **IPC-3408** General **Requirements** for Anisotropically Conductive Adhesives Films – Общие требования к анизотропным проводящим клейким пленкам.
- **IPC-6011** Generic **Performance** Specification for Printed Boards – Общие требования к эффективности печатных плат.
- **IPC-6012** Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards – Оценка и требования к эффективности жестких печатных плат.
- **IPC-7721** Repair & Modification of Printed Boards and Assemblies Replaces R-700C – Ремонт и модификация печатных плат и сборок. Заменяет R-700C.
- IPC-9252 Guidelines and Requirements for Electrical Testing of Unpopulated Printed Boards – Электрический контроль несобранных печатных плат. Руководящие принципы и требования.
- **IPC-A-311** Process Controls for Phototool Generation and Use – Контроль процессов при использовании фотооборудования.
- **IPC-A-600F** Acceptability of Printed Boards – Критерии приемки печатных плат (документ переиздан в **2000** году).

- **IPC-AI-642** Automated Inspection of Artwork, Innerlayers, and Unpopulated PWBs – Автоматический **контроль** оригиналов, внутренних слоев и несобранных печатных плат.
- **IPC-BP-421** Rigid Printed Board Backplanes with Press-Fit Contacts – Жесткие объединительные печатные **платы** с направляющими контактами.
- **IPC-CC-110** Guidelines for selecting core constructions for multi-layer printed wiring board applications – **Руководство** по конструированию металлокордов для многослойных печатных плат.
- **IPC-CS-70** Chemical Handling Safety in Printed Boards and Manufacturing – Химическая безопасность в **производстве** печатных плат.
- **IPC-D-249** Design Standard for Flexible Single and Double-sided Printed Boards – Гибкие односторонние и двусторонние печатные платы. Правила проектирования.
- **IPC-D-275** Design Standard for **Rigid** Printed Boards and Rigid Printed Board Assemblies – Правила проектирования жестких печатных плат и функциональных узлов на их основе. Стандарт заменен серией из четырех нормативных документов (см. IPC-2221:IPC-2224).
- **IPC-D-300G** Printed Board **Dimensions** and Tolerances – Размеры и допуски печатных плат.
- **IPC-D-310C** Phototool Generation **and** Measurement Techniques – Фотооборудование и методы измерения.
- **IPC-D-322** Selecting Printed Wiring Board Sizes Using Standard Panel Sizes – Выбор размеров печатных **плат** на основе стандартного размерного ряда.
- **IPC-D-325A** Documentation **Requirements** for Printed Boards – Требования к документации для печатных плат.
- **IPC-D-350D** Printed Board **Description** in Digital Form – Описание печатной платы в цифровой форме.
- **IPC-D-351** Printed Board **Drawings** in Digital Form – Чертежные данные печатной платы в цифровой форме.
- **IPC-D-352** Electronic Design **Data** Description for Printed Boards in Digital Form – Электронное описание конструкции печатной платы в цифровой форме.
- **IPC-D-354** Library Format Description for Printed Boards in Digital Form – Описание библиотечного **формата** печатной платы в цифровой форме.
- **IPC-D-356** Bare Board Electrical Test Information in Digital Form – Представление результатов **электрического** контроля печатных плат в цифровой форме.

- **IPC-D-390A Automated Design Guidelines** – Руководство по автоматизированному проектированию печатных плат.
- **IPC-D-422 Press Fit Rigid Printed Board Backplanes** – Жесткие объединительные печатные платы с запрессовываемыми контактами.
- **IPC-DR-570A 1/8 Inch Diameter Shank Carbide Drills for Printed Boards** – Сверла диаметром 1/8" из карбида для сверления печатных плат.
- **IPC-DR-572 Drilling Guidelines for Printed Boards** – Руководство по сверлению печатных плат.
- **IPC-EM-782A Surface Mount Design and Land Patterns Spreadsheet** – Электронной таблицы по **конструированию** плат поверхностного монтажа и контактных площадок.
- **IPC-ET-652 Electrical Testing of Unpopulated Printed Boards** – Электрические испытания незаполненных печатных плат.
- **IPC-FC-250A Single and Double-sided Flexible Printed Wiring** – Односторонние и двусторонние гибкие печатные платы. Технические требования.
- **IPC-G-400 Technology Reference Includes Manuals 401,402,and 403** – Образы технологии (содержит описания документов 401,402 и 403).
- **IPC-G-401 Technology Reference Manual-Design (12-document package)** – Руководство по разработке **процесса** (12-документов).
- **IPC-HF-318A Microwave End Product Board Inspection & Test (Replaced by IPC-6018)** – Микроволновые платы и их тестирование. Заменен на IPC-6018.
- **IPC-HM-860 Performance specification for hybrid multilayer** – Комбинированные печатные платы. Технические требования.
- **IPC-M-105 Rigid Printed Board (19 document package)** – Жесткие печатные платы (19 документов).
- **IPC-MS-324 Performance specification for metal core boards** – Печатные платы с металлокордом. **Технические** требования.
- **IPC-MS-810 High Volume Microsection** – Серийное изготовление микрошлифов.
- **IPC-NC-349 Computer Numerical Control Formatting for Driller and Routers** – Форматы данных для цифрового управления процессами сверления.
- **IPC-OI-645 Visual Optical Inspection Aids** – Оптические средства контроля печатных плат.
- **IPC-PC-90 Implementation of Statistical Process Control (SPC)** – Использование статистического контроля процессов (SPC).
- **IPC-R-700C Modification, Rework and Repair** – see IPC-7711 and IPC-7721 – Модификация, ремонт и **восстановление** печатных плат см. IPC-7711 и IPC-7721.

- **IPC-RB-276** Performance specification for rigid printed boards – Жесткие печатные платы. Технические требования.
- **IPC-RF-245** Performance specification for rigid-flex multilayer printed boards – Многослойные жестко-гибкие печатные платы. Технические требования.
- **IPC-SM-782A** Surface Mount Design and Land Patterns (Amend. 1 – 5/95) – Руководство по проектированию плат поверхностного монтажа и контактных площадок. (Исправление 1 – 5/95).
- **IPC-SM-840C** Permanent Polymer Coating (Solder Mask) for Printed Boards – Полимерные покрытия (паяльные маски) для печатных плат. Параметры и методы испытаний.
- **IPC-SS-615** Board Quality Evaluation Slide Set (approx. 300 slides) – Слайды по оценке качества печатных плат (около 300 штук).
- **IPC-T-50F** Terms and Definitions for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits – Термины и определения в области конструирования электрон-ных схем.
- **IPC-TA-720** Technology Assessment on Laminates – Технологическая оценка ламинатов.
- **IPC-TA-721** Technology Assessment for Multilayer Boards – Технологическая оценка многослойных печатных плат.
- **IPC-TF-870** Polymer Thick Film Printed Boards – Толсто пленочные полимерные печатные платы.
- **IPC-TM-650** Test Methods Manual (Includes 2 year update service) – Руководство по выбору методов контроля печатных плат (включает 2- го-дичную поддержку).
- **IPC-TR-468** Factors Affecting Insulation Resistance Performance of Printed Boards – Факторы, влияющие на эффективность сопротивления изоляции печатной платы.
- **IPC-TR-470** Thermal Characteristics of Multilayer Interconnection Boards – Тепловые характеристики многослойных коммутационных плат.
- **IPC-TR-483** Dimensional Stability Testing of Thin Laminates – Испытания размерной стабильности тонких ламинатов.
- **IPC-TR-579** Reliability Evaluation of Small Diameter Plated Through Holes in PWBs – Оценка надежности покрытий в отверстиях небольшого диаметра в печатных платах.
- **J-STD-003** Solderability Tests of Printed Boards – Контроль паяемости печатных плат.
- **MIL-P** Printed circuit board/printed wiring board manufacturing, general specification – Изготовление печатных плат. Общие технические требования.

- **MIL-P-50884** Military specification printed wiring, flexible, and rigid flex – Гибкие и жесткие печатные платы военного назначения. Технические требования.
- **MIL-P-55110** Military specification printed wiring boards, general specification – Печатные платы военного назначения. Общие технические условия.
- **MIL-STD-2118** Design Standard for Flexible Printed Wiring – Гибкие печатные платы. Руководство по проектированию.
  - **ГОСТ 10317-79** Платы печатные. Основные размеры
  - **ГОСТ 2.123-93** Единая система конструкторской документации. Комплектность конструкторской документации на печатные платы при автоматизированном проектировании
  - **ГОСТ 2.417-91** Единая система конструкторской документации. Платы печатные. Правила выполнения чертежей
    - **ГОСТ 20406-75** Платы печатные. Термины и определения.
    - **ГОСТ 23661-79** Платы печатные многослойные. Требования к типовому технологическому процессу прессования.
    - **ГОСТ 23662-79** Платы печатные. Получение заготовок, фиксирующих и технологических отверстий. Требования к типовым технологическим процессам.
    - **ГОСТ 23664-79** Платы печатные. Получение монтажных и подлежащих металлизации отверстий. Требования к типовым технологическим процессам.
    - **ГОСТ 23665-79** Платы печатные. Обработка контура. Требования к типовым технологическим процессам.
    - **ГОСТ 23751-86** Платы печатные. Основные параметры конструкции.
    - **ГОСТ 23752-79** Платы печатные. Общие технические условия.
    - **ГОСТ 23752.1-92** Платы печатные. Методы испытаний.
    - **ГОСТ 23770-79** Платы печатные. Типовые технологические процессы химической и гальванической металлизации.
    - **ГОСТ 26164-84** Платы печатные для изделий поставляемых на экспорт. Шаги сетки.
    - **ГОСТ 27200-87** Платы печатные. Правила ремонта.
    - **ГОСТ 29137-91** Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Общие требования и нормы конструирования.
    - **ГОСТ Р 50621-93** Платы печатные одно- и двусторонние с неметаллизированными отверстиями. Общие технические требования.
    - **ГОСТ Р 50622-93** Платы печатные двусторонние с металлизированными отверстиями. Общие технические требования.

- **ГОСТ Р 50626-93 Платы печатные.** Основные положения построения технических условий.
- **ГОСТ Р 51039-97 Платы печатные.** Требования к восстановлению и ремонту.
- **ГОСТ Р 51040-97 Платы печатные.** Шаги координатной сетки.

## **2.5. Механический метод изготовления печатных плат**

Изготовление печатных плат обычно оно связано с большим количеством операций, которые содержат в себе химические процессы. Эти операции характеризуются большими затратами времени и опасностью для здоровья. Однако, если мы, например, хотим получить лишь опытный образец платы, то применять традиционные методы изготовления не рентабельно. Поэтому используют метод фрезерования или, как его еще называют «механический метод». Рассмотрим подробнее, что необходимо для его реализации и в чем он заключается.

Прототипы печатных плат могут быть изготовлены без применения фотохимических процессов – методом фрезерования. Основное преимущество механического метода – высокая оперативность и простота реализации. Механическое изготовление плат происходит полностью на одном станке

и включает следующие этапы:

- подготовка управляющего файла для станка с ЧПУ;
- автоматическая сверловка заготовки;
- фрезерование изолирующих каналов;
- металлизация переходных отверстий (возможны различные способы).

### **Этапы изготовления печатных плат фрезерованием**

#### **1. Компьютерная обработка**

Топология преобразуется в файлы фрезерования и сверления с помощью программ Circuit CAM, Instant CAM, CAM 350.

#### **2. Механическая обработка**

*Сверление отверстий.* Проводится на современных малогабаритных установках автоматизированного координатного сверления и фрезерования. Формат файлов сверления Excellon, Sieb & Meyer и др.

*Фрезерование (Гравирование фольгированного текстолита).* В настоящее время фрезерование обычно производится на той же установке, что и сверление. Для ускорения процесса проводится не удаление всех пробельных участков, а всего лишь оконтуривание проводников, выделение их из слоя фольги (рис. 2.13). Фрезерование обычно ведется кониче-

скими фрезами (рис. 2.14) с углом при вершине 60 или 30 градусов (в ряде случаев – менее 18 градусов). Для получения стабильной ширины контурной канавки необходимо строго контролировать глубину врезания фрезы в заготовку. Неплоскостность стеклотекстолита, неравномерный прижим заготовки к рабочему столу могут привести к разбросу ширины реза. Именно поэтому ряд фирм применяют специальные прижимные головки.

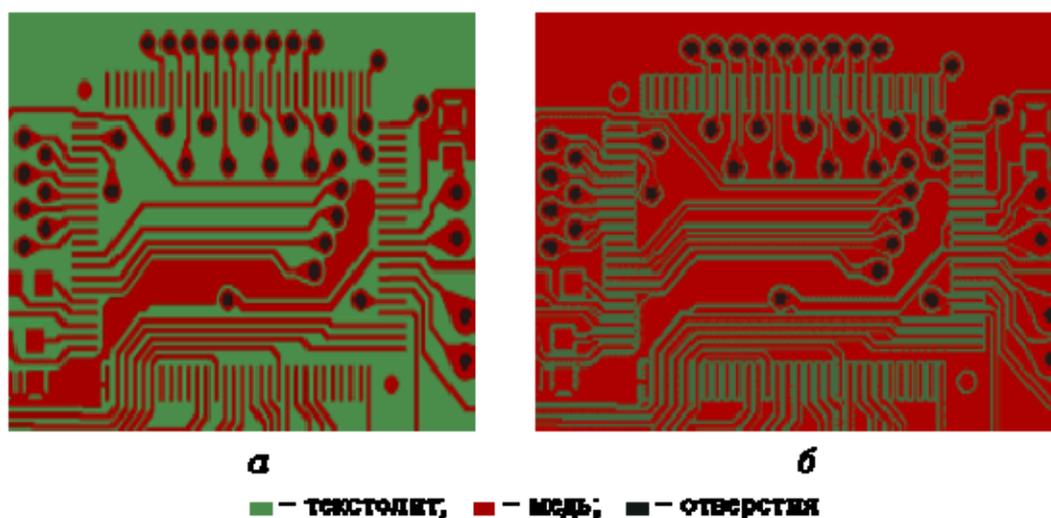


Рис. 2.13. Вид печатной платы, полученной химическим методом (а) и методом простейшего оконтуривания (б):

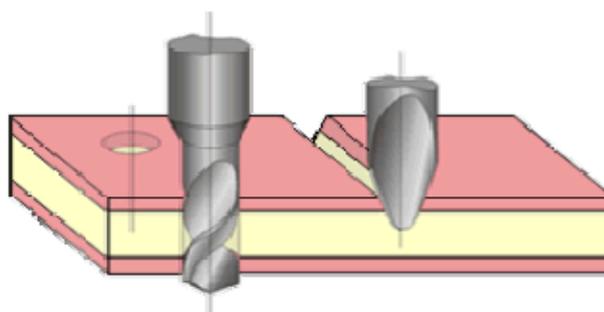


Рис. 2.14. Схема сверления и удаления фольги с печатной платы концевой фрезой

Формат файлов фрезерования HPGL, Excellon, G – кодировка и др.

Помимо простого фрезерования контура проводников могут также применяться различные варианты дополнительной обработки, преимущественно для облегчения последующей пайки.

### *Создание электрических межслойных соединений*

Помимо электрохимической металлизации, которая производится перед фрезерованием, применяется ряд альтернативных методов: пустоте-

лые заклепки, впрыскивание проводящей пасты, перемычки (а), пистоны (б), переходные втулки (в) рис. 2.15.

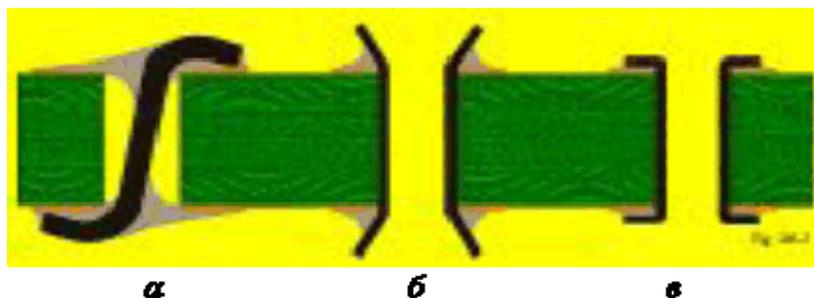


Рис. 2.15. Способы создания межслойных соединений

### Оборудование

Универсальные станки для изготовления плат подобным образом выпускает ряд фирм, таких как Bungard (рис. 2.16), LPKF, VHF, Mutronic.



Рис. 2.16. Обрабатывающие центр фирмы BUNGARD CCD

Обрабатывающие центр фирмы BUNGARD CCD (табл. 2.7.) предназначен для сверления, координатного фрезерования и гравировки следующих материалов: фольгированного стеклотекстолита печатных плат; металлов, таких как алюминий, латунь; пластмасс типа поливинилхлорида, органического стекла.

Еще одним специальным применением установки является дозированное нанесение паст или жидких адгезивов на плоские заготовки. Обрабатывающий центр также может быть дополнительно оснащен фотоплоттерной приставкой, что дает возможность использовать его для изготов-

ления фотошаблонов и для непосредственного экспонирования фоточувствительных слоев печатных плат. Установка оснащена высокочастотным шпинделем, в ее комплект также входят блок управления, пылесос и программные драйверы для сверления и фрезерования. Для управления работой обрабатывающего центра может быть использован любой IBM PC/AT совместимый персональный компьютер. Управляющее программное обеспечение совместимо с данными из всех распространенных программ САПР в различных файловых форматах, таких как Excellon (сверление), HP/GL (фрезерование), Gerber (изоляция). Управляющая программа имеет доходчивый пользовательский интерфейс и обеспечивает контроль над такими параметрами, как смещение, установка границ области перемещения, скоростей подачи и перемещения и ряда других. Требования к конфигурации компьютера: Управляющий компьютер IBM PC/AT 286/287 и выше с операционной системой MS DOS. Интерфейс RS-232.

Таблица 2.7

Технические характеристики установки Bungard CCD

Свойства	BUNGARD CCD
Площадь рабочей зоны (X – Y)	120 x 80 мм
Габариты рабочего стола	325 x 425 мм
Дискретность перемещения инструмента по X, Y, Z оси.	0,0254 мм на ось
Точность положения (позиционирования)	± 0,01 мм на ось
Диапазон скоростей шпинделя	25000...60000 об/мин
Наибольшая скорость резания	5 м/мин
Привод	Шаговые двигатели, приводной зубчатый ремень, армированный кевларом
Высокочастотный шпиндель-двигатель мощностью	125 Вт
Потребляемая мощность	230 В, 50 Гц, 250 ВА
Вес	30 кг

### Установки для изготовления печатных плат фирмы LPKF

Функции и свойства установки (рис. 2.17):

- компактность;
- фрезерование печатных плат, сверление отверстий в ПП;
- изготовление ПП для традиционного и поверхностного монтажа;

- возможность металлизации отверстий;
- быстрое изготовление опытных образцов ПП;
- гравировка алюминиевых и пластиковых панелей;
- компьютерное управление, программирование от САПР.



Рис. 2.18. Установка LPKF Proto Mat

### **Станок для изготовления печатных плат СИПП-А-05**

Отечественный станок СИПП-А-05 выпускается серийно в Санкт-Петербурге. Сделать на таком станке небольшую партию печатных плат или одну плату для опытного изделия оказывается проще и быстрее, чем по традиционной технологии. Станок позволяет исключить работы по изготовлению фотошаблонов и негативов, фотолитографии, а главное – освобождает от хождения по другим цехам и подразделениям, что подчас занимает намного больше времени, чем сама работа. Станок может разместиться на письменном столе рядом с компьютером, а для обработки на нем двухсторонней печатной платы размером 100 на 200 мм со сверлением всех отверстий требуется около двух часов.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие преимущества имеет печатный монтаж по сравнению с монтажом проводниками (объемным монтажом)?
2. Дайте определения: печатный монтаж, печатный проводник, печатная схема, печатная плата.
3. Какие классы печатных плат Вам известны?

4. Назовите известные Вам классы многослойных печатных плат. Опишите их конструкционно-технологические особенности.
5. Назовите области применения гибких печатных плат.
6. Перечислите известные Вам способы создания токопроводящего слоя. Какие из этих способов применяются для изготовления печатных плат?
7. Перечислите и дайте краткое описание сущности способов нанесения рисунка печатных плат.
8. Какие методы изготовления печатных плат наиболее освоены промышленностью?
9. Суть, достоинства и недостатки субтрактивного метода изготовления печатных плат.
10. Сущность, достоинства и недостатки аддитивного метода изготовления печатных плат.
11. Основные операции технологического процесса односторонних печатных плат субтрактивным методом.
12. Операции технологического процесса изготовления двухсторонних печатных плат комбинированным методом.
13. Назначение активации и сенсбилизации диэлектрического основания печатных плат.
14. Операции технологического процесса изготовления двухсторонних печатных плат аддитивным химическим методом.
15. Операции технологического процесса изготовления двухсторонних печатных плат аддитивным химико-гальваническим методом.
16. Какие вещества используют для травления медной фольги.
17. Какие параметры печатных плат определяет ГОСТ 23752-86.
18. Назовите марки фольгированных диэлектриков.
19. Какие требования предъявляются к фольгированным диэлектрикам?
20. Формы поставки промышленностью фольгированных диэлектриков.
21. В чем сущность механического метода изготовления печатных плат?
22. Методы и оборудование для изготовления печатных плат без химических процессов (механические метод).

### 3. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ РАБОТ. ПОЛУЧЕНИЕ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАЙКОЙ

*Электромонтажные работы* – совокупность операций и технологических процессов электрического монтажа.

*Электрический монтаж* – получение электрических соединений и межсоединений ЭРЭ, ИМС, функциональных узлов и модулей с помощью контактных соединений и монтажа.

*Контактное соединение* – соединение, обеспечивающее механически прочный и надежный электрический контакт с малым электрическим сопротивлением. В ЭВА применяют контактные соединения, полученные пайкой, сваркой, склеиванием, накруткой, и разъемные соединения. Электрические цепи создаются с помощью различных видов монтажа.

*Печатный монтаж* – система печатных проводников, размещенных на диэлектрическом основании и выполняющих функции, объемных проводников и монтажных соединений. Печатный монтаж применяют в модулях ЭВА первого, второго и третьего уровней. В настоящее время он приобрел самостоятельное значение, так как неразрывно связан с производством ПП.

*Проводный монтаж на платах* – монтаж объемными проводниками, размещенными на ПП с типовыми элементами проводящего рисунка при использовании контактных соединений, полученных пайкой, сваркой и химико-гальваническим осаждением. Этот вид монтажа был разработан для модулей второго уровня при макетировании ЭВА, а в настоящее время находит применение в опытном и мелкосерийном производстве ЭВА.

*Монтаж накруткой* – монтаж объемными проводниками с применением контактных соединений накруткой.

*Жгутовой монтаж* – монтаж объемными проводниками, объединенными в жгуты, с использованием контактных соединений, полученных пайкой, накруткой, и разъемных соединений.

*Монтаж плоскими кабелями* – монтаж объемными или печатными проводниками, объединенными в плоский ленточный провод, с использованием контактных соединений, полученных пайкой, сваркой, накруткой, и разъемных соединений.

Последние три вида монтажа применяют в модулях ЭВА третьего, четвертого и пятого уровней. Проводники межсоединений размещают на объединительных платах, шасси и других элементах пространственной компоновки аппаратуры.

Высокая трудоемкость электромонтажных работ требует непрерывного совершенствования технологии получения контактных соединений, разработки новых видов монтажа, механизации и автоматизации техноло-

гических процессов электрического монтажа. В данном разделе рассматривается технология производства основных видов контактных соединений, а также технология монтажа.

Наиболее распространенным методом получения контактных соединений является *пайка* – процесс, при котором очищенные от оксидов и органических загрязнений поверхности покрывают флюсом, нагревают при одновременном расплавлении подаваемого в зону пайки припоя и охлаждают, в результате чего образуется металлургическое соединение. При пайке должны быть обеспечены хорошая смачиваемость соединяемых поверхностей припоем, защита от окисления при нагреве до заданной температуры, соответствие свойств припоя свойствам соединяемых материалов, соблюдение заданных режимов процесса и надежная фиксация соединяемых поверхностей на этапе затвердевания припоя. Выполненное соединение должно обеспечивать заданную механическую прочность, высокую электропроводность, антикоррозионную стойкость при климатических воздействиях.

### 3.1. Способы пайки

Современные способы пайки принято классифицировать по следующим независимым признакам: удалению оксидной пленки, кристаллизации паяного шва, получению припоя, заполнению зазора припоем, источнику нагрева, наличию давления на паяемые детали, одновременности выполнения паяных соединений.

#### Способы пайки по удалению оксидной пленки

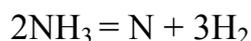
*Флюсовая пайка.* Для обеспечения удаления оксидов с поверхности паяемых металлов и припоя, а также для предупреждения образования новых оксидов при нагреве, в процессе пайки применяются паяльные флюсы. Пайка с применением флюса называется *флюсовой*. Флюсы могут быть твердыми (порошкообразные смеси различных солей), жидкими (водные растворы хлористых солей или спиртовые растворы органических соединений), а также газообразными. Интенсивность воздействия флюсов на оксидную пленку ограничена их температурным интервалом активности. Нижний предел этого интервала – минимальная температура, при которой флюс вступает во взаимодействие с оксидами. С повышением температуры активность флюса возрастает. По достижении максимальной температуры активность флюса значительно снижается из-за выгорания, испарения или улетучивания отдельных его компонентов.

Механизм воздействия флюса на оксиды металлов сложен, многообразен и включает в себя: растворение оксидной пленки основного металла

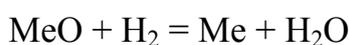
и припоя во флюсе; химические взаимодействия флюса с оксидной пленкой, в результате чего образуются легкоплавкие шлаки; химическое взаимодействие флюса с основным металлом, в результате чего происходит постепенное разрушение оксидной пленки, отрыв ее от основного металла и перевод в шлак; восстановление оксидной пленки.

В реальных условиях пайки эти процессы зачастую взаимосвязаны или протекают параллельно.

*Пайка в активной газовой среде.* В качестве восстановительной газовой среды применяется водород или его заменители: оксид углерода, азотно-водородная смесь, получаемая посредством диссоциации аммиака при нагреве выше 535° С:



Восстановление оксидов идет по реакции



Необходимо отметить, что вследствие взрывоопасности водород применяют редко и, как правило, в печах малого размера.

*Пайка в нейтральной газовой среде.* В качестве нейтральных газовых сред используют аргон, гелий, азот. Инертные газы предохраняют паяемый металл и припой от окисления в процессе пайки. Если же в пространство печи или контейнера, в которых ведется пайка, аргон постоянно подавать под некоторым давлением, т. е. пайку вести в проточной нейтральной среде, то часть кислорода вместе с воздухом вытесняется и парциальное давление его в контейнере или печи становится меньше. Тем самым создаются условия для непрерывного самопроизвольного распада оксидов – диссоциации.

Чтобы активизировать нейтральные газовые среды, в них часто добавляют газообразные флюсы: фтористый водород (HF), трехфтористый бор (BF<sub>3</sub>) и другие, которые, взаимодействуя с оксидной пленкой, способствуют ее удалению.

*Пайка в вакууме.* Бесфлюсовая пайка с применением разреженного газа при давлении ниже 10<sup>5</sup> Па называется пайкой в вакууме. При создании в печи или контейнере вакуума с определенной степенью разрежения, парциальное давление кислорода становится ниже упругости диссоциации оксидов. Эти условия необходимы для диссоциации оксидов и предупреждения повторного окисления поверхностей паяемых деталей при нагреве в процессе пайки.

В вакууме обычно паяют медь, никель, вольфрам, титановые сплавы, высоколегированные и жаропрочные стали. Сплавы, содержащие в своем составе значительное количество алюминия или хрома, при пайке в низком и среднем вакууме требуют дополнительного флюсования, так как оксиды алюминия и хрома очень устойчивы, имеют малое давление пара и

начинают испаряться при высоких температурах, близких к температурам их плавления.

*Ультразвуковая пайка.* Для удаления оксидов с поверхности некоторых металлов (например, алюминия) при низкотемпературной пайке применяют способ их ультразвукового разрушения. Он основан на свойстве упругих механических колебаний ультразвуковой частоты при прохождении через жидкости вызывать кавитацию. Ультразвуковые колебания создаются в расплавленном припое, нанесенном на паяемый металл специальным паяльником.

### **Способы пайки по кристаллизации паяного шва**

*Кристаллизация при охлаждении.* Как правило, температура нагрева при пайке на  $50...100^\circ$  выше температуры плавления припоя. При этой температуре, вследствие взаимодействия основного металла и припоя, образуется сплав в жидком состоянии, из которого формируется структура паяного шва. При окончании нагрева паяемые детали охлаждаются и начинается кристаллизация паяного шва.

На структуру и свойства паяного шва влияют не только физико-химические свойства образовавшегося в шве сплава, температура пайки, процесс диффузии, но и в значительной степени скорость охлаждения. Медленное охлаждение способствует образованию более равновесной структуры и, следовательно, прочного и пластичного паяного соединения.

*Кристаллизация при выдержке (диффузионная пайка).* Диффузионной называется такая пайка, при которой образование паяного соединения совмещено с изотермической обработкой. Изотермическая обработка обуславливает прохождение диффузии с целью направленного изменения свойств паяного соединения, в том числе посредством кристаллизации металла шва при температуре пайки, которая выше температуры солидуса припоя.

Скорость диффузии, как известно, зависит от коэффициента диффузии и концентрации диффундирующих элементов на границе раздела.

Диффузионная пайка обеспечивает более гомогенный (однородный) состав паяного шва, позволяет повышать его прочность и пластичность из-за предотвращения образования интерметаллидных прослоек или растворения их в основном металле.

### **Способы пайки по получению припоя**

*Пайка газовым полностью расплавляемым припоем.* Пайка, при которой используется заранее изготовленный припой, называется пайкой газовым припоем.

При печной и других видах групповой пайки готовый припой наносится в процессе сборки дозированными заготовками, представляющими собой кольца, изготовленные из проволоки, шайбы, штампованные из фольги или ленты, и т. д. При газопламенной пайке припой подается в зону шва с плавящегося конца прутка. При пайке паяльником припой наносится на паяемую поверхность с помощью облуженной части жала паяльника.

*Пайка композиционным припоем.* При этом способе пайки используется припой, содержащий в своем объеме наполнитель. Под наполнителем следует понимать материал, который применяется для образования в паяльном зазоре системы капилляров или для обеспечения специальных свойств паяного соединения. Применяются следующие типы припоев:

а) полученный спеканием порошка или волокон тугоплавкого материала с последующей пропиткой жидкой легкоплавкой фазой;

б) состоящий из порошка или волокон тугоплавких составляющих, смоченных легкоплавкой жидкой фазой;

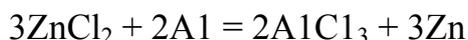
в) состоящий из смеси порошков тугоплавких составляющих;

г) представляющий собой сетку, изготовленную из волокон металла-наполнителя и легкоплавкой составляющей припоя.

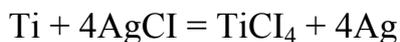
*Контактно-реактивная пайка.* Пайка, при которой припой образуется в результате контактно-реактивного плавления, называется контактно-реактивной. Она основана на способности некоторых металлов образовывать в месте контакта сплавы (эвтектики или твердые растворы), температура плавления которых ниже температуры плавления любого из соединяемых металлов. В ряде случаев, когда соединяемые металлы не образуют между собой подобного типа сплавы, используют промежуточную прослойку или наносят покрытие на соединяемые поверхности напылением, гальваническим или каким-либо другим способом.

При контактно-реактивной пайке детали необходимо сдавливать. Применение небольшого давления на первой стадии процесса создает лучший физический контакт между деталями, а также способствует выдавливанию избытка жидкой фазы. Вместе с избытками жидкости удаляются частицы оксидов, присутствие которых в паяном шве может отрицательно влиять на прочность соединения.

*Реактивно-флюсовая пайка.* Пайка, при которой припой образуется в результате разложения компонентов флюса, называется реактивно-флюсовой. Типичным примером такой пайки является пайка алюминия флюсом из хлорида цинка, основанная на способности алюминия вытеснять цинк из расплавленной соли при 400° С:



Образовавшийся цинк и является припоем, соединяющим детали из алюминия. В ряде случаев металл (продукт взаимодействия основного металла с флюсом) не является припоем. Он покрывает поверхность в месте пайки и улучшает смачиваемость дополнительным припоем, который вводится в зазор. Так, с помощью флюса AgCl можно осуществить реактивно-флюсовое лужение (покрытие) титана серебром. Процесс идет по реакции



При 350...400° С хлорид титана в виде газа улетучивается с поверхности титана, разрушая при этом оксидную пленку TiO<sub>2</sub>, а восстановленное серебро покрывает чистую поверхность титана, которую затем можно подвергать пайке другими способами.

### **Способы пайки по заполнению зазора**

*Капиллярная пайка.* Пайка, при которой расплавленный припой заполняет паяльный зазор и удерживается в нем преимущественно поверхностным натяжением, называется капиллярной. Капиллярные явления присущи почти всем способам пайки. Но проявляются они в основном тогда, когда между паяемыми деталями имеется перекрытие – нахлестка – и при сборке обеспечивается паяльный зазор. В каждом конкретном случае, в зависимости от применяемого источника нагрева, паяемого металла, припоев и т. д., величина зазора определяется опытным путем, но для пайки наиболее распространенных металлов и используемых при этом припоев рекомендованы оптимальные величины паяльных зазоров.

*Некапиллярная пайка.* Пайка, при которой расплавленный припой заполняет зазор преимущественно под действием своей массы или прилагаемой к ней извне силы.

К некапиллярной пайке относится пайкосварка, при которой соединяемым кромкам заготовок придается форма, подобная разделке кромок при сварке плавлением.

Соединение деталей осуществляется приемами, характерными для сварки; только в качестве присадочного металла используется припой, т. е. металл или сплав, температура плавления которого ниже температуры плавления основного металла.

К некапиллярной пайке можно отнести и сваркопайку. Сваркопайкой называется пайка разнородных материалов, при которой более легкоплавкий материал локально нагревается до температуры, превышающей температуру его плавления, и выполняет роль припоя.

### **Способы пайки по источнику нагрева**

*Пайка в печи.* Ее применение в производстве объясняется следующими факторами.

1. Высокой производительностью, которая обеспечивается возможностью пайки сложных изделий одновременно в нескольких местах или пайки большого числа однотипных изделий, загруженных в печь с помощью конвейера или других средств механизации.

2. Высокой стабильностью качества паяного соединения из-за возможности точного контроля температурных режимов пайки на любой стадии технологического процесса, а также создания контролируемой атмосферы при пайке (вакуум, восстановительная, инертная атмосфера).

3. Минимальными деформациями и остаточными напряжениями в паяных узлах в связи с равномерным нагревом и охлаждением их в процессе пайки.

Для пайки применяют печи с подогревом электросопротивлением, индукционные, газопламенные. Печи могут быть с воздушной атмосферой, контролируемой атмосферой (заполненные водородом, смесью водорода с азотом или оксидом углерода, диссоциированным аммиаком) или вакуумные.

В ряде случаев более целесообразно создавать контролируемую атмосферу не во всем объеме печи, а в специальных контейнерах.

*Индукционная пайка* дает возможность осуществлять локальный нагрев, обеспечивая большую скорость нагрева места пайки и, следовательно, высокую производительность (это ее основное отличие от других типов пайки). Процесс индукционной пайки легко поддается автоматизации, а установки для нее без особых трудностей встраиваются в автоматизированные линии. Индукционный нагрев может производиться в любой атмосфере, в том числе в вакууме.

От лампового или машинного генератора ток высокой частоты подводится к охлаждаемому индуктору. В паяемой детали под воздействием переменного магнитного поля, образованного током, проходящим по индуктору, возникают мощные вихревые токи, разогревающие ее до необходимой температуры. Нагрев определяется мощностью генератора, расстоянием от индуктора по детали, а его глубина – частотой тока.

Некоторые типы индукторов приведены на рис. 3.1. Наряду с перечисленными ранее преимуществами индукционный нагрев имеет ряд недостатков. Это, прежде всего, наличие деформаций и напряжений вследствие неравномерного нагрева при пайке, определенные трудности контроля за температурным режимом из-за высокой скорости нагрева, ограниченные возможности пайки крупногабаритных изделий, а также деталей сложной конфигурации.

*Пайка электросопротивлением* (рис. 3.2). Как видно из рисунка при этом методе пайки можно использовать машины для контактной сварки (рис. 3.2, а) и сварочные трансформаторы (рис. 3.2, б). В обоих случаях на-

грев осуществляется в результате выделения теплоты в месте контакта между деталями, где величина сопротивления максимальна.

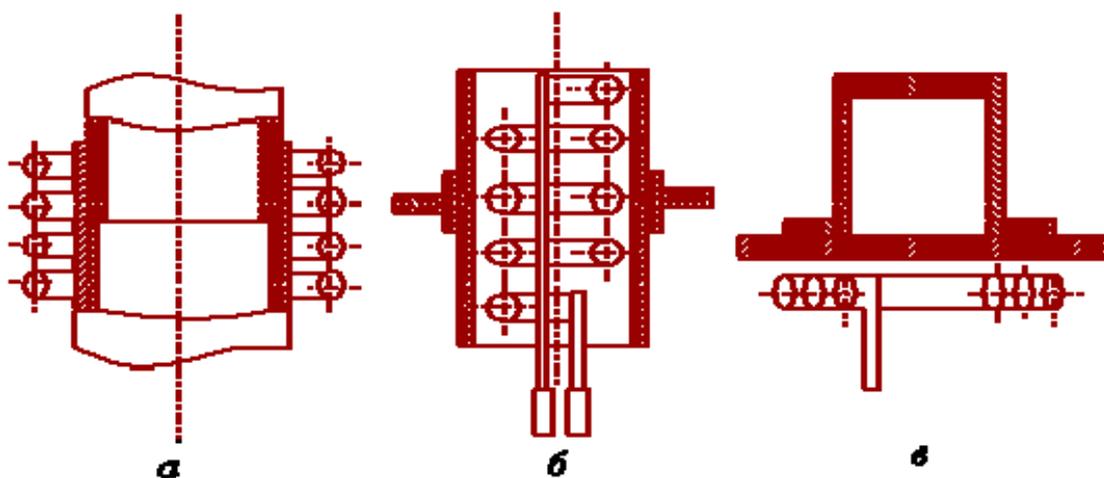


Рис. 3.1. Типы индукторов: *а* – наружный; *б* – внутренний; *в* – плоский

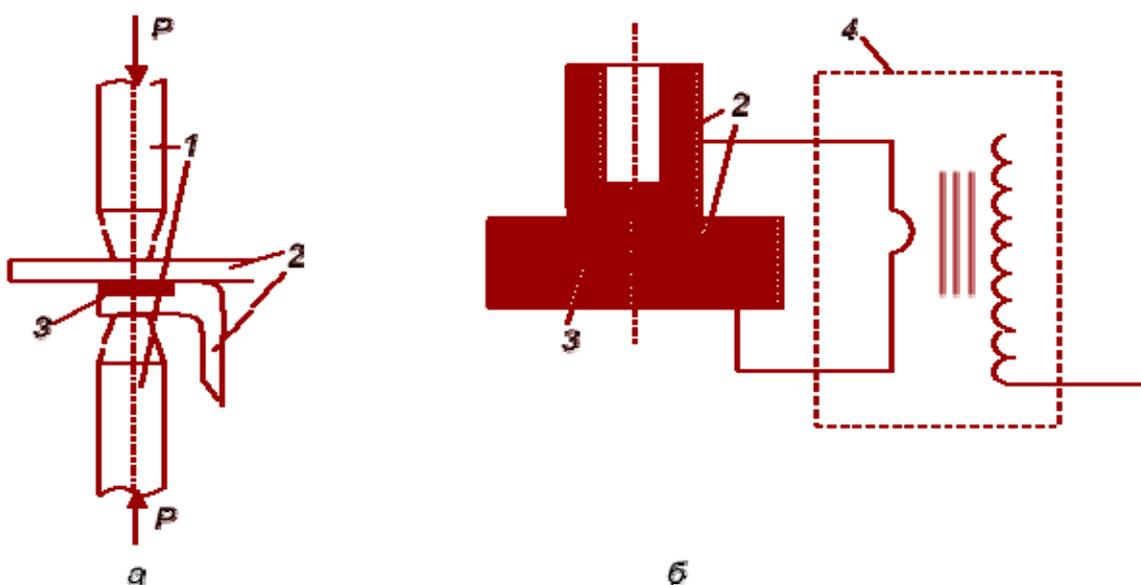


Рис. 3.2. Схема нагрева пайки методом электросопротивления:  
*а* – на контактных машинах; *б* – с использованием сварочных трансформаторов;  
 1 – электроды; 2 – детали; 3 – припой; 4 – трансформатор

Припой, размещенный между деталями в виде фольги или нанесенный предварительно на паяемые поверхности, плавится при нагреве, образуя паяное соединение. К пайке электросопротивлением относится пайка с нагревом только одного электрода, теплота от которого передается за счет теплопроводности через деталь к месту расположения припоя. Этот метод нагрева применяется для пайки деталей малых толщин, в основном при изготовлении изделий электронной техники.

*Электролитная пайка.* Электролитная пайка (рис. 3.3) осуществляется при контакте паяемых деталей с водным электролитом, через который пропускается постоянный электрический ток. В качестве электролита используются 10...15 процентные растворы  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Электрический ток, проходя через электролит, разлагает его. Выделившийся на стенках паяемых деталей водород увеличивает сопротивление прилегающего к ним слоя, что вызывает нагрев деталей и правление припоя. Этот метод применяется только при пайке деталей небольших размеров.

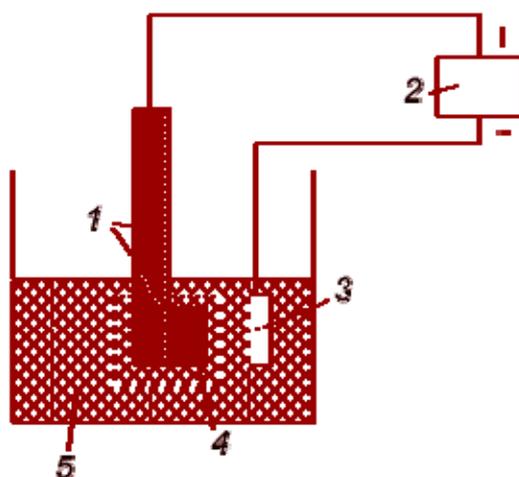


Рис. 3.3. Схема пайки в электролите:  
 1 – паяемые детали; 2 – источник тока; 3 – электрод;  
 4 – пузырьки водорода; 5 – электролит

*Пайка погружением.* Существуют две основные разновидности пайки погружением в зависимости от среды, которая используется в качестве источника нагрева: *пайка погружением в расплавленную соль* и *пайка погружением в расплавленный припой*. В обоих случаях температура жидкой ванны на 30...50 °С выше температуры плавления припоя.

Как правило, состав соляной ванны подбирается таким образом, чтобы соли являлись флюсом для паяемого металла. Поэтому, выполняя роль теплоносителя и флюса, расплав солей при погружении в него деталей очищает их от оксидов и обеспечивает защиту от окисления в процессе пайки.

*Пайка волной припоя.* Сущность метода состоит в том, что печатная плата, с установленными на ней ЭРИ, прямолинейно проводится через гребень волны припоя (рис. 3.4). Касаясь припоя, выводы ЭРИ запаиваются. Волна припоя остается свободной от окислов благодаря постоянному движению. Важны для качества пайки угол входа и выхода, а также форма волны припоя. Благодаря этому в основном решается вопрос, образуются или нет перемычки и сосульки припоя. На заполнение металлизированных

отверстий влияет форма волны. Форма волны регулируется благодаря геометрическому исполнению волнообразующих сопел в широких пределах.

Доказано, что благоприятным условием пайки является движение печатной платы навстречу припою. При этом угол ПП относительно волны припоя (рис. 3.4, а) выдерживается в пределах от 8 до 10 град. Слегка противотекущее зеркало припоя предотвращает образование перемычек. Вторичной волной (рис. 3.4, б), которая поддерживается несколько ниже, чем основная волна, расплавляются сосульки, так, что

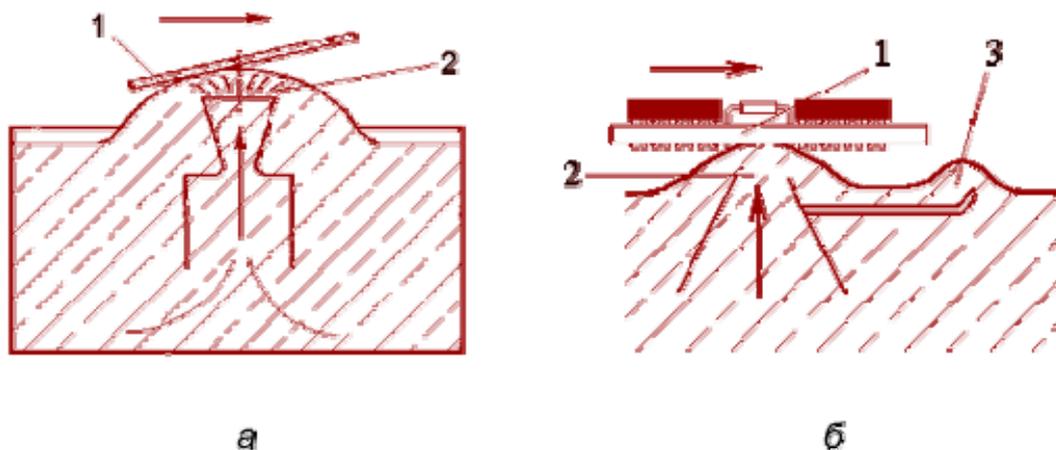


Рис. 3.4. Схема пайки волной припоя: 1 – печатный узел, 2 – волна припоя, 3 – вторичная волна припоя

паяные соединения не превышают определенной длины. Для уменьшения расхода припоя на поверхности деталей, не подлежащие пайке, наносят различные покрытия, маски из эпоксидных смол, эмалей и другие органические и минеральные покрытия.

Машины для пайки волной припоя являются комплексными нормализованными узлами, которые размещаются в конце сборочной линии. Они выполняют друг за другом следующие операции.

**Флюсование.** В этой операции наносится флюс (например, 20 % канифоли, 5 % салициловой кислоты, 75 % спирта) волной или пенным флюсованием равномерно на сторону пайки. При волновом флюсовании создается в соответствующем устройстве волна флюса высотой 10 мм, над которой проходит печатная плата. При этом флюс смачивает поверхность платы. Толщина пленки флюса не должна превышать 3...4 мкм.

**Сушка и предварительный нагрев.** После флюсования ПП слегка подогревается и частично продувается горячим воздухом. При подогреве из флюса улетучивается растворитель (температура плавления флюса выше 130 °С). После этого печатные платы подогревают для подготовки восстанавливающего действия флюса и для избежания теплового удара ПП. Температура подогрева должна быть такой, чтобы флюс снимался деревянной палочкой без образования нитей.

*Процесс пайки.* Для пайки волной припоя наилучшими являются оловяно-свинцовые припои с 60...64 % Sn. Пайка производится при температуре от 240 до 270 °С. При скорости транспортирования платы от 0,5 до 3,0 метров в минуту время пайки составляет от 1 до 7 с.

*Последующая обработка. Охлаждение.* Последующая обработка включает процессы отмывки и очистки платы. Остатки флюса в большинстве своем не нуждаются в удалении, так как применяются флюсы, которые не вызывают коррозии. Внезапного охлаждения нужно избегать, так как из-за различного температурного коэффициента линейного расширения диэлектрического основания платы и металлической фазы (медь, припой) могут образоваться трещины.

*Визуальный контроль.* Осмотр является важной операцией для соблюдения определенных параметров метода пайки волной припоя. Скопление характерных дефектов (перемычки, сосульки, несмачиваемые места) должно приводить к немедленной перепроверке и дорегулировке определенных регулируемых технологических параметров. Рентабельность машинной пайки измеряется процентом последующей допайки, который не должен превосходить 1 % паяных соединений.

Качественные паяные соединения имеют всесторонний замкнутый конус припоя, в котором невооруженным глазом отчетливо просматриваются контуры выводных компонентов. Припой на выводах должен просматриваться на всей поверхности и быть гладким. При нормальном зрении контролера на расстоянии до 25 см не должны быть заметны поры и раковины.

*Пайка световыми лучами.* При пайке световым лучом с помощью ламп обеспечивается нагрев с малой тепловой инерционностью. Так, для кварцевой лампы время достижения номинального энергетического потока с момента ее включения составляет 0,6 с. Достоинством нагрева световыми лучами является бесконтактный подвод энергии, в том числе через оптически прозрачные стенки. С их помощью можно паять на воздухе, в инертной среде, вакууме, а также нагревать магнитные и немагнитные материалы, в широких пределах регулировать температуру нагрева, визуально наблюдать за процессом пайки. В зависимости от типа лампы, ее мощности, подводимого к ней напряжения может быть получена температура от 1980 до 2930 °С.

*Электронно-лучевая пайка.* Электронно-лучевой нагрев применяется для локальной пайки, в том числе импульсной, пайки изделий электронной и радиотехнической промышленности, пайки деталей из тугоплавких металлов. Высокая концентрация электронного пучка существенно сокращает время нагрева и плавления припоя, что особенно важно при пайке чувствительных к нагреву тугоплавких металлов. Пайка может производиться как неподвижным сфокусированным лучом, так и сканирующим (совер-

шающим, например, поперечные колебания). В качестве примера можно назвать пайку электронным лучом электрических выводов к контактным площадкам пленочных микросхем.

Электронно-лучевой нагрев эффективен при пайке металлокерамических узлов, сильфонных конструкций.

*Лазерная пайка.* Нагрев паемых деталей с помощью лазера является весьма перспективным, особенно при пайке микроминиатюрных деталей контактов и т. п. Лазерный нагрев в определенном отношении более универсален, чем электронно-лучевой: световой луч свободно проходит сквозь прозрачные преграды, не требуется электрического контакта с деталью, пайка возможна не только в вакууме, но и на воздухе или в защитной атмосфере. Высокая удельная тепловая мощность лазерного луча способствует испарению с поверхности припоя и основного металла оксидных пленок, что улучшает процесс пайки.

*Газопламенная пайка.* Для высокотемпературной пайки могут применяться газовые горелки, в которых тепловая энергия образуется в результате сгорания какого-либо горючего газа, например ацетилена  $C_2H_2$ , в струе кислорода.

*Инфракрасная (ИК) пайка.* При этом методе для нагрева припоя применяются инфракрасные лучи, которые будучи соответствующим образом сфокусированы воздействуют на место пайки (рис. 3.5). Этот метод применяют для пайки облуженных выводов ЭРИ с облуженной печатной платой тогда, когда пайка волной припоя затруднена или невозможна.

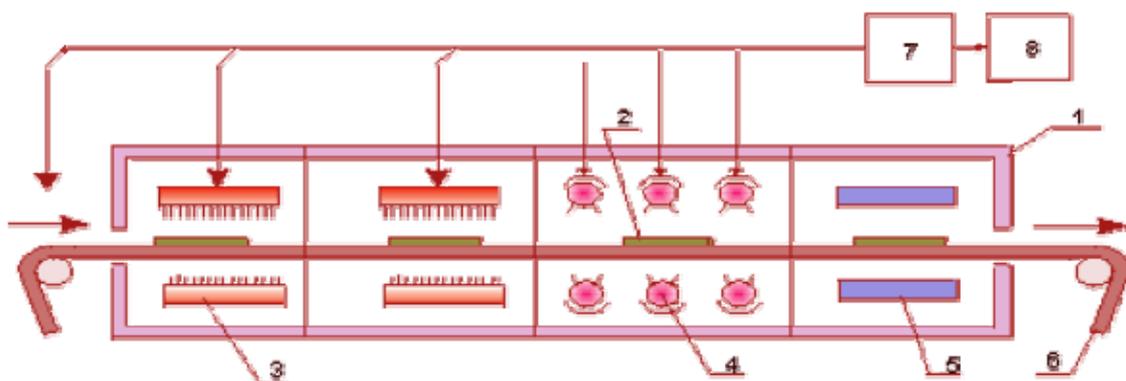


Рис. 3.5. Схема установки пайки инфракрасным излучением:

1 – корпус, 2 – печатная плата, 3 – плоские инфракрасные (ИК) нагреватели (панели), 4 – кварцевые инфракрасные (ИК) лампы, 5 – охладитель, 6 – лента конвейера, 7 – микропроцессор, 8 – дисплей

Преимущества ИК пайки по сравнению с пайкой волной припоя следующие:

- каждая пайка получает дозированное количество припоя (экономичная пайка);
- не образуются перемычки;
- применение печатных плат любого размера;
- невысокая стоимость оборудования.

Недостатком ИК пайки является слабое действие флюса.

*Пайка в парогазовой фазе.* Технология пайки поверхностно монтируемых компонентов расплавлением дозированного припоя в парогазовой фазе (ПГФ) появилась в 1973 г., когда фирма Du-Pont разработала и запатентовала специальные жидкие материалы. В течение нескольких лет Western-Electric была единственной фирмой, пользовавшейся преимуществами этой новой разработки. В 1975 г. фирма ЗМ предложила новые материалы для пайки в ПГФ, а один из изготовителей оборудования для пайки (фирма НТС) стал ведущим поставщиком систем пайки в ПГФ. С 1983 г. основным конкурентом пайки в ПГФ стала пайка расплавлением дозированного припоя с помощью инфракрасного нагрева (ИК- пайка). Схематическое представление пайки в парогазовой фазе с использованием одной технологической среды приведено на рис. 3.6.

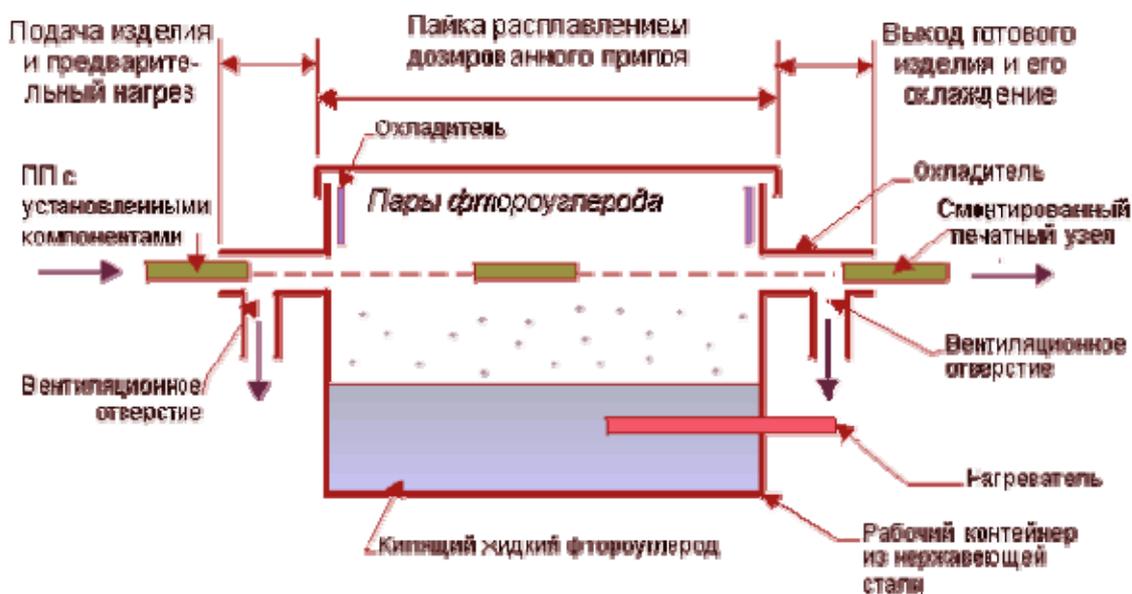


Рис. 3.6. Схематическое представление пайки в парогазовой фазе с использованием одной технологической среды (Источник: фирма Texas Instruments)

*Плазменная пайка.* При использовании плазменных горелок пайка осуществляется плазмой, образуемой в плазматроне. Плазменная горелка позволяет за счет изменения силы тока, диаметра сопла регулировать в широких пределах как общее количество вводимой в детали теплоты, так и величину поверхности нагрева.

*Пайка паяльником.* С помощью паяльников производится пайка низкотемпературными припоями. Перенос теплоты в зону пайки осуществляется вследствие контакта рабочей части паяльника с паяемыми поверхностями.

Существует большое разнообразие паяльников, которые различаются способом нагрева, мощностью, формой. Они могут быть с периодическим

и постоянным нагревом. Паяльники с периодическим нагревом по мере их охлаждения подогреваются от постоянного источника теплоты (пламени, электрической дуги). Аккумулированная их массивной медной рабочей частью теплота расходуется на расплавление припоя и нагрев паяемых деталей. Обычно такие паяльники применяются при пайке и лужении крупногабаритных и массивных деталей.

Для бесфлюсового лужения алюминиевых сплавов, не содержащих магния, применяют специальный прибор, названный ультразвуковым паяльником (рис. 3.7), который имеет магнестриктор 6, излучающий колебания, передающиеся наконечнику 5. Возбуждаемые в расплавленном припое колеблющимся наконечником кавитационные пузырьки 4 эффективно разрушают оксидные пленки 3. Обмотка магнестриктора подключается к высокочастотному генератору 1, дающему импульсы с частотой 15...20 кГц. Наконечник нагревается спиралью 2, через которую пропускается электрический ток. При лужении наконечник должен располагаться как можно ближе к поверхности детали, но не касаться ее. Наконечник паяльника изготавливается из стойкого к кавитационному разрушению серебряно-никелевого сплава.

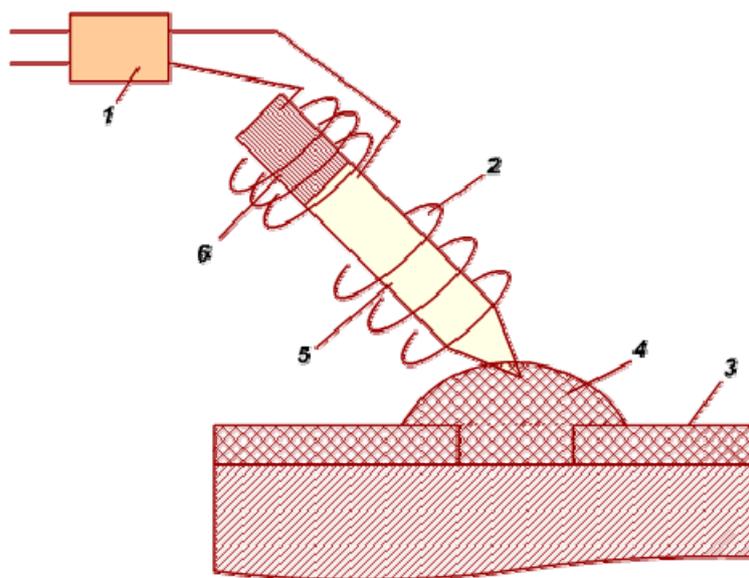


Рис. 3.7. Схема ультразвукового паяльника

Облуженные с помощью ультразвука детали можно паять обычным электрическим паяльником, без флюса, с применением оловянно-цинковых или оловянно-свинцовых припоев.

### 3.2. Подготовка поверхностей

Качество выполнения паяного соединения во многом зависит от тщательности подготовки соединяемых поверхностей. Для получения прочного соединения необходима хорошая смачиваемость поверхностей флюсами

и припоями, которая зависит как от свойств материалов, так и от наличия на соединяемых поверхностях оксидов, органических загрязнений, остатков абразивных частиц других инородных материалов.

Способы предварительной очистки паемых поверхностей можно разделить на две группы: механические, предусматривающие механическое удаление поверхностного слоя металла, химические, предусматривающие как удаление поверхностного слоя металла травлением, так и отмывку поверхности от загрязнений. При сильном загрязнении поверхностей, подлежащих пайке, часто применяют сочетание механической и химической очистки.

**Механическая очистка поверхностей.** Удаление поверхностного слоя металла с помощью острого инструмента типа ножа, скребка, шабера и т. п. применяют в индивидуальном производстве при малых площадях, соединяемых поверхностей с последующим контролем качества по характерному металлическому блеску обработанных поверхностей.

Высокопроизводительную гидроабразивную обработку поверхностей, например ПП, осуществляют путем подачи гидроабразивной пульпы через сопла при давлении 0,4...0,8 МПа. Однако при обработке мягких материалов есть опасность внедрения в их поверхность частиц абразива, которые ухудшают смачиваемость поверхностей. Для устранения этого явления рекомендуется проведение последующего подтравливания поверхности с целью удаления внедрившихся абразивных зерен.

Шлифовка поверхностей абразивными пастами на основе пемзы, венской извести и т. д., взвешенными в различных растворах, также не исключает внедрения частиц в мягкие металлы и требует последующей химической обработки.

Сухая или мокрая очистка поверхностей с помощью вращающихся или осциллирующих щеток из синтетического материала с введенными в его состав абразивными частицами является наиболее эффективным и производительным процессом, практически исключаящим внедрение абразива в поверхность металла.

Окончательная отделка (аппретирование) поверхностей проволочными или жесткими нейлоновыми щетками с воздействием растворов, смачивающих и удаляющих предыдущие загрязнения, гарантирует отсутствие абразивных частиц и часто применяется для подготовки поверхности ПП.

**Химическая очистка поверхностей.** Травление подготавливаемых поверхностей производят в растворах кислот, которые должны удалить тонкий слой металла, не затрагивая его основной массы и не разрушая других материалов, например диэлектрика ПП. Состав растворов зависит от вида металла, а концентрация кислот в воде определяется необходимой скоростью травления при заданной температуре раствора. После операции травления поверхности должны быть тщательно промыты, желательнее с воздействием ультразвуковых колебаний. Отметим также, что некоторые виды флюсов оказывают слабое травящее воздействие на спаиваемые поверхности.

Отмывку поверхностей от органических веществ (жировых пятен, смазки, краски и т. п.) производят органическими растворителями типа спиртов, спиртобензиновых и спиртофреоновых смесей путем окунания, струйной или ультразвуковой промывки.

**Предварительное облуживание поверхностей.** Для подготовки поверхностей под пайку в серийном производстве, как правило, осуществляют их предварительное облуживание. При использовании защитного, гальванически осажденного металлорезиста олово – свинец на печатных платах практикуют его оплавление. Выводы навесных элементов, монтируемых на платах, после их формовки и обрезки облуживают перед межоперационным хранением (некоторые ЭРЭ поставляются с облуженными выводами). При предварительной подготовке монтажных проводов, кабелей, жгутов производят облуживание участков проводов, предназначенных для последующей пайки.

Элементы контактных соединений должны быть облужены по всей заданной поверхности. Поверхность припоя при этом должна быть сплошной, без трещин, пор, грубозернистости, посторонних и крупных игольчатых включений, наплывов высотой более 0,3 мм и острых выступов в виде сосулков и перемычек. Слой припоя на облуженных элементах должен иметь глянцевую или светлую матовую поверхность. Толщина его после дозированного лужения должна быть в пределах 0,1...0,3 мм. Медные нелуженые монтажные провода и жилы кабелей облуживают припоем с применением сухой канифоли. Их луженая поверхность не должна иметь избытка припоя.

Во избежание охрупчивания паяных соединений вследствие образования интерметаллидов или разупрочнения паяных швов из-за миграции золота обязательному предварительному облуживанию должны быть под-

вергнуты золоченые поверхности выводов микросхем, высокочастотных и штепсельных разъемов и тому подобных элементов.

**Консервация подготовленных поверхностей.** Для сохранения паяемости во время межоперационного хранения подготовленные поверхности подвергаются консервации путем нанесения специальных защитных покрытий, большинство из которых не удаляется при пайке и служит защитой от загрязнений и воздействия рук в процессе сборки.

Такие покрытия не создают препятствий для взаимодействия между флюсами и паяемыми металлами, поскольку их состав согласуется с составом применяемого флюса.

Используют два вида консервирующих покрытий: 1) ацетоно-канифольные или спиртоканифольные для последующего применения канифольных флюсов; 2) конверсионные, представляющие собой пленки, образуемые из основных металлов, для последующего применения кислотных флюсов. Многие из этих покрытий вытесняют влагу, и их можно наносить на влажные, не успевшие окислиться, изделия путем погружения в раствор, а также с помощью пульверизатора или кисти. После испарения растворителя на поверхности образуется плотная защитная пленка, исключая последующее проникновение влаги. Законсервированные таким образом ПП можно хранить не менее 6 месяцев; после повторного контроля паяемости срок хранения их может быть продлен.

**Проверка подготовленных поверхностей на паяемость.** Контроль подготовленных поверхностей на паяемость определяет их пригодность для пайки. В промышленности существует большое количество методов контроля на паяемость различных типов деталей. Они основаны на оценке качества и времени смачивания в системе металл–флюс–припой.

Простейший контроль паяемости выводов навесных элементов или подготовленных к пайке концов проводов осуществляют путем опускания образца во флюс и затем в расплавленный припой на заданное время с последующей оценкой площади облуживания поверхности, контактировавшей с припоем. При этом должно облудиться не менее 95 % этой поверхности.

Критериями оценки качества паяемости монтажных отверстий ПП являются время и качество смачивания поверхности отверстий, при прохождении через них расплавленного припоя при погружении (с заданной скоростью) в ванну с припоем образца ПП или пропускании шарика расплавленного припоя сквозь подготовленные к пайке отверстия.

Паяемость плоских поверхностей может быть оценена по степени и скорости растекания капли припоя по подготовленной и нагретой до заданной температуры поверхности. Коэффициент растекания  $K_p$  характеризуется отношением площади  $S_p$ , занимаемой припоем после расплавления и растекания, к площади  $S_0$ , занимаемой дозой припоя в исходном состоя-

нии:  $K_p = \frac{S_p}{S_0}$ . Паяемость считается удовлетворительной, если  $K_p \geq 0,9$ , а

высота расплавленной капли припоя  $0,6 \text{ мм} \geq H$  (рис. 3.8). Оценку качества паяемости цилиндрических поверхностей на плоскости производят по значению угла смачивания (рис. 3.9), который должен быть  $30^\circ \geq \alpha$ .

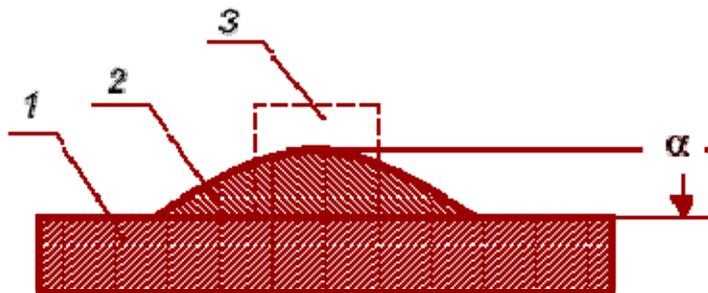


Рис. 3.8. К определению коэффициента растекания:  
1 – образец; 2 – припой после растекания; 3 – доза припоя

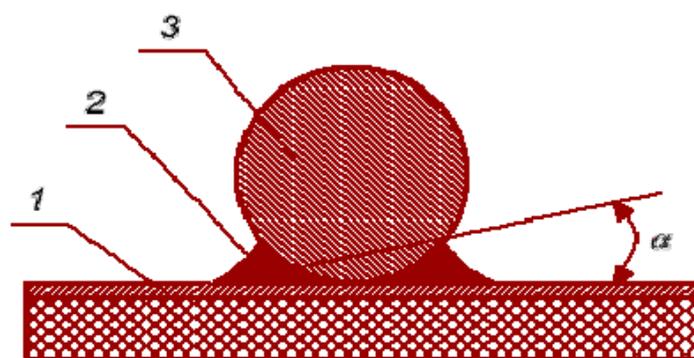


Рис. 3.9. К определению угла смачивания  $\alpha$ :  
1 – образец; 2 – припой; 3 – проволока

### 3.3. Флюсы для пайки

Флюсы служат для устранения пленки оксидов с поверхностей металлов и припоя при пайке, защиты поверхности металлов и припоя от окисления в процессе пайки и уменьшения сил поверхностного натяжения расплавленного припоя на границе металл–припой–флюс. Правильный выбор флюса обеспечивает качественное соединение и существенно влияет на скорость и степень завершенности процесса пайки.

Выбранный флюс должен быть химически активен и растворять оксиды паяемых металлов, термически стабилен и выдерживать температуру пайки без испарения или разложения, проявляя химическую активность в заданном интервале температур. Флюс, хорошо смачивающий поверхности металлов, облегчает растекание припоя и легко вытесняется припоем. Правильно выбранный флюс ускоряет процесс пайки при минимально

возможных температурах (следует помнить, что для некоторых элементов ЭВА ограничены температура воздействия и время нагрева). Он должен быть безопасен в работе, иметь длительное время хранения, не вызывать коррозию паяемых металлов и припоев и, наконец, быть экономичным.

В зависимости от температурного интервала активности флюсы подразделяют на: 1) флюсы для пайки низкотемпературными припоями при температуре плавления ниже 450° С, применяемые для получения контактных соединений ЭВА; 2) флюсы для пайки высокотемпературными припоями при температуре плавления выше 450° С, применяемые для получения конструкционных соединений. Далее рассматривается в основном низкотемпературная пайка. Смолосодержащие флюсы бывают канифольные и кислотные. Применение того или иного флюса зависит от вида или покрытия паяемого металла, используемого припоя, температуры пайки (точка плавления припоя не является температурой пайки) и назначения паяемых изделий (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Марки флюсов их, состав и назначение

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припои	Область применения
Канифоль марок А, В		Медь, серебро, олово, цинк, олово-свинец, золото, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-кадмиевые, серебряные	Пайка и лужение деталей и проводников в изделиях специального назначения
ФКСп ФКЭт	Сосновая канифоль; 10...60 Этиловый спирт, 90...40			Консервация в условиях складского хранения
ФКТ	Сосновая канифоль, 10...40 Тетраброиддипситена, 0,05...0,1; Этиловый спирт, 89,95...59,9	Медь, серебро, олово, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут, золото	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутовые	Пайка и лужение контактных соединений и поверхностей в изделиях специального назначения
ФКТС	Сосновая канифоль, 15...30; Салициловая кислота, 3...3,5 Триэтаноламин, 1...1,5 Этиловый спирт, 81...65	То же, кроме золота	То же, и серебряные	То же, но при условии полного удаления остатков флюса после пайки

Продолжение табл. 3.1

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Паяемый металл или металлосоединение	Применяемые припои	Область применения
ЛТИ-120	Сосновая канифоль, 20...25 Солянокислый диэтиламин, 3...5 Триэтанолламин, 1...2 Этиловый спирт, 76...68	Сталь, медь, никель и его сплавы, олово, серебро, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, серебряные	Пайка и лужение деталей и проводников в изделиях широкого потребления
ФГСп	Солянокислый гидрозин, 2...4 Этиленгликоль, 25...50 Этиловый спирт, 73...46	Медь и её сплавы, олово, серебро, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутовые, оловянно-свинцово-кадмиевые	Пайка и лужение деталей в изделиях широкого потребления. Предварительное лужение выводов в изделиях спец. назнач.
ФТС	Салициловая кислота, 4...4,5 Триэтанолламин, 1...1,5 Этиловый спирт, 95...94	Медь, олово, серебро, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутовые	Пайка и лужение контактных соединений и поверхностей в изделиях широкого потребления
ФДГл	Солянокислый диэтиламин, 4...6 Глицерин, 96...94	То же	Оловянно-свинцовые	То же, а также групповая пайка деталей и оплавление после гальванического лужения
ФЦА	Хлористый цинк, 45,5 Хлористый аммоний 9,0 Вода, 45,5	Сталь, медь и их сплавы, никель и его сплавы	Оловянно-свинцовые, серебряные	Предварительное лужение поверхностей, удаления остатков флюса после пайки
ЖЗ-1-АП	Цилиндровое масло 52,79...81; Кремнийорганическое связующее ПФМС-6, 16...17; Олеиновая кислота, 4,9...1,8 Антиоксидант, НГ-2246, 0,1...0,2		Оловянно-свинцовые	Защита зеркала расплавленного припоя от окисления в механизированных установках для пайки

### 3.4. Припой для пайки

Припой предназначен для горячего облуживания и создания металлургического соединения деталей с помощью металла или сплава, имеющего более низкую температуру плавления, чем соединяемые им металлы. Припой должен иметь заданную температуру плавления. При этом температура пайки должна превышать температуру плавления припоя на  $20 \dots 70^\circ \text{C}$ . Для пайки контактных соединений электронных узлов электрооборудования применяют преимущественно низкотемпературные припои, температура плавления которых  $T_{\text{пл}} < 450^\circ \text{C}$ .

Припой должен легко вытеснять флюс, образуя с основными металлами соединение достаточной механической прочности, обладать заданными электрическими характеристиками, а также определенной плотностью, коэффициентом теплового расширения и антикоррозионными свойствами как в процессе пайки, так и при последующей эксплуатации изделий. Технологические требования к припою предусматривают хорошую смачиваемость им соединяемых металлов, возможность его капиллярного подъема в узких зазорах, максимально быструю кристаллизацию с переходом в твердую фазу для исключения появления трещин и пористости в паяных соединениях, возможность дозирования его в виде проволоки, шариков, таблеток и т. п.

В зависимости от назначения (табл. 3.2) припои изготавливают в виде слитков, прутков, проволоки и трубок с наполнением их флюсом. При изготовлении припоев требуется точно соблюдать их химический состав, осуществлять тщательное перемешивание компонентов, не допускать перегрева, что может привести к повышенному окислению сплава, и нарушения технологии его плавки и разлива. Припой в виде проволоки получают путем волочения отливок, а трубчатый флюсоисполненный припой – путем шприцевания с одновременным наполнением трубки флюсом.

### 3.5. Технология пайки

Процесс пайки контактных соединений включает в себя: а) фиксацию соединяемых элементов с предварительно подготовленными поверхностями пайки; б) нагрев поверхностей пайки до заданной температуры в течение ограниченного времени; в) введение в зону пайки флюса и припоя в необходимых и достаточных для пайки дозах; г) расплавление припоя с максимальным смачиванием им поверхностей пайки; д) остывание припоя в условиях, исключающих взаимное перемещение спаиваемых поверхностей.

Таблица 3.2

## Марки припоев, их состав и назначение

Марка припоя	Составляющие припоя и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Температура плавления °С	Область применения
ПОС-40	Олово, 39...41 Свинец, 61...59	Медь, никель и их сплавы, ковар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183...238	Пайка и лужение деталей и монтажных проводов, жгутов, наконечников, проходных стеклянных изоляторов
ПОС-61	Олово, 60...62 Свинец, 40...38	То же	183...190	Пайка и лужение выводов ИМС и ЭРЭ, ПП, микропроводов, плёночных покрытий, работающих при температуре не выше 100 °С
ПОСК5 0-18	Олово, 49...51 Кадмий, 17...19 Свинец – остальное		142...145	Пайка и лужение ЭВА, керамических изоляторов, конденсаторов, проводов и т. д., не допускающих нагрев выше 180 °С
Марка припоя	Составляющие припоя и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Температура плавления °С	Область применения
ПОС-Су61-0,5	Олово, 60...62 Сурьма, 0,2...0,5 Свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы, ковар, сталь, цинк, серебро, металлические и неметаллические материалы	183...189	Пайка и лужение ЭВА, ПП, контактных соединений, реле, трансформаторов, дросселей
ПОС-Су40-2	Олово, 39...41 Сурьма, 1,5...2 Свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы, сталь, серебро, кадмий	185...255	Пайка и лужение корпусов, каркасов, припайка заземляющих проводов к экранирующей оплётке
ПЗл М37В	Золото, 37,1...37,9 Бор, 0,1...0,3 Медь – остальное	Керамика, медь	990...1010	Пайка разъёмов, гермоводов, корпусов микросхем и др. деталей конструктивных узлов

Продолжение табл. 3.2

Марка припоя	Составляющие припоя и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Температура плавления °С	Область применения
ПСр2,5	Олово, 5...6 Серебро, 2,2...2,8 Свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы, неметаллы с напылённым, химическим или гальваническим покрытием, палладий	295...305	Пайка и лужение потенциометров, резисторов, разъёмов и т. п., работающих при температуре 150...260 °С. исправление дефектов в узлах, подвергающихся серебрению
ПСрОС 3,5-95	Свинец, 0,8...1,3 Серебро, 3,1...3,5 Олово – остальное	То же	220...225	Пайка и лужение монтажных элементов изделий узлов ЭВА (соединение допускает электролитическое покрытие)
ПГМ-65	Медь, 34...36 Галий, 64...66	Медь, никель, неметаллы с покрытием медью, никелем, серебром, золотом	200	Бесфлюсовая пайка микросхем и навесных элементов к ПП
ПСр-40	Серебро, 39...41 Медь, 16,4...17,4 Никель, 0,3 Цинк, 16,6...17,8	Медь и её сплавы, сталь, медные провода в стеклянной изоляции	595...805	Пайка трансформаторов, разъёмов, малогабаритных электромашин и деталей ЭВА, работающих при температуре 500...700 °С

Фиксация при пайке контактных соединений должна обеспечить их правильное взаимное расположение, необходимые зазоры между деталями для проникновения в них флюса и припоя и исключить смещение деталей в процессе пайки и затвердевания припоя. Наиболее простой способ фиксации, применяемый в макетном и единичном производстве, – прижатие деталей друг к другу с помощью пинцета или подобного инструмента. Более надежные и производительные способы фиксации определяются конструкцией паяного соединения и осуществляются, например, скручиванием проводников, намоткой провода на элемент типа штифта, размещением и закреплением проводов или выводов навесных элементов в отверстиях и т. д. При использовании автоматизированных, механизированных или

групповых способов пайки применяют способы фиксации деталей с помощью вспомогательных элементов, таких, как специальные гнезда для деталей, технологические рамки и т. д. В этом случае вспомогательные элементы не должны закрывать зону пайки и создавать слишком большой теплоотвод, препятствующий нагреву спаиваемых поверхностей до заданной температуры.

При проведении процесса пайки важно выдерживать необходимую температуру пайки. Пониженная температура приводит к недостаточной жидкотекучести припоя и плохому смачиванию соединяемых поверхностей, следствием чего может быть отсутствие галтели или конуса припоя, а также дефект типа «холодная пайка». Значительное увеличение температуры пайки вызывает обугливание флюса до активации им поверхностей спаиваемых, а также избыточное нанесение припоя на соединяемые поверхности. Оптимальная температура пайки  $T_{\text{п}}$  зависит от температуры начала кристаллизации припоя  $T_{\text{к}}$ :  $T_{\text{п}} = T_{\text{к}} + (40 \div 80)^{\circ}\text{C}$ .

В зависимости от теплоемкости соединения выбирают мощность паяльника, которая должна обеспечить нагрев спаиваемых поверхностей в заданное время. Следует учитывать, что многие ИМС и ЭРЭ нельзя нагревать выше определенной температуры и превышать заданное время воздействия этой температуры. При правильно подобранной мощности паяльника падение температуры его рабочего стержня не должно быть более  $20 \dots 40^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, температура кончика рабочего стержня паяльника  $T_{\text{с}} = T_{\text{п}} + (20 \div 40)^{\circ}\text{C}$ . В процессе пайки эта температура должна контролироваться с помощью термопары и при необходимости регулироваться напряжением, подаваемым в рабочую обмотку паяльника автотрансформатором. В промышленности применяют также паяльники с встроенной термопарой и системой автоматического регулирования температуры. Правильно подобранная мощность паяльника и температура его рабочего стержня позволяют производить качественную пайку контактных соединений в течение  $2 \dots 6$  с.

Для предотвращения перегрева чувствительных к нагреву элементов применяют местные теплоотводы, простейшими видами которых являются инструменты, используемые при ручном монтаже (пинцеты, плоскогубцы и т. п.). Теплоотводы можно снимать не ранее чем через 5 с после пайки. Для вторичной установки элементов теплоотводы следует менять или охлаждать. При необходимости ступенчатой пайки соединений, расположенных в непосредственной близости друг от друга, конструкции теплоотводов должны, обеспечивать достаточное охлаждение каждого предыдущего соединения.

Флюсы должны наноситься на соединяемые поверхности в минимальном количестве, обеспечивающем смачивание спаиваемых поверхностей.

На монтажные элементы проводов и кабелей флюс следует наносить на расстоянии 2...3 мм от торца изоляции.

Качественные паяные соединения должны быть с вогнутыми галтелями припоя по шву и без избытка припоя, т. е. иметь скелетную форму, позволяющую визуально просматривать через тонкие слои припоя контуры входящих в соединение отдельных монтажных элементов (рис. 3.10, рис. 3.11, *а, в*; рис. 3.12, *а, б*; рис. 3.13, *а, в*). Поверхность галтелей должна быть сплошной, гладкой, глянцевой или матовой, без темных пятен и посторонних включений. Паяные соединения не должны иметь трещин, крупных пор, игольчатых и дендритных образований, крупнозернистости, выпуклых галтелей (рис. 3.14), наплывов, острых выступов и перемычек припоя.

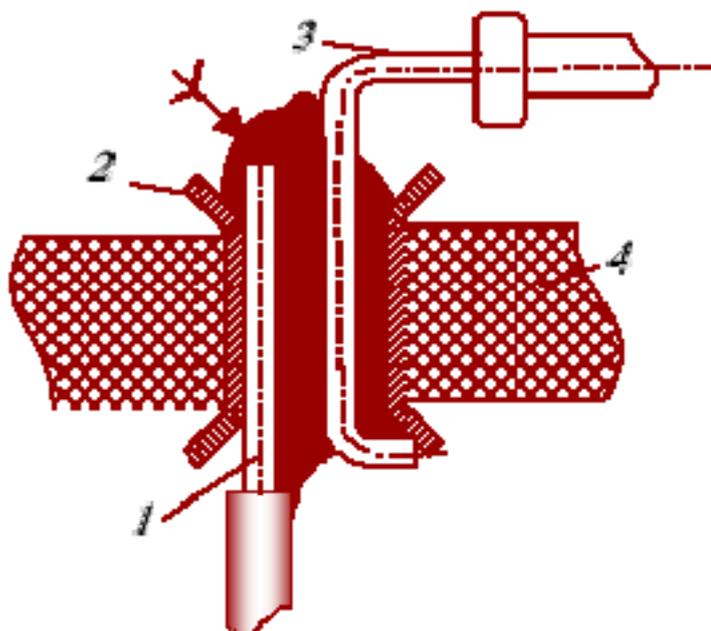


Рис. 3.10. Соединение вывода навесного элемента и провода в пустотелой заклёпке: 1 – провод; 2 – пустотелая заклёпка; 3 – вывод; 4 – панель

Пустотелые заклепки панелей и металлизированные отверстия должны быть заполнены припоем на всю высоту (рис. 3.10, 3.12, *з*). Допускается образование в отверстии вогнутого мениска (рис. 3.15, *а, в*), недопустим выпуклый мениск (рис. 3.15, *б*). Пустотелые заклепки на ПП должны иметь непрерывный паяный шов по периметру развальцовки с вогнутыми галтелями (рис. 3.12, *б, в*). Возможны: заливная пайка (рис. 3.11, *б, з*, 3.13, *б*), при которой контуры отдельных контактных соединений частично или полностью скрыты под припоем; частичное не заполнение припоем металлизированных отверстий ПП при условии, что высота заполнения их

припоем не менее  $2/3h$  (рис. 3.12, *а, в*), а также неполное заполнение припоем отверстия диаметром более 3 мм, не снижающее необходимой механической прочности.

При пайке должно быть исключено растекание припоя по проводнику за границы контактных площадок, уменьшающее предельно допустимые расстояния между соседними паяными соединениями или проводниками. В отдельных местах может отсутствовать припой на торцах выводов (рис. 3.11, *в* и рис. 3.12, *б*).

Допускается подпайка дефектных соединений с обязательным предварительным флюсованием паяного шва.

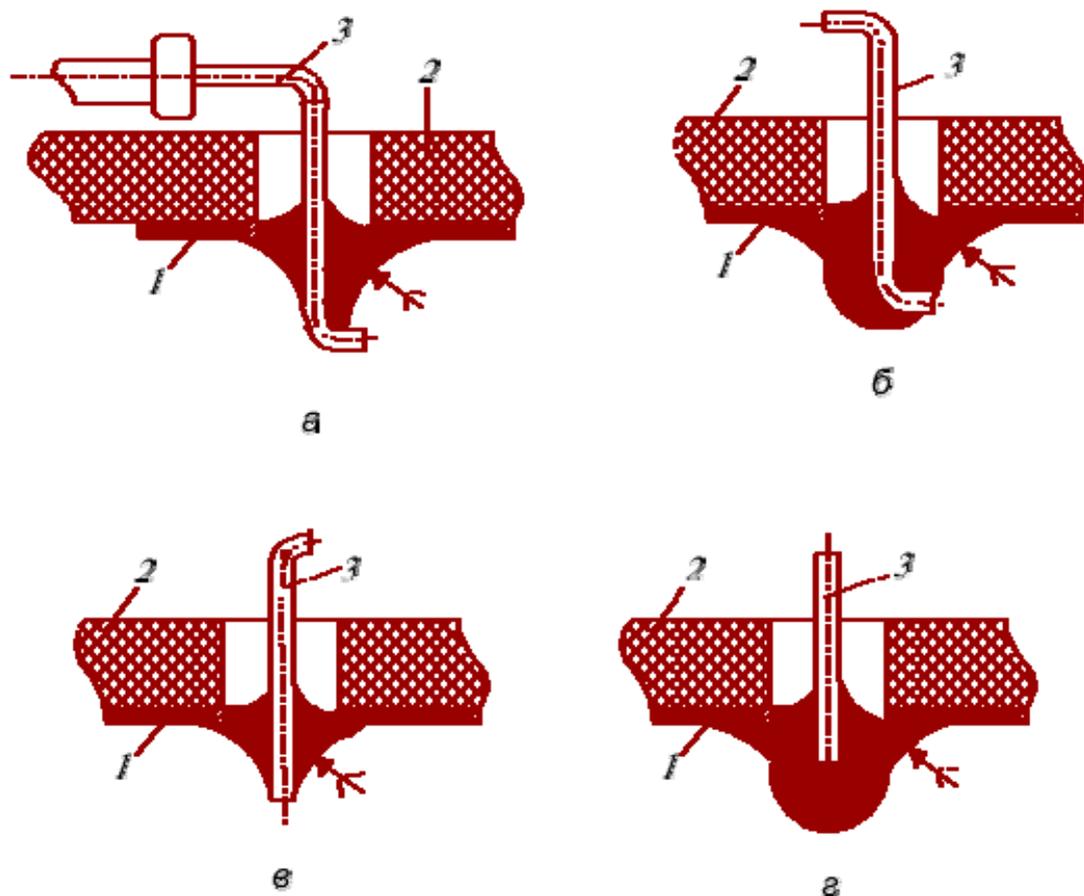


Рис. 3.11. Форма паяных соединений в неметаллизированных отверстиях ПП: 1 – контактная площадка; 2 – основание платы; 3 – вывод навесного ЭРЭ

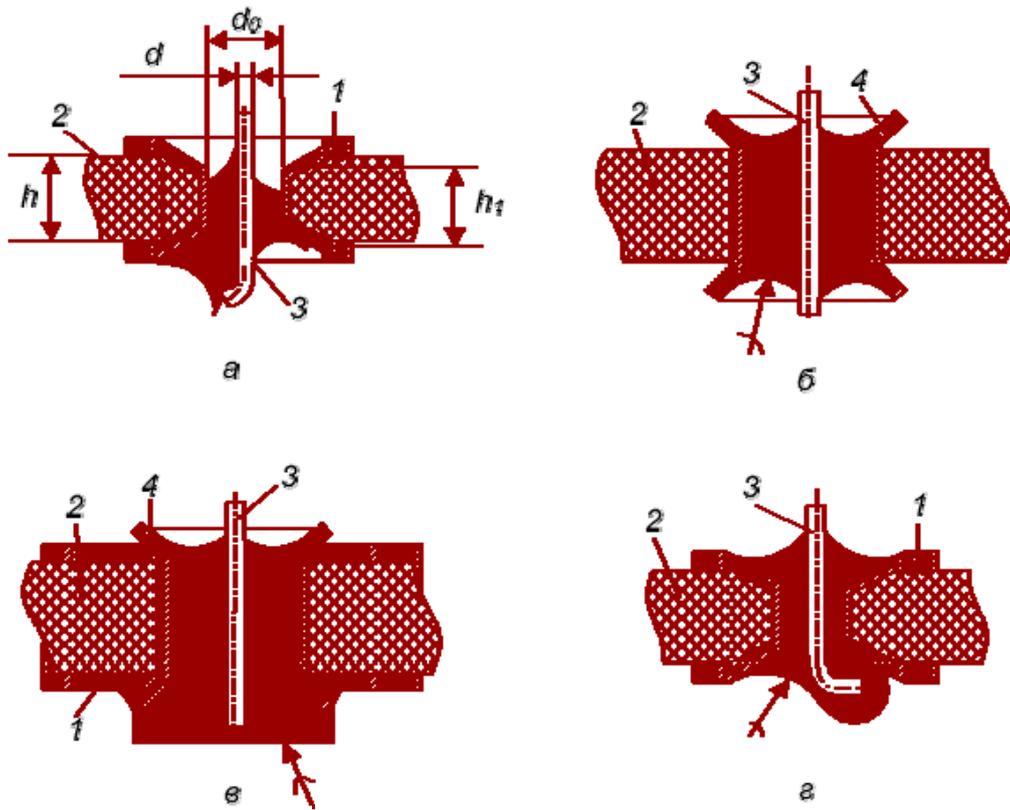


Рис. 3.12. Форма паяных соединений в металлизированных отверстиях ПП: 1 – контактная площадка; 2 – основание платы; 3 – вывод; 4 – пустотелая заклёпка

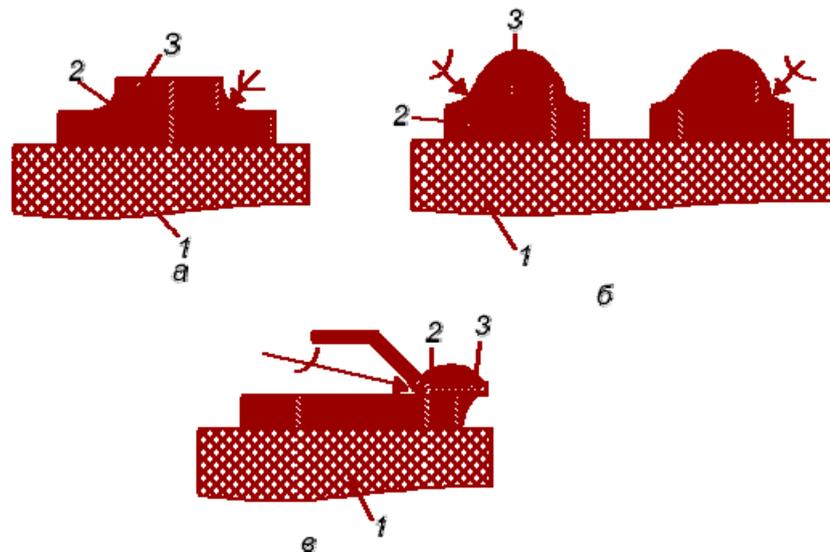


Рис. 3.13. Форма паяных соединений планарных выводов навесных элементов с контактными площадками ПП: 1 – основание платы; 2 – контактная площадка; 3 – планарный вывод

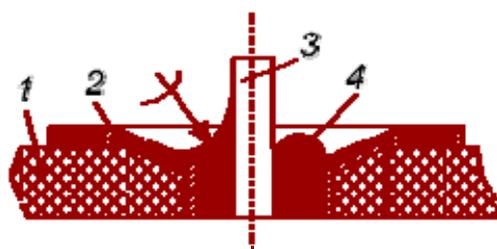


Рис. 3.14. Форма паяного соединения с исправленным дефектом:  
 1 – основание платы; 2 – контактная площадка; 3 – вывод;  
 4 – галтель паяного шва (выпуклая)

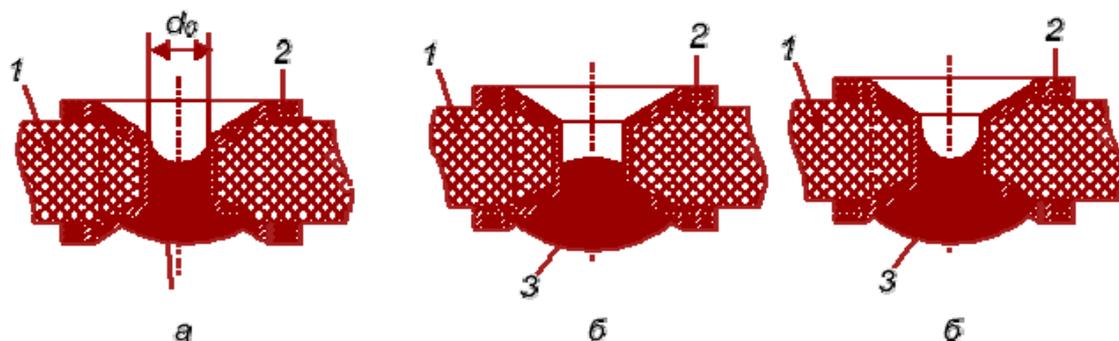


Рис. 3.15. Вид запаянных припоем монтажных отверстий:  
 1 – основание платы; 2 – контактная площадка; 3 – припой

### 3.6. Удаление флюса после пайки

После пайки необходима тщательная очистка и отмывка узлов и паяных соединений от загрязнений, способных привести к коррозии и снижению сопротивления изоляции диэлектрических материалов. Источниками загрязнений являются остатки флюсов, диспергированная ионизированная соль от активаторов флюсов и другие химические продукты процесса флюсования. Кроме того, загрязнения могут быть следствием недостаточной очистки следов предыдущих процессов обработки изделий и т. д.

Выбор способа очистки зависит от степени и характера загрязнения, а также времени межоперационного хранения собранных узлов. Обычно применяют отмывку в моющих средах различного состава по заданному режиму (табл. 3.3). При малых объемах производства печатные узлы последовательно промывают в нескольких ваннах с помощью мягких щеток или кистей. Более производительной и качественно отмывка выполняется в специальных виброустановках с частотой колебаний 50 Гц и амплитудой 1...2 мм. Еще более эффективной является ультразвуковая промывка при частоте 20...22 кГц. и амплитуде 0,5...1 мм. В больших объемах производ-

ства применяются обезжиривающие дистилляционные системы с непрерывно движущимся конвейером и синхронно действующими струйными или вибрационными промывочными устройствами. Промывка должна гарантировать отсутствие или низкое содержание загрязняющих примесей, в том числе остатков активных флюсов.

Таблица 3.3

Моющие среды, режимы и способы промывки узлов

Марка флюса	Моющая среда	Режим промывки		Способы промывки
		температура, °С	время, мин	
Канифоль А, Б, ФКСп, ФКЭт, ЛТИ-120, ФКТ	Смесь бензина и этилового спирта в соотношении 1: 1	20	0,6...1,2 в каждой ванне	<p>Последовательная промывка в трёх ваннах вручную с периодическим перемешиванием раствора и перемещением образца.</p> <p>Последовательное погружение в ультразвуковые или вибрационные ванны</p> <p>То же</p> <p>Последовательное погружение в три ультразвуковые или вибрационные ванны. Отмывка на установках 430-2 или 430-4</p>
	Трихлорэтилен	20	0,5...0,6 в каждой ванне	
	82...85 % фреона-113, 15...18 % ацетона	20	0,5 в первой и по 0,25 во второй и третьей ваннах	
ФЦА	2 %-ный раствор HCl Горячая проточная вода; 10 %-ный раствор щёлочи Горячая проточная вода	50	5...10	Погружение в ванны при промывке, протирка жесткой волосяной щёткой
		80	10...15	
		20	10...20	
		80	20...30	

Продолжение табл. 3.3

Марка флюса	Моющая среда	Режим промывки		Способы промывки
		температура, °С	время, мин	
ФКТС, ФТС	Смесь бензина и этилового спирта в соотношении 1: 1	20	0,6...1,2 в каждой ванне	Последовательное погружение в три ванны с периодическим перемешиванием раствора и перемещением образца. Протирка тампоном или кистью с последующим ополаскиванием в чистой смеси. Последовательное погружение в ультразвуковые или вибрационные ванны
ФГСп, ФДГл	Горячая проточная вода	70	5...10	Струйная промывка с последующей протиркой щетками
ЖЗ-1-АП	Смесь бензина и этилового спирта в соотношении 1 : 1	20	1,5...2 в каждой ванне	Протирка тампоном или жёсткой кистью
ФЦА	2 %-ный раствор HCl	50	5...10	Погружение в ванны при промывке, протирка жесткой волосяной щёткой
	Горячая проточная вода	80	10...15	
	10 %-ный раствор щёлочи	20	10...20	
	Горячая проточная вода	80	20...30	

### 3.7. Соединение проводящими клеящими составами

Контактные соединения получают с помощью специальных проводящих клеев (контактолов) при их ремонте, замене и монтаже навесных элементов на ПП. Способ не получил распространения в серийном производстве ввиду меньшей проводимости клеев по сравнению с чистыми металлами и недостаточной надежностью.

Клеящие составы изготавливают на основе эпоксидных смол холодного и горячего отверждения, а также на основе нитроклея. В качестве наполнителя используют мелкодисперсные (1...2 мкм) шарообразные частицы серебра, реже золота. Наполнитель составляет 65...85 % массы клеиво-

го состава. При более высоком его содержании ухудшаются клеящие свойства состава и снижается механическая прочность соединения. Время термостабилизации составов холодного отверждения составляет 20...24 часа при температуре 20...25 °С, а горячего – 10...20 минут при температуре 120...200 °С. Наличие в составе отвердителя не оказывает влияния на соединяемые металлы и на качество соединения. Температурные воздействия при сушке соединений вызывают процессы полимеризации смолы и окисления поверхности металлов, что может привести к повышению переходного сопротивления соединения.

Для получения контактных соединений применяют токопроводящие пасты – контактолы: К–1 на основе эпоксидных смол и К–2 на основе нитроклея. Контактол К–1 дает хорошие результаты при соединении преимущественно золота и серебра. Контактол К–2 менее агрессивен по отношению к металлам и в процессе полимеризации не образует окисных пленок. Он дает хорошие соединения на золоте, серебре, меди, никеле, олове. При полимеризации контактола К–2 (температура 75±5 °С, время 7 ч) между сферическими частицами серебра образуются точечные контакты с большим удельным давлением. Миграция атомов серебра обеспечивает холодную сварку частиц. Нитроклей вытесняется из зон контакта и предохраняет их от окисления и воздействия влаги. Хорошая проводимость обеспечивается большим количеством параллельных соединений, образованных точечными контактами частиц.

Технологический процесс получения контактных соединений склеиванием включает следующие операции: химическую подготовку (очистку) соединяемых поверхностей; нанесение на контактные площадки платы контактола с помощью шприца или способом сеткографии; установку на контактные площадки выводов навесных элементов с определенным усилием; нанесение на соединяемые поверхности дополнительной дозы пасты; сушка пасты. Температура сушки и время полимеризации должны быть минимальными.

Склеивание в отличие от пайки и сварки не влияет на структуру соединяемых материалов, упрощает конструкцию контактных соединений и применяется в тех случаях, когда применение других способов невозможно или недопустимо.

### **3.8. Контроль качества монтажных работ**

Монтаж ПП проверяется визуально на правильность установки номиналов и типов навесных элементов, на отсутствие пропущенных и дефектных паек, на отсутствие просечек фольги и отслаивания печатных проводников, на качество очистки платы от остатков флюса. Правильность соединений в ПП проверяют по картам и диаграммам напряжений. Печат-

ный узел после визуального контроля монтажа включается под нормальное напряжение, затем проводятся измерения напряжений между заданными точками (величины напряжений, расположение контрольных точек и тип вольтметра указывается в картах напряжений). Несоответствие измеренных напряжений указанным в карте является свидетельством наличия неисправностей в цепях или следствием отклонения сопротивлений от заданных допусков.

Проверка правильности электрических соединений по принципиальной схеме громоздка и требует высокой квалификации проверяющего, поэтому этот метод в серийном производстве не применяют. Применение полуавтоматических установок для проверки правильности монтажа устраняет субъективные ошибки и позволяет сократить число контролеров.

Конкретный перечень проверяемых параметров соединений целиком зависит от эксплуатационных требований к паяным деталям.

### **3.9. Бессвинцовые технологии монтажной пайки**

Прошло более пяти лет апробации бессвинцовых технологий монтажной пайки, технологических исследований и законодательного творчества экологов. С какими проблемами придется столкнуться отечественной электронной промышленности с продвижением бессвинцовых технологий?

Свинец – мягкий, ковкий, широко распространенный металл, задолго до нашей эры известный народам Месопотамии, Египта и других стран древнего мира. Благодаря хорошей ковкости, легкоплавкости и доступности свинца даже в те древние времена из него отливали статуэтки, предметы домашнего обихода, таблички для письма. Римляне изготавливали из свинца трубы для водоснабжения дворцов. Благодаря нулевой диффузионной константе и хорошей способности к пластической деформации свинцом опрессовывают подводные кабели, проходящие по дну океанов. Такой кабель между Европой и Америкой длиной 3750 км был проложен в 1886 г. и до сих пор не истлел. Это ли не убедительная демонстрация химической инертности металлического свинца?

По объему производства свинец занимает четвертое место среди цветных металлов после алюминия меди и цинка более 50% свинца используется в кислотных аккумуляторах. Около 20 % добываемого свинца имеет очень разнообразное применение, например:

- защитные оболочки кабелей;
- влагонепроницаемые упаковки;
- уплотнения швов и стыков труб в химической промышленности и канализации;
- футеровки реакторов;

- сейсмоустойчивые фундаменты;
- скользящие свинцово-графитовые электроды транспорта;
- графитовые сердечники карандашей;
- краски;
- шпатлевка;
- производство хрусталя;
- глазурь на гончарных изделиях и т.д.

Еще 20% добываемого свинца используется в картечи и сердечниках пуль и только около 1% в припоях. Чем же обусловлено такое внимание экологов к столь незначительному сектору применения свинца?

Да, соединения свинца ядовиты. Постоянный контакт со свинцом способствует его накоплению в организме, что ведет к разрушению нервной системы и может иметь отрицательное влияние на кровеносную систему, эндокринную систему и почки. Но основные источники загрязнения окружающей среды свинцом это:

- металлургические предприятия (более 100 тыс. в год);
- выхлопные газы бензиновых автомобилей, использующих этилированный бензин (до 200 тыс. в год);
- сточные воды промышленных предприятий (выбросы в Мировой океан порядка 500 тысяч тонн в год);
- мусор, содержащий свинец (аккумуляторы в количествах, неподдающихся учету).

При объеме добычи свинца металлического свинца в количестве 5 млн. тонн в год эти потери превышают 10%.

Свежая поверхность свинца быстро окисляется с образованием тончайшей оксидной пленки PbO, предохраняющей его от дальнейшего окисления. Кислоты не растворяют свинец, поэтому его используют в качестве нерастворимого анода в процессах электролиза. Вероятно, вследствие этого многочисленные пробы грунтовых вод вблизи городских полигонов (свалок), проведенные в 1988 г. не показали ни одного случая превышения норм содержания свинца [12].

Тем не менее, существует немало компаний (главным образом, в Японии, США) переходящих на бессвинцовую технологию. Европейский союз в феврале 2003 г. узаконил программу полного перехода на бессвинцовую технологию, начиная с июня 2006 г. С этой даты какие либо свинцовосодержащие продукты не должны ни производиться в Европе, ни ввозиться в нее. После 2006 г. под это будут подпадать все автомобили, невзирая на возраст. Вместе со свинцом вне закона объявлены ртуть, кадмий, шестивалентный хром.

В Европе и США был проведен ряд исследований, направленных поиск путей перехода от эвтектических сплавов олово-свинец к бессвинцовым припоям. Их результаты, касающиеся оценки токсичности потен-

циальных компонентов сплавов для монтажной пайки, приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Оценка токсичности потенциальных компонентов сплавов для монтажной пайки

Компонент	Степень токсичности	Оценка
Свинец	высокотоксичный	высокий риск
Кадмий	чрезвычайно токсичный	высокий риск
Сурьма	токсичный, канцероген	средний риск
Серебро	нетоксичный	нет риска
Медь	слаботоксичный	малый риск
Олово	слаботоксичный	низкий риск
Цинк	слаботоксичный	низкий риск
висмут	безвредный	низкий риск

Очевидно, что олово в будущем останется основным компонентом припоя монтажной пайки. Сплавы SnAgCu рассматриваются как наиболее перспективные. Лидирующие припои на их основе:

- в США – Sn<sub>3,9</sub>Ag<sub>0,6</sub>Cu (рекомендован NEMI – National Electronic Manufacturing Industry);
- в Европе – Sn<sub>3,8</sub>Ag<sub>0,7</sub>Cu (рекомендован Европейским Консорциумом Brite TuRam);
- в Японии – Sn<sub>3,0</sub>Ag<sub>0,5</sub>Cu (рекомендован JTIDA – Japanese Electronic Industry Development Association).

Сплавы SnAgCu плавятся при 217 °С, что на 34 °С выше, чем SnPb.

Печатные платы, компоненты, флюсы, подверженные высоким температурам пайки, испытывают большие термодинамические воздействия, которые могут провоцировать разрушения, дефекты и снижать надежность межсоединений. С увеличением температуры на 8 °С количество дефектов будет увеличиваться в два раза. Свойства бессвинцовых припоев показаны в таблице 3.5.

Более высокие температуры бессвинцовой пайки обуславливают необходимость в коренном пересмотре технологий и материалов по всей цепочке производства электронных изделий. Процесс управления бессвинцовой пайкой более труден, поскольку проходит в узких окнах (диапазонах) технологических режимов. С повышением температуры формируется шлак, отслаиваются контактные площадки, взрываются компоненты (эффект «попкорн»), возникают проблемы с оплавлением шариков BGA или столбиков SGA – компонентов. Больше внимания должно быть уделено контролю испарения флюса и охлаждения изделий, а также условиям окружающей среды (температура, влажность). Азотная среда может сущест-

венно улучшить качество пайки и этим скомпенсировать неприятности, связанные с высокими температурами бессвинцовой пайки.

### **Выбор флюсов**

Очень важно, чтобы флюс работал в широком диапазоне температур: 130...320 °С. Для бессвинцовой пайки используют флюсы на водной основе, не содержащие композиций с органическими испаряющимися компонентами. Их преимущества состоят в невоспламеняемости, меньшей интенсивности испарения, способности быть активными в широком диапазоне температур. Для продления жизни этот флюс может быть заморожен как сам по себе, так и в составе паяльных паст. Он обеспечивает высокое поверхностное натяжение припоя и способен флюсовать отверстия.

### **Материалы монтажных оснований**

Чтобы избежать проблем расслоения и коробления оснований печатных плат, их необходимо изготавливать из материалов с большей температурой стеклования ( $T_g$ ) – около 150 °С и выше. Группа материалов типа FR-4 с  $T_g = 125$  °С, обычно используемая при пайке сплавом SnPb, уже не годится для пайки сплавом SnAgCu. Особенно критично поведение материала основания в процессе горячего облуживания HASL. Материалы FR-5 и полиамидные платы могут использоваться для бессвинцовой пайки без ограничений. Дешевые материалы типа FR-1, FR-2, FR-3 с  $T_g \leq 130$  °С уже не годятся для бессвинцовой пайки.

Материалы FR-4 без галогеновых пламегасителей имеют  $T_g$  в диапазоне 130...150 °С, что приемлемо для бессвинцовой пайки. Но стоимость таких материалов более чем на 30% выше. Для снижения стоимости в состав армирующих компонентов вводят целлюлозную или стеклянную бумагу. Такие платы мягче для сверления, стенки отверстий ровнее, а расход сверл меньше, что создает им некоторые преимущества перед FR-4.

FR – огнестойчивый, FR-4 – эпоксидная смола, армированная стеклотканью, FR-1 = FR-2 – бумага с фенолформальдегидной пропиткой, FR-3 – бумага с эпоксидной пропиткой, FR-5 – полифункциональная эпоксидная смола (150...160 °С), армированная высокосортной стеклотканью.

### **Металлизация отверстий**

Пластичность медных осадков должна соотноситься с температурным расширением основания плат по толщине. Оно будет явно больше при более высоких температурах пайки бессвинцовыми припоями. Для обеспечения нагрева сквозных монтажных отверстий до более высоких температур, свойственным бессвинцовым пайкам, необходимо обеспечить соответствующую теплопроводность металлизации за счет увеличения ее толщины.

Таблица 3.5

## Свойства бессвинцовых припоев

Свойства	Лик- ви- дус (Т <sub>л</sub> )	Соли дус (Т <sub>с</sub> )	Плот- ность	По- верх- ност- ное на- пряже- ние в ес- теств. Ат- мосф (при Т <sub>п</sub> =5° С)	Поверх- ност- ное напря- жение в азо- те(при Т <sub>п</sub> =5° С)	Тепло про- вод- ность	ТКЛР	Проч- ност ь на раз- рыв	Фирма
Ед. изм.	°С	°С	Г/см <sup>3</sup>	мН/мм м	мН/мм	Вт/см· град	×10 <sup>-6</sup> град <sup>-1</sup>	МПа	
Sn(3,5...4,0) Ag(0,5...0,7) Cu	220- 225	217	7,5	–	–	–	–	48	Kester, NEMI
Sn 4,7 Ag1,7 Cu	244	217	–	–	–	–	–	–	LOWA
Sn(3,5...5,0) Ag	220- 240	221	7,4	431	493	0,33	–	58	NEMI
Sn3,5 Ag4,8 Bi	211	215	7,6	–	–	–	–	82	–
Sn3,5 Ag1,0 Bi	219	220	-	–	–	–	–	43	–
Sn58 Bi	138	138	8,75	319	349	–	–	–	–
Sn0,7 Cu	227	227	7,3	–	–	–	–	32	–
Sn0,5 Cu0,1 Ni	227	227	7,3	–	–	–	–	32	–
Sn9 Zn	199	199	7,3	518	487	0,61	–	–	NEC
Sn8 Zn3 Bi	191	198	–	–	–	–	–	–	NEC

**Покрyтия под бессвинцовую пайку**

Перечень финишных покрытий достаточно широк. Лидирующими в этом ряду покрытиями печатных плат под бессвинцовую пайку являются OSP, ENIG, ImAg и HASL с припоем SnCu.

HASL – процесс горячего облуживания плат, заключающийся в погружении их на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем.

Во время быстрой выемки их обдувают струей горячего воздуха, которая сдувает излишки припоя и выравнивает покрытие. Несмотря на эти меры, наплывы припоя остаются. Особенно много их на развитых металлических поверхностях. В последующей сборке наплывы мешают установке мелких компонентов, что ограничивает применение HASL. С точки зрения качества и исключительной способности к пайке это покрытие, безусловно, наилучшее.

Еще один существенный недостаток HASL-процесса – жесткий термудар, который испытывают платы при погружении в расплавленный припой. Чем выше температура припоя тем серьезнее проблема обеспечения надежности межсоединений. Приемлемые по качеству и относительно низкотемпературные бессвинцовые припои для HASL- процессов на сегодняшний день отсутствуют.

Покрытие OSP обеспечивает защиту медной поверхности от окисления в процессе хранения и пайки. В конце пайки этот слой, выполнив свою функцию, теряет способность обеспечивать последующие процессы пайки. В Японии это дешевое покрытие используется более 20 лет. OSP – хорошая альтернатива HASL. Но OSP имеет короткий жизненный цикл, что негативно сказывается на технологической надежности. Это покрытие не обеспечивает многократную пайку, тем более при высоких температурах. Чтобы избежать этих затруднений приходится применять азот в качестве нейтральной среды пайки.

Покрытие ENIG (~4 мкм Ni + ~ мкм Au). Это покрытие свободно от ионных загрязнений и способно к многократной пайке при высоких температурах. Тонкий слой золота защищает никель от окисления, а никель становится барьером, предотвращающий взаимную диффузию золота и меди. Характерный для покрытия ENIG дефект – черные контактные площадки, появляющиеся на поверхности из-за выделения никеля и восстановленного фосфора. Во время пайки золото растворяется в припое и обнажает плохо паяемый слой фосфора. Припой скатывается с фосфорированной поверхности, из-за чего и проявляется эффект черной контактной площадки. ENIG-покрытие чувствительно к выбору флюса, а его цена примерно на 25% выше, чем у OSP-покрытий. Преимущества ENIG: жизнеспособность более года; плоская контактная поверхность; хорошая смачиваемость припоем при правильном подборе флюса; неокисляемая поверхность нажимных и скользящих контактов.

Иммерсионное олово (ImSn) – еще одна альтернатива HASL-процессам. Существуют ограничения для применения ImSn:

- самопроизвольные нитевидные кристаллические образования (усы), которые могут приводить к короткому замыканию;

- образование интерметаллических соединений CuXSnY. При этом способность к пайке исчезает, поскольку толщина иммерсионного олова не превышает 1 мкм и CuXSnY быстро поглощает этот тонкий слой. В последнее время возможность этого явления предотвращают введением барьерного подслоя различного содержания: металлоорганика и др. Но у ImSn есть преимущества:

- низкая стоимость процесса осаждения;
- хорошая паяемость;
- плоская поверхность покрытия (в отличие от HASL);
- хорошие условия для обеспечения беспаяных соединений Press-Fit (впрессовывание штырей-хвостовиков разъемов в металлизированные отверстия плат).

### **Покрyтия компонентов**

Компоненты наиболее слабое звено в бессвинцовой пайке. Вся масса компонентов, находящихся сегодня в обращении на рынке, предназначена для пайки SnPb – припоями. Первые компоненты для бессвинцовой пайки поступили в продажу в 2000 г. Они имели следующие покрытия для пайки: SnCu, Sn и SnBi. Но для бессвинцовой пайки стандарты на покрытия до сих пор отсутствуют, поэтому фирмы, выпускающие отдельные партии компонентов для бессвинцовой пайки действуют на свой страх и риск.

Покрyтие SnPb совершенно несовместимо с бессвинцовой пайкой. Вообще, о совместимости припоев разных систем приходится говорить, когда компоненты имеют SnPb-покрyтие, а используются в бессвинцовых процессах. Такое совмещение становится источником дефектов. Это особенно относится к таким компонентам как BGA и QFP. Риск выхода паки из под контроля увеличивается и в случае, когда компоненты имеют бессвинцовые покрытия, а паяются SnPb – припоем. При этом возникает возможность расслоения пайки и разбрызгивания легкоплавкого припоя.

**Чистое олово** хорошо паяется во всем диапазоне температур. Однако его использование опасно из-за возможной рекристаллизации при температуре ниже 13 °С (оловянная чума) и образование усов. Но после пайки чистое олово перестает быть таким, и поэтому эти опасения не оправданы.

**SnBi.** Эвтектический сплав 42Sn58Bi имеет температуру плавления 138 °С. Аналогичный сплав, но содержащий 3 % висмута, плавится при температуре 215...220 °С. Эти сплавы также проявляют способность к образованию усов, и в сочетании с SnPb припоями после пайки эта опасность не исчезает.

**SnAg.** Эти сплавы проявляют хорошую паяемость и хорошие механические свойства, однако они дороги. Сплав Sn<sub>3,5</sub>Ag относительно дешев, но проявляет склонность к образованию усов. Сплав Sn<sub>5,0</sub>Ag лишен этого недостатка, но он дороже и имеет неприемлемо высокую температуру плавления.

**NiPd** были освоены фирмой Texas Instruments в 1989 г. За это время фирма продала миллионы компонентов с этими покрытиями, и не имеет нареканий.

### **Материалы корпусов компонентов**

Высокие температуры плавления пайки приводят к необходимости требовать от компонентов успешного прохождения испытаний на термоудар, который происходит при погружении в припой на 10 с при температуре 260 °С или на 5 с при температуре 280 °С. Корпуса не должны взрываться (эффект «попкорн»), деформироваться, обесцвечиваться или подплавляться. Пластмассы с высокой термостойкостью дороже прежних, используемых для SnPb-пайки, и сорбирующих влагу. Сорбированная влага при резком нагревании быстро превращается в пар. Давление пара вызывает вздутие (эффект «попкорн»), разрывы и трещины. Даже если пластмассы не растрескиваются, то они расслаиваются внутри корпуса.

Испытания компонентов на термоудар проводят в три стадии:

- предварительный нагрев для полного удаления остаточной влаги из объема корпуса;
- контролируемое увлажнение корпуса в заданных температурно-влажностных условиях;
- термоудар, имитирующий процесс пайки.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определения: электрический монтаж; контактное соединение.
2. Какими способами можно получить контактное соединение?
3. Способы пайки по удалению окисной пленки.
4. Способы пайки по кристаллизации паяного шва.
5. Способы пайки по получению припоя.
6. Способы пайки по источнику нагрева.
7. Дайте характеристику подготовительных операций перед пайкой.
8. Назовите известные Вам марки флюсов для пайки.
9. Припой для пайки. Общие требования.
10. Марки припоев и область их применения.
11. Технология пайки ЭРИ.
12. Требования к форме паяных соединений.
13. Способы удаления флюсов после пайки.

14. Сущность получения соединений проводящими клеящими составами. Область применения.
15. Сущность метода пайки волной припоя.
16. Сущность метода пайки инфракрасным излучением.
17. Сущность метода пайки в парогазовой фазе.
18. Перечислите дефекты пайки.
19. Способы контроля качества монтажа печатных плат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 423 с.; ил.
2. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов/ И.П. Бушминский, О.Ш. Даутов, А.П. Достанко и др.; Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чебдарова. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.; ил.
3. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация: Учеб. Пособие для студентов вузов специальности «Конструирование и производство ЭВА»/ В.Г. Алексеев, Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.: Высш. шк., 1984. – 392 с.; ил.
4. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры: Пер. с нем./Под ред. В.Н. Черняева. – М.: Энергия, 1980. – 464 с.; ил.
5. Опыт комплексной модернизации проектирования и производства печатных плат// Ю. Зеленюк, А. Бурмакин, И. Чернышев // САПР и графика. 1998. – Июль. – С. 17–25.
6. Разбитной С. Проектирование и обработка печатных плат в системе «Сударушка» // САПР и графика. – 1999. – Март. – С.40–41.
7. Справочник по производству печатных плат. Учебно- демонстрационный комплекс «Электронные технологии» URL. – <http://www.pcbfab.ru>, E-mail: [info@pcbfab.ru](mailto:info@pcbfab.ru).
8. Оборудование для производства печатных плат. Производственно-торговая фирма ООО «Таберу». – E-mail: [info@tabe.ru](mailto:info@tabe.ru)
9. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005.– 560 с. (Высшее образование).
10. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы.– Москва: Техносфера, 2005. – 304 с. ISBN 5–94836-026-1
11. Медведев А. Технология производства печатных плат.– Москва: Техносфера, 2005. – 360 с. ISBN 5–94836-052-0
12. Медведев А. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? Электронные компоненты, 2004. №11. с. 29 – 34.

13. Электронные компоненты, 2001. №5 с.  
 14. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник. 4-е изд., стер.– СПб.: Издательство «Лань», 2002. – (Учебники для вузов. Специальная литература).

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Глоссарий.....	5
<b>1. Основы конструирования электронных систем приборов и электрооборудования.....</b>	<b>11</b>
1.1. Основы процесса конструирования.....	11
1.2. Стандартизация конструкций РЭС.....	16
1.3. Конструкционные системы РЭС.....	20
1.4. Конструкция электронной системы как объекта производства	30
1.5. Надежность электронных узлов и электрооборудования.....	31
1.6. Факторы, влияющие на надежность.....	37
1.7. Технологичность электронных систем.....	58
Вопросы и задания для самоконтроля.....	67
<b>2. Конструкции и методы изготовления печатных плат.....</b>	<b>68</b>
2.1. Классификация ПП.....	69
2.2. Методы изготовления печатных плат.....	74
2.3. Конструктивные характеристики печатных плат.....	88
2.4. Конструкционные материалы для изготовления печатных плат.....	93
2.5. Механический метод изготовления печатных плат.....	104
Вопросы и задания для самоконтроля.....	108
<b>3. Технология электромонтажных работ. Получение контактных соединений пайкой.....</b>	<b>110</b>
3.1. Способы пайки.....	111
3.2. Подготовка поверхностей.....	124
3.3. Флюсы для пайки.....	127
3.4. Припои для пайки.....	130
3.5. Технология пайки.....	130
3.6. Удаление флюса после пайки.....	137
3.7. Соединение проводящими клеящими составами.....	139
3.8. Контроль количества монтажных работ.....	140
3.9. Бессвинцовые технологии монтажной пайки.....	141
Вопросы и задания для самоконтроля.....	148
Список литературы.....	149

Анатолий Николаевич Гормаков  
Наталья Александровна Воронина

**Конструирование и технология электронных устройств  
приборов. Печатные платы**

Учебное пособие

Научный редактор  
доктор технических наук,  
профессор

В.С. Дмитриев

Редактор

Подписано к печати 10.12. 2006. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».  
Печать RISO. Усл. печ.л. Уч.– изд. Л. Заказ № 146. Тираж 100 экз.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина,30.**