

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»

О.А. Воронина, В.А. Лобанова

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Орел 2016

УДК 658.512:621.38](075)  
ББК 30.2я7:32.85я7  
В75

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
ОГУ имени И.С. Тургенева.  
Протокол № 11 от 30.06.2016 г.

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника,  
вычислительная техника и информационная безопасность»  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

*А.В. Тютякин,*

доктор технических наук, профессор, академик РАЕН,  
заместитель начальника Управления по Орловской области филиала ФГУП  
«Радиочастотный центр ЦФО» в Центральном федеральном округе

*А.П. Фисун*

**Воронина, О.А.**

В75      Технология производства электронных средств: учебное по-  
собие / О.А. Воронина, В.А. Лобанова. – Орел: ОГУ имени  
И.С. Тургенева, 2016. – 339 с.

Пособие состоит из шести разделов, в каждом из которых представ-  
лены теоретические сведения по соответствующим модулям дисциплины  
«Технология производства электронных средств», способствующие по-  
лучению базовых знаний в области технологии производства электрон-  
ных средств и проектирования технологических процессов изготовления  
электронных средств различного функционального назначения.

В первом разделе рассмотрены основы построения технологических  
систем, во втором – моделирование и оптимизация технологических  
процессов: математических моделей технологических систем, в третьем  
и четвертом – технология изготовления деталей и печатных плат, в пятом  
– методы выполнения монтажных соединений, в шестом разделе рас-  
смотрены сущность и особенности сборки электронных средств. Каждый  
раздел заканчивается тестом для проверки знаний.

Предназначено студентам, обучающимся по направлениям 11.03.01  
«Радиотехника», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных  
средств», изучающим дисциплину «Технология производства электрон-  
ных средств».

УДК 658.512:621.38](075)  
ББК 30.2я7:32.85я7

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	5
1.1. Основные понятия технологии производства ЭС .....	5
1.2. Порядок проектирования технологических процессов .....	14
1.3. Технологическая документация .....	19
1.4. Технологичность конструкций элементов и деталей ЭС .....	28
1.5. Тест для проверки знаний .....	32
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	37
2.1. Математические модели технологических систем .....	37
2.2. Методы имитационного моделирования производства ЭС .....	42
2.3. Факторный анализ.....	51
2.4. Тест для проверки знаний .....	82
3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЭС.....	86
3.1. Методы размерной обработки изделий .....	86
3.2. Защитные покрытия.....	100
3.3. Герметизация ЭС.....	110
3.4. Тест для проверки знаний .....	117
4. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ .....	121
4.1. Элементы конструкций печатных плат .....	121
4.2. Классификация конструкций печатных плат.....	124
4.3. Методы изготовления печатных плат.....	128
4.4. Базовые материалы для изготовления печатных плат.....	142
4.5. Основные операции изготовления ПП .....	150
4.6. Технология изготовления многослойных печатных плат .....	180
4.7. Контроль и испытания печатных плат.....	199
4.8. Тест для проверки знаний .....	200
5. МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ....	205
5.1. Методы выполнения электрических соединений.....	205
5.2. Методы монтажной пайки .....	207
5.3. Сварка.....	240
5.4. Склеивание.....	253
5.5. Непаяные методы неразъемных соединений .....	255
5.6. Тест для проверки знаний .....	262
6. СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ .....	265
6.1. Принципы организации сборочного процесса.....	265
6.2. Технология монтажа в отверстия.....	272

6.3. Технология поверхностного монтажа.....	283
6.4. Теория обеспечения заданной точности выходных параметров сборочных единиц.....	309
6.5. Очистка и контроль печатных узлов после сборки и монтажа .....	319
6.6. Тест для проверки знаний .....	333
ЛИТЕРАТУРА .....	338

# 1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## 1.1. Основные понятия технологии производства ЭС

**Конструктив** – конструктивно законченная часть изделия определенного назначения (например, печатная плата, компонент, корпус блока, лицевая панель, объемный проводник, рама и др.).

Под **компоновкой** следует понимать взаимную ориентацию конструктивов ЭС относительно друг друга в ограниченном пространстве.

**Объект производства** представляет собой материальный предмет или совокупность предметов, на которые направлены действия в сфере производства (например, заготовка, подложка, а также конструктивы различной сложности) для получения готового изделия. В процессе изготовления изделия состояние объекта производства изменяется количественно и (или) качественно преимущественно на каждой стадии этого процесса.

**Деталью** следует называть конструктив, который невозможно разобрать (разъединить) на части без его повреждения (например, печатная плата, винт, резистор и др.). Деталь может быть комплектующим изделием, но самостоятельно не используется, а только в составе изделия, для которого она предназначена.

**Сборочная единица (узел)** – конструктив, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе с применением сборочных (или сборочно-монтажных) операций. Сборочный узел может быть комплектующим изделием (если поставляется предприятию-изготовителю), но используется только в составе изделия, для которого он предназначен.

**Периферийное оборудование ЭВМ** (или внешние устройства) представляет собой совокупность технических средств (не связанных непосредственно с преобразованиями информации, выполняемыми центральным микропроцессором), обеспечивающих подготовку, ввод-вывод, хранение и передачу информации по линиям связи

и другие функции. К периферийным устройствам относятся клавиатура, планшеты, микрофоны, манипуляторы, накопители данных, дисплеи, печатающие устройства, графопостроители, устройства внешней памяти и др., изготавливаемые чаще всего на разных предприятиях, но электрофизически и механически совместимые с системным блоком ЭВМ и между собой, и обеспечивающие выполнение взаимосвязанных функций при эксплуатации. Такая совокупность основного и периферийных устройств ЭВМ называется **комплексом ЭС**.

**Комплект** – это несколько изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера как при изготовлении ЭУ, так и при его эксплуатации (например, комплект фотошаблонов, комплект специальных инструментов или оснастки, комплект измерительных средств, комплект запасных частей и др.).

**Технология** (дословно с греческого языка) – это наука об искусной деятельности, а в общем представлении – это глобальная сфера научно-прикладной деятельности, направленной на создание эффективной продукции. Применительно к сфере производства электронных устройств, технология является объектом научной и видом практической деятельности, направленных на создание и реализацию наиболее эффективных и экономичных методов и средств превращения исходных материальных предметов в готовое изделие. К основным показателям эффективности технологии относятся удельный расход материалов на единицу изделия, процент выхода годных изделий и их качество, уровень производительности труда, затраты на производство и себестоимость изделия. Задачей технологии как науки является теоретическое и теоретико-экспериментальное выявление сущности и закономерностей электрофизических, физико-химических и других явлений и процессов, на базе которых создаются новые (или совершенствуются имеющиеся) методы и средства воздействия на объект производства для изготовления перспективных изделий. Технология производства, например, ИМЭ, называемая **микроэлектронной технологией**, базируется на методах и способах изменения формы, размеров, физико-химических и электрофизических свойств, состава и структуры исходных полупроводниковых и других материалов.

**Технология производства ЭС** базируется на микроэлектронной технологии, а также методах и способах создания отдельных конструктивов с применением перспективных технологий приборостроения и прочих (например, лазерной, химико-гальванической, компьютерной, сборочной, монтажной и др.).

**Технология сборки** направлена на получение механических соединений между конструктивами.

**Технология монтажа** направлена на получение электрических соединений между конструктивами.

**Вещество** – простейший вид материи с ненулевой массой покоя.

**Материал** – вещество или несколько веществ определенного происхождения и назначения.

**Конструкционные материалы** – это материалы, из которых состоит конструкция изделия, включая все его конструктивы.

**Технологические материалы** различают следующие:

– основные, которые непосредственно участвуют в процессе изготовления изделия, то есть количественно и (или) качественно изменяют состояние объекта производства (например, клеи, припой, флюсы, диффузаны, защитные покрытия и др.). Они могут оставаться в составе конструкции изделия (например, клеи, припой, покрытия и др.) либо частично или полностью удаляться до завершения изготовления изделия (например, фоторезисты, флюсы и др.);

– вспомогательные, которые контактируют с объектом производства и способствуют реализации технологии, но не влияют на состояние объекта, например, материалы оснастки (технологической тары, разных приспособлений, контактирующих устройств и др.), а также материалы рабочих частей технологического оборудования.

**Технологическая среда** – совокупность технологических материалов и воздействий, направленных на требуемое изменение состояния объекта производства во время изготовления изделия. В сущности, технологическая среда – это условие реализации технологии.

**Внешняя среда** – среда, в которой осуществляется транспортировка, хранение и эксплуатация изделия после передачи его потребителю.

**Окружающая среда** – среда, контактирующая с поверхностью герметизирующей конструкции объекта производства (это, по сути, производственная среда, ограниченная производственным помещением и поверхностью герметизирующей конструкции объекта производства либо готового изделия).

**Внутрикорпусная среда** – среда, ограниченная стенками, основанием и крышкой корпуса (в полых корпусах), то есть отделенная от окружающей и внешней сред.

**Элемент конструктива** – неразделимая часть конструктива (которую нельзя демонтировать и заменить), например, у печатной платы элементами являются электропроводящие дорожки, отверстия, тестовые площадки или отверстия, контактные площадки и др.; у корпусированной ИС элементами являются кристалл, тело корпуса, выводы и др.

**Компонент конструктива** – часть конструктива, которая до его изготовления была самостоятельным изделием и которую можно демонтировать и заменить при изготовлении конструктива, либо после его изготовления. Например, ИС, дискретные **электрорадиокомпоненты** (ЭРК): резисторы, конденсаторы, транзисторы и др.; объемные соединители и др.

**Микросистема** (МС) – объединенная на одной подложке (или в одном объеме) функциональная система (со сложной функциональной структурой) или устройство с минимальными размерами всех компонентов. Термин микросистема применим также по многим **суперкомпонентам**, представляющим собой гибридную большую микросборку (БМСБ) с интегральными или функциональными компонентами (либо интегральными элементами и ЭРК, либо с функциональными элементами) многофункционального назначения и многоиерархического применения (например, многокристальные модули, двух-, трехмерные УБИС; биочипы – группа сенсоров (биосенсоров) на секционированной подложке; специализированные БМСБ на базе интегральной МЭ, либо опто -, магнито -, пьезо -, акустоэлектронные и другие устройства на базе функциональной МЭ).

**Техника поверхностного монтажа** (ТПМ) – совокупность новых высоконадежных либо адаптированных известных, наиболее эффективных методов и способов проектирования и изготовления высоко-

плотно-укомпонованных ЭС (включая технику корпусирования поверхностно-монтируемых навесных компонентов), с использованием компьютерно-интегрированных технологий.

Под **технологичностью конструкции** следует понимать такое сочетание ее конструкторско-технологических характеристик с характеристиками используемых технологий, которое обеспечивает наиболее простое и экономичное производство изделий при соблюдении всех функциональных и эксплуатационных условий.

**Совместимость материалов** – способность различных материалов сосуществовать в сопряжении без недопустимого ухудшения своих свойств и параметров в течение требуемого промежутка времени в заданных условиях.

**Производственный процесс** — совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта выпускаемых изделий. Он включает в себя подготовку производства; получение, транспортирование, контроль и хранение материалов (полуфабрикатов); технологические процессы изготовления деталей и сборки; изготовление технологической оснастки и др.

Производственный процесс делится на основной и вспомогательный. К основному производственному процессу относятся процессы изготовления продукции, предусмотренной государственным планом; к вспомогательному – процессы изготовления оснастки, ремонта оборудования, энергоснабжения и др.

Цехи, в которых осуществляется основной производственный процесс, называются основными, а цехи, в которых реализуется вспомогательный производственный процесс, – вспомогательными (ремонтный, инструментальный и др.).

**Технологический процесс** (ТП) – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) последующему определению состояния предмета труда. К предметам труда относятся заготовки и изделия.

Основной частью технологического процесса является **технологическая операция** (ТО) – законченная часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте.

Примеры технологических операций: сверление отверстий в печатных платах, вжигание толсто пленочных резисторов, термотренировка интегральных микросхем и др.

Основными элементами технологических операций являются установ, технологический переход (переход), вспомогательный переход, рабочий ход, вспомогательный ход и позиция.

*Установ* – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

*Переход* – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

*Вспомогательный переход* – законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода. Например, закрепление заготовки, смена инструмента и т. д.

*Рабочий ход* – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров и качества поверхности или свойств заготовки.

*Вспомогательный ход* – законченная часть технологического перехода, состоящего из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и необходимого для подготовки рабочего хода.

*Позиция* – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции. Например, обработка в поворотном приспособлении.

Построение технологического процесса и степень его детализации зависят от типа производства – единичного, серийного и массового. Классификация производств представлена на рис. 1.1.

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматриваются.

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий, периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

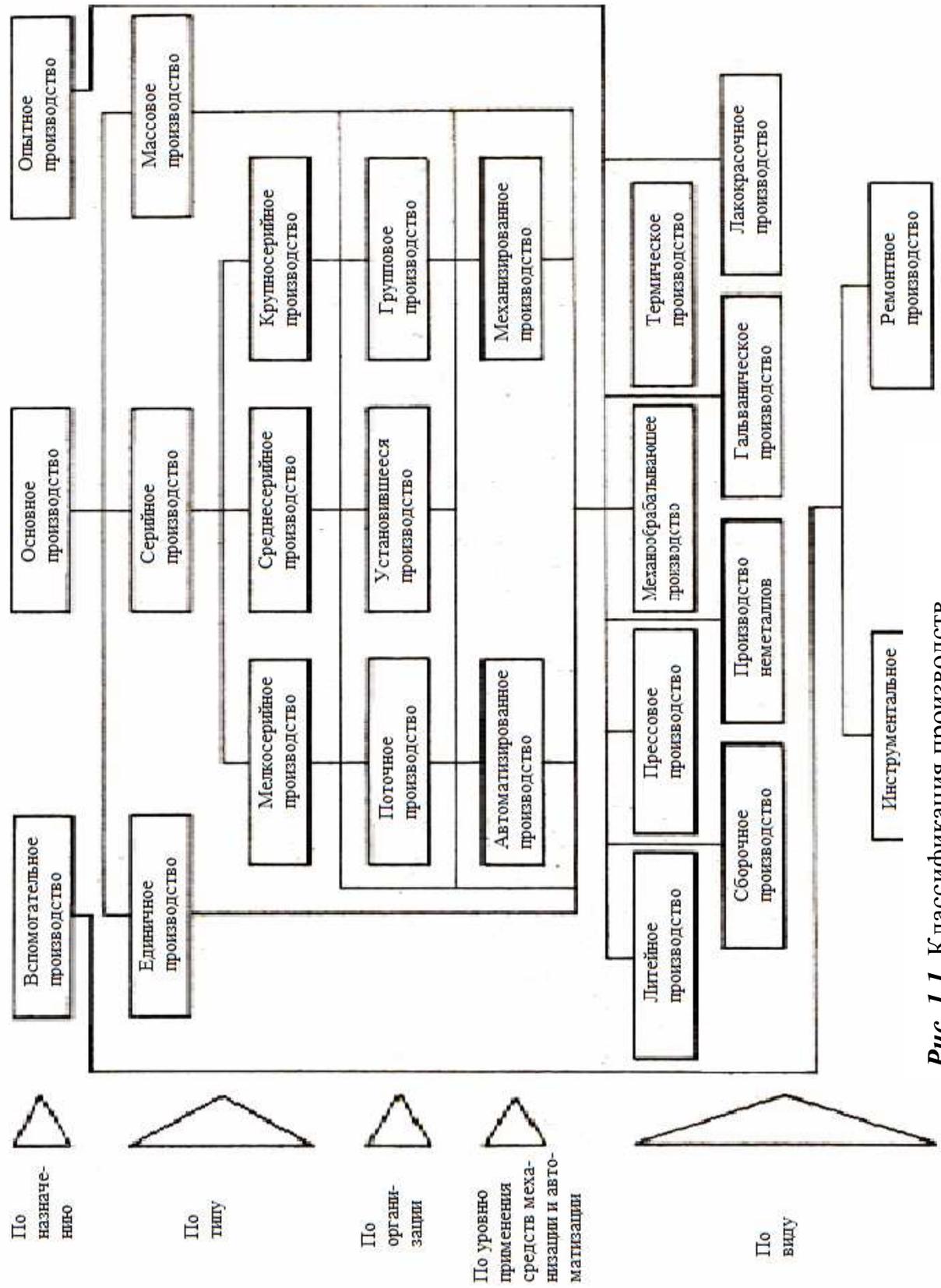


Рис. 1.1. Классификация производств

Массовое производство характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

Наиболее характерные особенности типов производства представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

*Характерные особенности типов производства*

Элемент сравнения	Тип производства		
	единичное	серийное	массовое
Широта номенклатуры	очень широкая	ограниченная	узкая
Объем выпуска	малый	средний	очень большой
Регулярность выпуска	нет	периодические партии	непрерывный
Специализация рабочих мест	отсутствует	выполнение нескольких операций	выполнение одной операции
Технологическое оснащение	универсальное	специализированное	специальное
Взаимозаменяемость	весьма ограниченная	полная или неполная (с набором деталей)	полная
Квалификация рабочих	высокая	средняя	низкая
Себестоимость	высокая	средняя	низкая

Важной характеристикой является коэффициент закрепления операции:

$$K_{з.о} = O/P,$$

где  $O$  – число различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца;

$P$  – число рабочих мест.

При  $K_{з.о} = 20 - 40$  производство мелкосерийное; при  $K_{з.о} = 10 - 20$  – среднесерийное; при  $K_{з.о}$  свыше 1 – 10 – крупносерийное. Для единичного производства  $K_{з.о}$  не регламентируется; для массового производства  $K_{з.о} = 1$ .

Программа выпуска в массовом производстве обеспечивает возможность узкой специализации рабочих мест, за которыми закрепляется выполнение только одной операции. В этом случае представляется возможным расположить оборудование в полном соответствии с ходом технологического процесса. Если производительность и количество рабочих мест рассчитаны таким образом, что переход с одной операции на другую осуществляется без задержек, то такая организация производства называется *поточной*.

Выполнение каждой операции на потоке должно осуществляться с заранее установленными тактом и ритмом выпуска.

*Такт выпуска* – интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенных наименований, типоразмеров и исполнений.

*Ритм выпуска* – количество изделий или заготовок определенных наименований, типоразмеров и исполнений, выпускаемых в единицу времени.

Для производства больших вычислительных машин характерно изменение серийности производства. На этапах изготовления элементов и блоков производство надо рассматривать как массовое или крупносерийное, а на этапах окончательной сборки (сборки всего изделия) – как мелкосерийное.

На радиозаводе (рис. 1.2) различные изделия выпускаются в разных количествах. Применительно к одному и тому же заводу или его цеху можно говорить о разных типах производства – единичном, серийном и массовом.

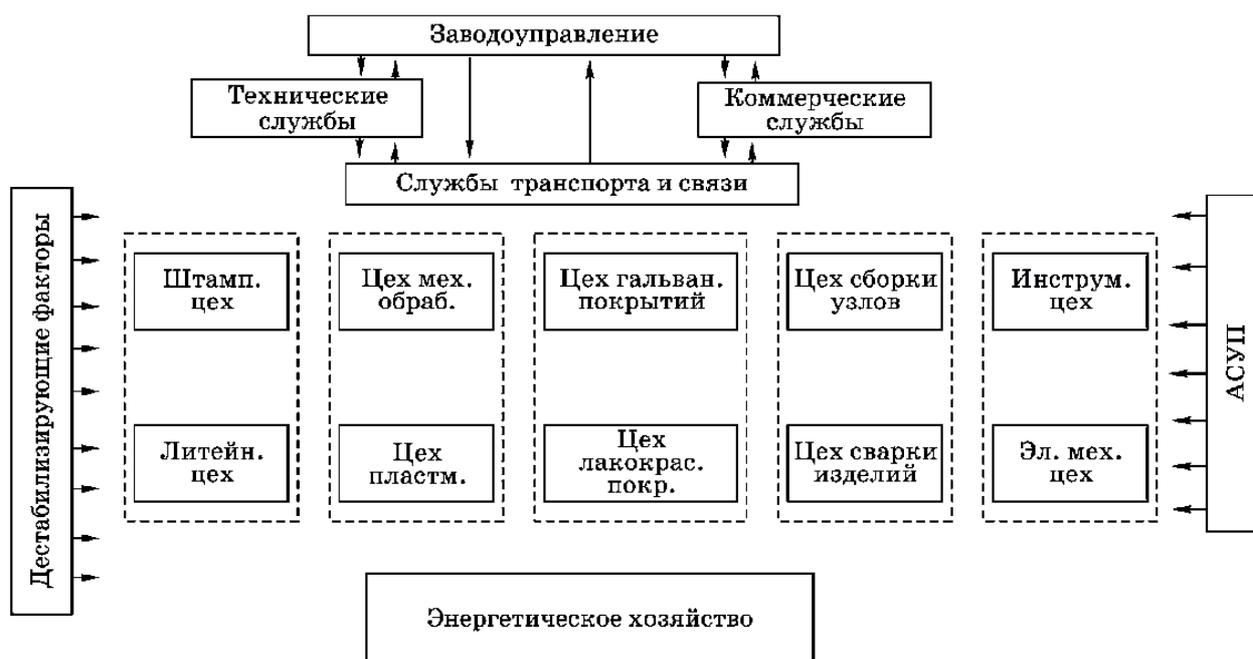


Рис. 1.2. Структура современного предприятия

Производственный процесс включает все этапы, которые проходит природный материал на пути превращения его в изделие. На радиозаводе выполняется часть производственного процесса, поскольку завод получает полуфабрикаты в виде материалов и комплектующих изделий. Производственный процесс на радиозаводе делится на ряд процессов, выполняемых в различных цехах (заготовительных, обработки и сборки).

## **1.2. Порядок проектирования технологических процессов**

Основной деятельностью технолога на предприятии является следующее:

- отладка производственных процессов изготовления новых изделий;
- разработка технологических процессов (ТП) на выпускаемые предприятием изделия;
- конструирование необходимой для их изготовления специальной технологической оснастки;
- разработка ТП на изготовление этой оснастки.

Технологическая подготовка производства (ТПП) включает в себя комплекс следующих работ:

- отработка, анализ изделия на технологичность;
- проектирование перспективных ТП;
- проектирование элементов производственной системы;
- проектирование рабочих ТП.

Технологический процесс изготовления электронных средств представлен на рис. 1.3.

Правильно разработанный технологический процесс должен обеспечить выполнение всех требований, указанных в чертеже и технических условиях, высокую производительность и высокие экономические показатели.

Исходными данными для проектирования технологических процессов являются чертеж детали и общие виды изделий, спецификация всех деталей, монтажные и полумонтажные схемы (для сборки), технические условия на наиболее ответственные детали, сборочные единицы и изделия, размер производственного задания, руководящие

технические материалы (данные об оборудовании, нормалы на инструмент, типовые технологические процессы и др.).

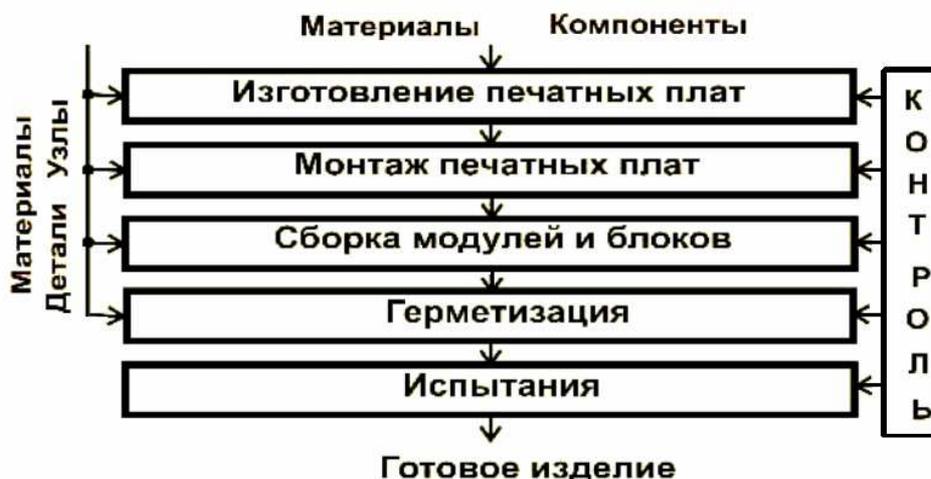


Рис. 1.3. Технологический процесс производства ЭС

### Виды технологических процессов.

Типизация технологических процессов устраняет многообразие технологических процессов обоснованным сведением их к ограниченному числу типов (рис. 1.4).

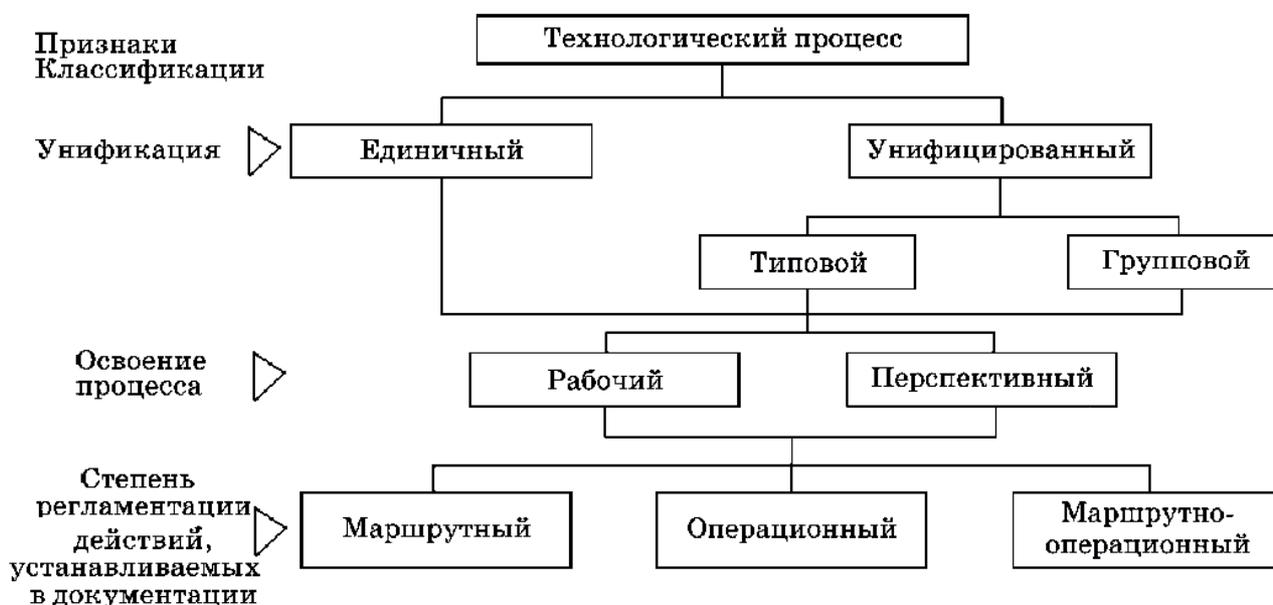


Рис. 1.4. Классификация технологических процессов

Единичные ТП разрабатываются для изготовления опытного образца изделия. Рабочие ТП являются тем самым конечным продуктом

деятельности технолога-разработчика, позволяющим перейти к серийному выпуску изделия на основном производстве.

Перспективный процесс разрабатывается как информационная основа для рабочих процессов при перевооружении производства и рассчитан на применение более совершенных методов, более производительных и экономически эффективных средств. Перспективные ТП разрабатываются на несколько лет вперед с учетом последних достижений науки, еще не нашедших широкого применения, но сулящих большие технико-экономические преимущества.

Маршрутное описание ТП – сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов.

Операционное описание ТП – полное описание всех ТП в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов.

Маршрутно-операционное описание ТП – сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности.

**Единый технологический процесс** разрабатывается для изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства. Разработка единичного ТП включает в себя следующие этапы.

1. Анализ исходных данных и выбор действующего типового, группового ТП или аналога единичного процесса.

2. Выбор исходной заготовки и метода ее получения.

3. Определение содержания операций, выбор технологических баз и составление технологического маршрута (последовательности) обработки.

4. Выбор технологического оборудования, оснастки, средств автоматизации и механизации технологического процесса. Уточнение последовательности выполнения переходов.

5. Назначение и расчет режимов выполнения операции, нормирование переходов и операций ТП, определение профессий и квалификации исполнителей, установление требований к технике безопасности.

6. Расчет точности, производительности и экономической эффективности ТП. Выбор оптимального процесса.

7. Оформление рабочей технологической документации.

Необходимость каждого этапа, состава задач и последовательности решения устанавливается в зависимости от типа производства. Типизация технологических процессов позволяет устранить их многообразие с обоснованным сведением к ограниченному числу типов.

**Типовой технологический процесс** характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками.

Типизацию начинают с классификации изделий. *Классом* называют совокупность деталей, характеризуемых общностью технологических задач. В пределах класса детали разбивают на группы, подгруппы и т. д. до типа. Практически к одному типу относят детали, для которых можно составить один технологический процесс.

Типовой технологический процесс разрабатывают с учетом последних достижений науки и техники, опыта передовых рабочих, что позволяет значительно сократить цикл подготовки производства и повысить производительность за счет применения более совершенных методов производства.

При изготовлении ЭВМ широко применяют типовые технологические процессы изготовления гибридных и полупроводниковых микросхем, печатных плат, типовых элементов замены, ячеек и др.

**Групповой технологический процесс** предназначен для совместного изготовления или ремонта групп изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

При группировании одна из наиболее сложных деталей принимается за комплексную. Эта деталь должна иметь все поверхности, встречающиеся у деталей данной группы. Они могут быть расположены в иной последовательности, чем у комплексной детали. При отсутствии такой детали в группе создается условная комплексная деталь.

Групповые технологические операции и схемы настройки станка разрабатываются для комплексной детали. Поэтому технологическому процессу можно обрабатывать любую деталь группы без значительных отклонений от общей схемы. Если при обработке какой-либо детали не требуется весь комплект инструментов, то пользуются только необходимым, пропуская ненужный. В отдельных случаях возможны замена одного инструмента другим и небольшие подналадки.

Групповые технологические процессы, используют для механической обработки деталей на универсальном оборудовании, для электромонтажных, сборочных и других операций, что делает целесообразным применение высокопроизводительных автоматов и полуавтоматов в мелкосерийном производстве (например, для установки и пайки микросхем с планарными выводами на печатной плате).

**Выбор технологических баз.** Важным этапом проектирования любого технологического процесса является выбор технологических баз.

По назначению базы разделяют на конструкторские, технологические и измерительные.

*Конструкторская база* используется для определения положения детали или сборочной единицы в изделии; *технологическая база* – для определения положения заготовки или изделия при изготовлении; *измерительная база* – для определения относительного положения изделия или заготовки и средств измерения.

Выбор схемы базирования должен производиться с учетом требуемой точности обработки.

*Погрешностью базирования* называется отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при базировании от требуемого. Погрешность базирования имеет место при несовпадении технологической и измерительной базы. Она является случайной величиной и подчиняется закону распределения погрешностей по размеру, определяющему положение технологической базы относительно измерительной.

Схема базирования будет обеспечивать требуемую точность при условии, что действительное значение погрешности базирования меньше допустимого. Действительное значение погрешности базирования зависит от принятой схемы, а допустимое значение находят из условия обеспечения заданной точности.

**Виды контроля.** Неотъемлемой составной частью технологического процесса является технический контроль, который должен охватывать весь технологический процесс и предотвращать попадание дефектных материалов и изделий на последующие этапы изготовления или ремонта. На этапе производства устанавливают три вида контроля: входной, операционный и приемочный.

*Входной контроль* используют для проверки соответствия материалов, заготовок, комплектующих изделий и сборочных единиц, поступающих на предприятие; *операционный контроль* – для проверки

деталей и сборочных единиц в процессе изготовления или ремонта, а также количественных и качественных характеристик технологических процессов; *приемочный контроль* – для проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Контроль может быть сплошной, выборочный, непрерывный, периодический, летучий.

*Сплошной контроль* применяют в условиях высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию.

*Выборочный контроль* используют для изделий при большой трудоемкости контроля или при контроле, связанном с разрушением изделий или с операциями, выполняемыми на автоматизированных комплексах.

*Непрерывный контроль* служит для проверки технологических процессов при их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения количественных и качественных характеристик. Непрерывный контроль, как правило, осуществляется автоматическими или полуавтоматическими методами контроля.

*Периодический контроль* применяют для проверки изделий при установившемся производстве и стабильных технологических процессах.

*Летучий контроль* применяют в специальных случаях, установленных стандартами предприятия.

Выбор средств контроля должен быть основан на обеспечении заданных показателей процесса контроля и анализа затрат на реализацию его процесса в установленный промежуток времени при заданном качестве изделия.

Обязательными показателями процесса контроля являются точность измерений, достоверность, трудоемкость и стоимость контроля.

При выборе средств контроля должно обеспечиваться оптимальное применение прогрессивных механизированных и автоматизированных, универсальных и стандартных средств контроля; повышение производительности, снижение трудоемкости контроля и безопасность труда.

### **1.3. Технологическая документация**

Состав и правила выполнения технологической документации определяются единой системой технологической документации (ЕСТД).

Она представляет собой комплекс государственных стандартов и руководящих нормативных документов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой при изготовлении и ремонте изделий (включая контроль, испытания и перемещения).

Основное назначение стандартов ЕСТД заключается в установлении во всех организациях и на всех предприятиях единых правил выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации в зависимости от типа и характера производства. Эти правила обеспечивают взаимообмен технологическими документами между организациями и предприятиями без их переоформления, а также стабильность комплектности, исключаящую повторную разработку и выпуск дополнительных документов.

Стандартизация обозначений и унификация последовательности размещения однородной информации в формах документации на различные виды работ позволяют использовать средства вычислительной техники для управления производством и проектирования ТП, создают условия для разработки прогрессивных типовых (групповых) процессов и предпосылки по снижению трудоемкости инженерно-технических работ в сфере технологической подготовки.

К технологическим относят графические и текстовые документы, которые определяют технологический процесс изготовления или ремонта изделия и содержат необходимые данные для организации производства.

Состав документов зависит от стадии разработки технологического процесса, типа и характера производства. В условиях серийного и массового производства используются следующие документы: карта эскизов (КЭ); технологическая инструкция (ТИ); карты – маршрутная (МК), технологического процесса (КТП), операционная (ОК), типового (группового) технологического процесса (КТТП), типовой (групповой) операции (КТО), комплектовочная (КК), технико-нормировочная (ТНК), наладки (КН); ведомость технологических маршрутов (ВТМ); ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции) (ВТП, ВТО).

Стадии разработки документации приведены на рис. 1.5.

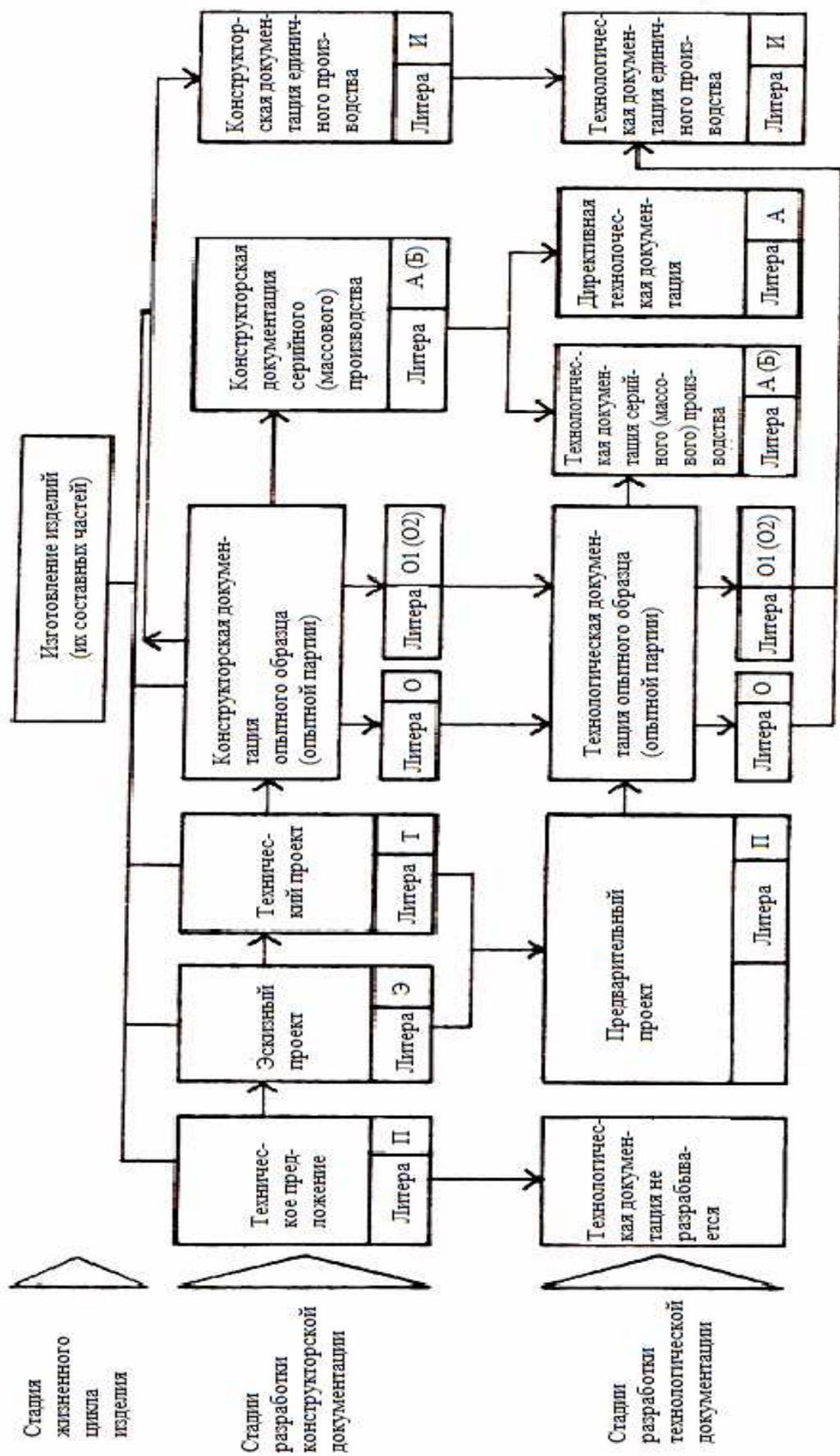


Рис. 1.5 Стадии разработки документации

На стадиях проектирования (предварительного проекта и опытного образца) вид документа выбирается по усмотрению заказчика. Наиболее часто используется следующая документация.

**Маршрутная карта** является обязательным документом. Она предназначена для маршрутного и маршрутно-операционного описания технологического процесса или указания полного состава технологических операций при операционном описании изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия), включая контроль и перемещения по всем операциям различных технологических методов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах. Допускается взамен МК использовать соответствующую карту технологического процесса.

**Карта технологического процесса** предназначена для операционного описания технологического процесса изготовления или ремонта изделия (составных частей) в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах.

**Операционная карта** содержит описание технологической операции с указанием переходов, режимов обработки и данных о средствах технологического оснащения. Она используется непосредственно на рабочем месте.

**Карта типового технологического процесса** используется для описания типового технологического процесса изготовления или ремонта деталей и сборочных единиц, а карта типовой операции – для описания типовой технологической операции.

**Стадии разработки технологической документации**, применяемой для технологических процессов изготовления изделий (составных частей изделий), определяются в зависимости от стадий разработки используемой конструкторской документации.

Стадии разработки рабочей технологической документации устанавливаются разработчиком документации в соответствии с табл. 1.2.

Таблица 1.2

*Стадии разработки рабочей технологической документации*

Стадия разработки	Содержание работы
Предварительный проект	Разработка технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания макета изделия и (или) его составных частей с присвоением литеры «П», на основании конструкторской документации, выполненной на стадиях «Эскизный проект» и «Технический проект»
Разработка документации:	
а) опытного образца (опытной партии)	<p>Разработка технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), без присвоения литеры, на основании конструкторской документации, не имеющей литеры.</p> <p>Корректировка и разработка технологической документации по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) с присвоением литеры «О» на основании конструкторской документации, имеющей литеру «О».</p> <p>Корректировка и разработка технологической документации по результатам изготовления и приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) и по результатам корректировки конструкторской документации с присвоением технологической документации литеры «О<sub>1</sub>» на основании конструкторской документации, имеющей литеру «О<sub>1</sub>».</p> <p>Корректировка и разработка технологической документации по результатам повторного изготовления и приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) и по результатам корректировки конструкторской документации с присвоением технологической документации литеры «О<sub>2</sub>» на основании конструкторской документации, имеющей литеру «О<sub>2</sub>»</p>
б) серийного (массового) производства	Разработка технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания изделий серийного (массового) производства, с присвоением литеры «А» («Б»), на основании конструкторской документации, имеющей литеру «А» или «Б»

***Виды технологических документов***

В зависимости от назначения технологические документы (далее – документы) подразделяют на основные и вспомогательные.

К **основным** относят документы:

- содержащие сводную информацию, необходимую для решения одной или комплекса инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач;

- полностью и однозначно определяющие технологический процесс (операцию) изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия).

К **вспомогательным** относят документы, применяемые при разработке, внедрении и функционировании технологических процессов и операций, например, карту заказа на проектирование технологической оснастки, акт внедрения технологического процесса и др.

Основные технологические документы подразделяют на документы общего и специального назначения.

К документам *общего назначения* относят технологические документы, применяемые в отдельности или в комплектах документов на технологические процессы (операции), независимо от применяемых технологических методов изготовления или ремонта изделий (составных частей изделий), например, карту эскизов, технологическую инструкцию.

К документам *специального назначения* относят документы, применяемые при описании технологических процессов и операций в зависимости от типа и вида производства и применяемых технологических методов изготовления или ремонта изделий (составных частей изделий), например, маршрутную карту, карту технологического процесса, карту типового (группового) технологического процесса, ведомость изделий (деталей, сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции), операционную карту и др.

Виды основных технологических документов, их назначение и условное обозначение приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

*Виды основных технологических документов*

Вид документа	Условное обозначение документа	Назначение документа
1	2	3
<b>ДОКУМЕНТЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>		
Титульный лист	ТЛ	Документ предназначен для оформления: - комплекта(ов) технологической документации на изготовление или ремонт изделия;

1	2	3
		<p>- комплекта(ов) технологических документов на технологические процессы изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия);</p> <p>- отдельных видов технологических документов.</p> <p>Является первым листом комплекта(ов) технологических документов</p>
Карта эскизов	КЭ	<p>Графический документ, содержащий эскизы, схемы и таблицы и предназначенный для пояснения выполнения технологического процесса, операции или перехода изготовления, или ремонта изделия (составных частей изделия), включая контроль и перемещения</p>
Технологическая инструкция	ТИ	<p>Документ предназначен для описания технологических процессов, методов и приемов, повторяющихся при изготовлении или ремонте изделий (составных частей изделий), правил эксплуатации средств технологического оснащения. Применяется в целях сокращения объема разрабатываемой технологической документации</p>
<b>ДОКУМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>		
Маршрутная карта	МК	<p>Документ предназначен для маршрутного или маршрутно-операционного описания технологического процесса, или указания полного состава технологических операций при операционном описании изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия), включая контроль и перемещения по всем операциям различных технологических методов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах.</p> <p><i>Примечания:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. МК является обязательным документом.</li> <li>2. Допускается МК разрабатывать на отдельные виды работ.</li> <li>3. Допускается МК применять совместно с соответствующей картой технологической информации, взамен карты технологического процесса, с операционным описанием в МК всех операций и полным указанием необходимых технологических режимов в графе «Наименование и содержание операции».</li> <li>4. Допускается взамен МК использовать соответствующую карту технологического процесса</li> </ol>

1	2	3
Карта технологического процесса	КТП	Документ предназначен для операционного описания технологического процесса изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия) в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах
Карта типового (группового) технологического процесса	КТТП	Документ предназначен для описания типового (группового) технологического процесса изготовления или ремонта изделий (составных частей изделий) в технологической последовательности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов и общих данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах. Применяется совместно с ВТП
Операционная карта	ОК	Документ предназначен для описания технологической операции с указанием последовательного выполнения переходов, данных о средствах технологического оснащения, режимах и трудовых затратах. Применяется при разработке единичных технологических процессов
Карта типовой (групповой) операции	КТО	Документ предназначен для описания типовой (групповой) технологической операции с указанием последовательности выполнения переходов и общих данных о средствах технологического оснащения и режимах. Применяется совместно с ВТО
Карта технологической информации	КТИ	Документ предназначен для указания дополнительной информации, необходимой при выполнении отдельных операций (технологических процессов). Допускается применять при разработке типовых (групповых) технологических процессов (ТТП, ГТП) для указания переменной информации с привязкой к обозначению изделия (составной его части)
Комплектовочная карта	КК	Документ предназначен для указания данных о деталях, сборочных единицах и материалах, входящих в комплект собираемого изделия, и применяется при разработке технологических процессов сборки. Допускается применять КК для указания данных о вспомогательных материалах в других технологических процессах

Продолжение табл. 1.3

1	2	3
Технико-нормировочная карта	ТНК	Документ предназначен для разработки расчетных данных к технологической операции по нормам времени (выработки), описания выполняемых приемов и применяется при решении задач нормирования трудозатрат
Карта кодирования информации	ККИ	Документ предназначен для кодирования информации, используемой при разработке управляющей программы к станкам с программным управлением (ПУ)
Карта наладки	КН	Документ предназначен для указания дополнительной информации к технологическим процессам (операциям) по наладке средств технологического оснащения. Применяется при многопозиционной обработке для станков с ПУ, при групповых методах обработки и т.п.
Ведомость технологических маршрутов	ВТМ	Документ предназначен для указания технологического маршрута изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия) по подразделениям предприятия и применяется для решения технологических и производственных задач
Ведомость оснастки	ВО	Документ предназначен для указания применяемой технологической оснастки при выполнении технологического процесса изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия)
Ведомость оборудования	ВОБ	Документ предназначен для указания применяемого оборудования, необходимого для изготовления или ремонта изделия
Ведомость материалов	ВМ	Документ предназначен для указания данных о подетальных нормах расхода материалов, о заготовках, технологическом маршруте прохождения изготавливаемого или ремонтируемого изделия. Применяется для решения задач по нормированию материалов
Ведомость специфицированных норм расхода материалов	ВСН	Документ предназначен для указания данных о нормах расхода материалов для изготовления или ремонта изделия и применяется для решения задач по нормированию расхода материалов на изделие
Ведомость удельных норм расхода материалов	ВУН	Документ предназначен для указания данных об удельных нормах расхода материалов, используемых при выполнении технологических процессов и операций изготовления или ремонта изделия

1	2	3
		(составных частей изделия), и применяется для решения задач по нормированию расхода материалов
Технологическая ведомость	ТВ	Документ предназначен для комплексного указания технологической и организационной информации, используемой перед разработкой комплекта (комплектов) документов на технологические процессы (операции), и применяется на одном из первых этапов технологической подготовки производства (ТПП)
Ведомость применяемости	ВП	Документ предназначен для указания применяемости полного состава деталей, сборочных единиц, средств технологического оснащения и др. Применяется для решения задач ТПП
Ведомость сборки изделия	ВСИ	Документ предназначен для указания состава деталей и сборочных единиц, необходимых для сборки изделия в порядке ступени входимости, их применяемости и количественного состава
Ведомость операций	ВОП	Документ предназначен для операционного описания технологических операций одного вида формообразования, обработки, сборки и ремонта изделия в технологической последовательности с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения и норм времени. Применяется совместно с МК или КТП
Ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции)	ВТП (ВТО)	Документ предназначен для указания состава деталей (сборочных единиц, изделий), изготавливаемых или ремонтируемых по типовому (групповому) технологическому процессу (операции), и переменных данных о материале, средствах технологического оснащения, режимах обработки и трудозатратах

#### 1.4. Технологичность конструкций элементов и деталей ЭС

Технологичность конструкции является одной из важнейших характеристик изделия. Под *технологичностью изделия* понимают совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Различают производственную и эксплуатационную технологичность. *Производственная технологичность* конструкции изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства и процессы изготовления, включая контроль и испытания; *эксплуатационная технологичность* – в сокращении затрат времени и средств на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Требования, предъявляемые к технологичности конструкции, меняются в зависимости от вида изделия, объема выпуска и типа производства. Изделие, технологичное в условиях мелкосерийного выпуска, может оказаться нетехнологичным при массовом изготовлении. Наиболее целесообразным является отработка технологичности конструкции во время ее проектирования.

Технологичность конструкции изделия можно оценить количественно и качественно.

*Качественная оценка* характеризует технологичность конструкции обобщенно на основании опыта исполнителя. Такая оценка допустима на всех стадиях проектирования, когда осуществляется выбор лучшего конструктивного решения и не требуется определения степени технологичности сравниваемых вариантов. Качественная оценка в процессе проектирования предшествует количественной и определяет целесообразность ее проведения.

*Количественная оценка* осуществляется с помощью системы базовых показателей.

По способу выражения характеризуемых признаков показатели технологичности могут быть абсолютные и относительные, а по количеству признаков – частные и комплексные. *Частный показатель технологичности конструкции изделия* характеризует одно из входящих в нее свойств, а *комплексный показатель* – несколько входящих в него частных и комплексных свойств.

Наиболее важными показателями технологичности конструкции изделий из них являются трудоемкость изготовления изделия и технологическая себестоимость. В отраслевых стандартах, разрабатываемых на основе государственных стандартов, приводится номенклатура базовых (частных) показателей и методика их определения.

Базовые показатели технологичности для электронных блоков, определяемые на стадии разработки рабочей документации, их ранжированная последовательность по весовой значимости приведены в табл. 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4

## Базовые показатели технологичности

Наименование показателя	Обозначение	Весовой коэффициент	Значение
Коэффициент использования интегральных микросхем и микросборок	$K_{ИСИМС}$	1	$K_{ИСИМС} = \frac{H_{ИМС}}{H_{ИМС} + H_{ЭРЭ}}$
Коэффициент автоматизации и механизации монтажа изделий	$K_{АиМ}$	1	$K_{АиМ} = \frac{H_{АиМ}}{H_{М}}$
Коэффициент механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{МП}$	0,75	$K_{МП} = \frac{H_{МП}}{H_{ЭРЭ}}$
Коэффициент механизации операций контроля и настройки электрических параметров	$K_{МКН}$	0,5	$K_{МКН} = \frac{H_{МКН}}{H_{КН}}$
Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{пов}$	0,313	$K_{пов} = 1 - \frac{H_{ТЭРЭ}}{H_{ЭРЭ}}$
Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{ПЭРЭ}$	0,188	$K_{ПЭРЭ} = 1 - \frac{H_{ТОРЭРЭ}}{H_{ТЭРЭ}}$
Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\phi}$	0,109	$K_{\phi} = \frac{D_{пр}}{D}$

Таблица 1.5

## Обозначения базовых показателей технологичности

Наименование показателя	Обозначение
Количество монтажных соединений, которые осуществляются автоматизированным или механизированным способом	$H_{АиМ}$
Общее количество монтажных соединений	$H_{М}$
Общее количество ЭРЭ	$H_{ЭРЭ}$
Количество ЭРЭ, подготовка которых осуществляется механизированным способом	$H_{МП}$

Окончание табл. 1.5

Количество операций контроля и настройки, которые можно осуществлять механизированным способом	$H_{МКН}$
Общее количество операций контроля и настройки	$H_{КН}$
Общее количество типоразмеров ЭРЭ в изделии	$H_{ТЭРЭ}$
Число деталей, полученных прогрессивными методами формообразования	$D_{пр}$
Общее число деталей в блоке	$D$
Число интегральных микросхем	$H_{ИМС}$
Количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ	$H_{ТОРЭРЭ}$

Уровень технологичности конструкции изделия при известном нормативном показателе  $K_n$  (табл. 1.6) оценивается отношением полученного комплексного показателя к нормативному, которое должно удовлетворять условию  $K/K_n > 1$ .

Таблица 1.6

*Нормативы комплексных показателей технологичности конструкций различных типов блоков*

Наименование класса блоков	Значения $K$ для стадий разработки рабочей документации		
	опытный образец (партия)	установочная серия	установившееся серийное производство
Электронные	0,30...0,60	0,40...0,70	0,50...0,75
Электромеханические	0,20...0,50	0,40...0,60	0,45...0,65
Механические	0,10...0,30	0,25...0,35	0,30...0,40
Радиотехнические	0,20...0,50	0,25...0,35	0,30...0,60
Соединительные, коммутационные, распределительные	0,20...0,60	0,25...0,65	0,30...0,70

При анализе полученных результатов необходимо учитывать сложность изделия и уровень основного производства завода-изготовителя.

Конструкция детали должна отвечать следующим требованиям:

- состоять из стандартных и унифицированных элементов;
- изготавливаться из стандартных заготовок;
- иметь оптимальные точность и шероховатость поверхностей;
- обеспечивать возможность применения стандартных и типовых процессов ее изготовления;
- обеспечивать возможность одновременного изготовления нескольких деталей.

## **1.5. Тест для проверки знаний**

1. Совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта изделий называется следующим образом:

- а) технологический процесс;
- б) производственный процесс;
- в) технологическая операция.

2. Законченная часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте, называется следующим образом:

- а) технологическая операция;
- б) технологический переход;
- в) технологический процесс.

3. Какой вид технологического процесса характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками:

- а) единичный;
- б) типовой;
- в) групповой.

4. Какой вид технологического процесса разрабатывается для изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства:

- а) единичный;
- б) типовой;
- в) групповой.

5. Какой вид технологического процесса разрабатывается для совместного изготовления или ремонта групп изделий с различными конструктивными, но общими технологическими признаками:

- а) единичный;
- б) типовой;
- в) групповой.

6. Законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке называется следующим образом:

- а) переход;
- б) установ;
- в) вспомогательный переход.

7. Законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода называется следующим образом:

- а) переход;
- б) установ;
- в) вспомогательный переход.

8. Часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы называется следующим образом:

- а) переход;
- б) установ;
- в) вспомогательный переход.

9. Массовое производство характеризуется следующим образом:

- а) узкой специализацией рабочих мест;
- б) широкой специализацией рабочих мест;
- в) универсальностью рабочих мест.

10. Для какого типа производства характерен малый объем выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматривается:

- а) единичного;
- б) серийного;
- в) массового.

11. Какой тип производства характеризуется изготовлением или ремонтом изделий, периодически повторяющимися партиями:

- а) единичный;
- б) серийный;
- в) массовый.

12. Какой тип производства характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция:

- а) единичный;
- б) серийный;
- в) массовый.

13. Коэффициент закрепления операции для мелкосерийного производства равен следующему:

- а) 1 – 10;
- б) 10 – 20;
- в) 20 – 40.

14. Коэффициент закрепления операции для среднесерийного производства равен следующему:

- а) 1 – 10;
- б) 10 – 20;
- в) 20 – 40.

15. Коэффициент закрепления операции для крупносерийного производства равен следующему:

- а) 1 – 10;
- б) 10 – 20;
- в) 20 – 40.

16. Какая база используется для определения положения заготовки или изделия при изготовлении:

- а) конструкторская;
- б) технологическая;
- в) измерительная.

17. Какая база используется для определения положения детали или сборочной единицы в изделии:

- а) конструкторская;
- б) технологическая;
- в) измерительная.

18. Какая база используется для определения относительного положения изделия или заготовки и средств измерения:

- а) конструкторская;
- б) технологическая;
- в) измерительная.

19. Какие виды контроля устанавливают на этапе производства:

- а) непрерывный, периодический, летучий;
- б) входной, операционный, приемочный;
- в) сплошной, выборочный.

20. Какой вид контроля применяют в условиях высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию:

- а) сплошной;
- б) выборочный;
- в) непрерывный.

21. Какой вид контроля используют для изделий при большой трудоемкости контроля или при контроле, связанном с разрушением изделий или с операциями:

- а) сплошной;
- б) выборочный;
- в) непрерывный.

22. Какой вид контроля служит для проверки технологических процессов при их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения количественных и качественных характеристик:

- а) сплошной;
- б) выборочный;
- в) непрерывный.

23. Изделие считается технологичным, если комплексный показатель технологичности:

- а) больше нормативного;
- б) равен нормативному;
- в) меньше нормативного.

24. Какой технологический документ содержит описание ТП изготовления изделия по всем операциям в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах:

- а) маршрутная карта;
- б) операционная карта;
- в) технологическая инструкция.

25. Какой технологический документ содержит описание отдельной технологической операции с указанием переходов, данных о технологическом оборудовании, оснастке, инструментах и режимах обработки:

- а) маршрутная карта;
- б) операционная карта;
- в) технологическая инструкция.

26. Какой технологический документ содержит описание приемов работы, правил эксплуатации (наладки и настройки) средств технологического оснащения, приготовлению растворов, электролитов, смесей и др.:

- а) маршрутная карта;
- б) операционная карта;
- в) технологическая инструкция.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 2.1. Математические модели технологических систем

*Математическое моделирование* – это процесс создания модели и оперирование ею с целью получения необходимых сведений о реальном или проектируемом технологическом объекте. Альтернативой математического моделирования является физическое макетирование, но у математического моделирования есть ряд преимуществ: меньше сроки на подготовку анализа; значительно меньшая материалоемкость; возможность выполнения экспериментов на критических и закритических режимах, которые привели бы к разрушению реального объекта, и др.

*Математическая модель* (ММ) – это совокупность математических объектов (чисел, символов, множеств и т. д.) и связей между ними, отражающих важнейшие для инженера-технолога свойства моделируемого технологического объекта.

Моделирование большинства технологических объектов можно выполнять на микро-, макро- и мегауровнях, различающихся степенью детализации рассмотрения процессов в объекте. Математической моделью технологического объекта *на микроуровне* является обычно система дифференциальных уравнений с заданными краевыми условиями, но точное решение подобных систем удается получить лишь для частных случаев, поэтому первая задача, возникающая при моделировании, состоит в построении приближенной дискретной модели для численных исследований.

Математической моделью технологического объекта *на макроуровне* является также, как правило, система дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями, построенными на основе сочетания компонентных уравнений отдельных элементов ТП с топологическими уравнениями, вид которых определяется связями между элементами. Для сложных технологических объектов с большим числом элементов приходится переходить на мегауровень.

*На мегауровне* моделируют в основном две категории технологических объектов: объекты, являющиеся предметом исследования теории динамических систем, и объекты, являющиеся предметом теории

массового обслуживания, в том числе и других соответствующих стохастических методов. Для первой категории объектов возможно использование детерминированного или стохастического математического аппарата макроуровня, для второй категории объектов, как правило, используют стохастические методы событийного моделирования. Проверка адекватности ММ осуществляется сравнением контрольных результатов с экспериментом; при несовпадении требуется уточнить модель.

Принципиальным при моделировании любых технологических объектов является следующее:

1 – упрощенное отражение в модели их важнейших для данного исследования свойств;

2 – модель воспроизводит объект в определенном ограниченном диапазоне условий и требований;

3 – различные модели могут описывать различные стороны объекта.

Фундаментальным для моделирования сложных объектов является известное положение кибернетики, состоящее в том, что при сложности объекта выше некоторого уровня его адекватная (полная) модель не может быть сделана более простой.

Место и роль ММ технологических систем наиболее отчетливо выявляются при системном подходе, когда технологическая система (ТС) рассматривается как некоторая подсистема более обширной системы проектирования, производства, сбыта и эксплуатации ЭА. Развитие техники отражается, в частности, в более детальном математическом моделировании ТС и процессов, и вместе с тем диалектическая противоречивость такой тенденции заключается в том, что к моменту, когда математическое описание системы близится к завершению, сама система близка к моральному старению. В наибольшей степени это относится к такой области техники, как электроника. Так что достигнутые успехи в области синтеза ММ относятся в какой-то мере к нашему прошлому опыту. Совершенствование уже известных ММ имеет огромное значение, оно позволяет непрерывно обновлять арсенал средств оптимизации, в весьма компактной форме обобщать полученные результаты, без чего немислимо создание все более совершенного математического обеспечения для автоматизированных систем проектирования, систем производства ЭВА и управления ими.

Из этого следует, что ни одна ТС не имеет исчерпывающего математического описания. Вместе с тем любая ТС, удовлетворяющая требованиям оптимальности, должна иметь несколько ММ на различных этапах своего существования. На первом этапе, когда она существует лишь как идея у разработчиков, требуется наиболее простая и грубая модель, которая позволяет решать вопрос осуществимости ТС. Здесь, как правило, используются аддитивные ограничительные неравенства, учитывающие суммарное время ТП, ресурсы производителя, реальные объемы и сроки поставки исходных компонентов при сравнительно простой функции качества (зачастую линейной). Очевидно, использование таких моделей эффективно на самой ранней стадии разработки ТС. Здесь преследуется цель убедиться, что исходные данные на ее проектирование принципиально реализуемы. Сами исходные данные при этом могут варьироваться в широких пределах и задаются, как правило, в виде некоторых интервалов изменения.

Наиболее содержательный в смысле использования ММ этап проектирования. На этом этапе вначале тщательно исследуются физико-химические закономерности, лежащие в основе технологии данного вида ЭА. Их математическое описание основывается обычно на дифференциальных уравнениях математической физики, теории цепей, термодинамики, кинетики химических взаимодействий и т. д. Для обобщения результатов экспериментальных исследований широко привлекаются методы теории планирования эксперимента. Результатом такого всестороннего анализа ТП являются соотношения, полученные в результате решения дифференциальных уравнений, аппроксимации экспериментальных данных и с требуемой точностью описывающие отдельные компоненты ТП.

Таким образом, стадия анализа ТП позволяет построить отдельные элементы ММ ТС. Существенное отличие от моделей, используемых при оценке осуществимости ТС, состоит в исчерпывающей детализации описания, когда выявляются не просто интервалы изменения интересующих величин, а существующие функциональные и вероятностные связи между ними. Разумеется, это описание должно при необходимости содержать наряду с детерминированной частью также часть, учитывающую случайную природу происходящих процессов.

Построенные элементы ММ ТС используются в ее структурном синтезе. Структурный синтез имеет целью выявить состав и связь подсистем разрабатываемой системы, выполняющих отдельные функции или группу близких по характеру протекающих процессов функций. Это наиболее творческая и вместе с тем наиболее трудная, алгоритмизируемая стадия разработки ТС, требующая диалогового взаимодействия разработчиков с ЭВМ. Назначение ММ на этой стадии состоит в обеспечении большого объема проверочных расчетов различных вариантов системы с целью генерирования некоторого множества жизнеспособных технических решений. Структурный синтез завершается построением модели функционирования каждого варианта ТС, связывающей воедино все вышеупомянутые модели ее элементов. С этого момента начинается стадия параметрического синтеза, характеризующаяся жесткой стратегией получения единственного квазиоптимального варианта ТС. На основе модели функционирования строится модель точности ТП, используемая для исследования его чувствительности к изменениям входных параметров, устойчивости к внешним факторам. Именно на этом этапе выявляются связи параметров системы с критериями качества, то есть с величинами, однозначно связанными с качеством системы. Эти связи в совокупности образуют оптимизационную модель системы. Ввиду сложности современных систем, их многопараметричности, многокритериальности задача оптимизации имеет не единственное решение.

Неоднозначность решения не может быть устранена путем внутреннего, более детального анализа системы. Необходим внешний анализ системы, то есть она должна рассматриваться как подсистема более сложной системы и упомянутые выше критерии оптимизации ранжируются по степени их влияния на критерии оптимальности последней. Это позволяет построить некоторый результирующий показатель качества ТС, который в принципе определит единственное решение задачи оптимизации. Поскольку возможности объективного выбора результирующего критерия ограничены как временем, отпущенным на проектирование, так и нашими знаниями свойств систем более высшего иерархического уровня, то такой выбор неизбежно на каком-то этапе становится субъективным, и именно в этом смысле мы используем термин «квазиоптимальный», говоря о единственном решении задачи параметрического синтеза. Модель оптимизации позволяет достаточно полно спроектировать ТС. Теперь можно гово-

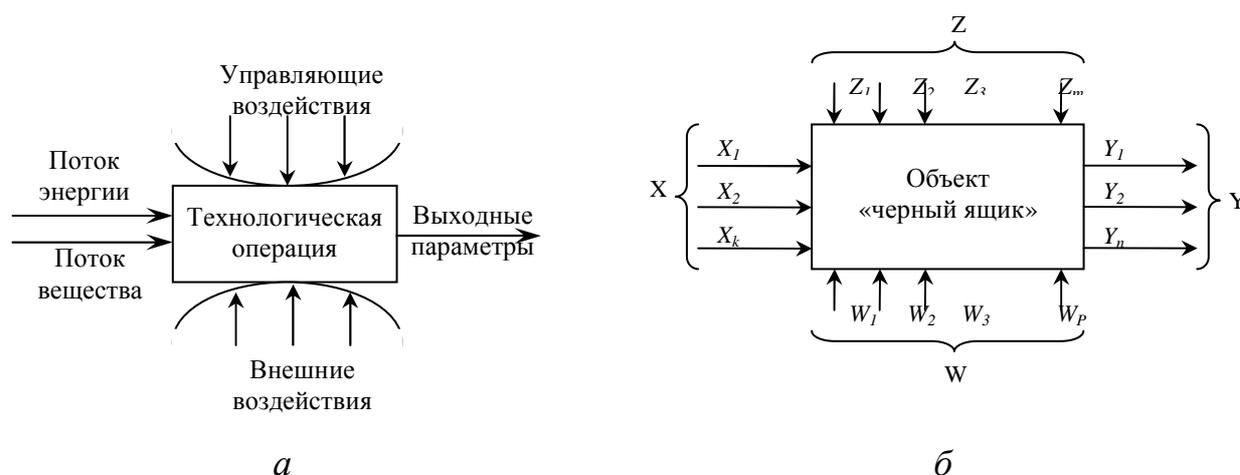
речь о моделях оптимального распределения ТС между пользователями, учитывающих затраты на транспортирование, установку данной системы и ввод ее в действие. Модели такого типа в настоящее время достаточно полно и детально разработаны. Это хорошо изученные транспортные задачи, задача о назначениях и т. д. Однако и здесь могут потребоваться более точные и специфичные модели для исследования возможности использования системы в конкретном месте и в конкретное время.

В связи с широким внедрением микропроцессорной техники, микроЭВМ, ЭВМ для управления ТП появляется необходимость широкого использования моделей управления. Это ММ, лежащие в основе алгоритмов управления данной ТС. Такая модель строится на основе модели функционирования системы и предполагает расчленение ТП на последовательно-параллельные ветви с пространственно-временным разделением функций каждой из них и соответствующим точным согласованием во времени. Назначение такой модели заключается в том, что она позволяет рационально распределить средства управления внутри ТС. Модель управления позволяет, кроме того, выявить аварийные режимы функционирования ТС и предусмотреть своевременное автоматическое выключение ее при необходимости. Потребности разработки моделей управления выходят далеко за рамки традиционной теории оптимального управления, предполагающей возможность описания ТП системой обыкновенных дифференциальных уравнений и получение оптимального решения в достаточно узком смысле. Совершенно не разработаны, например, вопросы применения дискретных управляющих воздействий, что характерно для цифровых средств управления. Следует ожидать, по-видимому, что применение вычислительной техники в управлении ТП будет стимулировать разработку нового класса ММ управления. Уместно упомянуть и об эксплуатационных моделях ТС. Это прежде всего модель надежности ТС, анализ которой позволяет регламентировать время ее работы, графики ремонтов и профилактических мероприятий, учитывать естественные деградационные процессы. Следует также упомянуть модель морального старения ТС. Прогноз морального старения может быть осуществлен на основе модели, полученной методом дисперсных оценок.

Общее рассмотрение вопросов проектирования ТС с позиций системного подхода выявляет, таким образом, необходимость использования при описании, анализе и синтезе ТС весьма широкого круга ММ различного назначения.

## 2.2. Методы имитационного моделирования производства ЭС

Построение адекватных моделей технологических операций (ТО) является основой описания ТС, предпосылкой для создания АСУ ТП, гибких автоматизированных производственных систем (ГАПС) и выполняется в процессе предпроектного обследования действующих производств. Для осуществления ТО необходимо обеспечить своевременное наличие на соответствующем рабочем месте комплектующих изделий, материалов, энергии, технологического оснащения и управляющих воздействий. Так, при производстве микроэлектронных приборов и ИС совокупность физико-химических процессов внутри технологической установки состоит в преобразовании входных потоков энергии и вещества. Для обеспечения требуемых физико-химических превращений на границе и в объеме твердой фазы и выходных параметров изделий необходимо этими потоками управлять (рис. 2.1, а).



**Рис. 2.1.** Физическая (а) и кибернетическая (б) модели технологической операции

При анализе и синтезе ТП и систем с целью выбора их оптимальных параметров для получения надлежащего количества и эффективности в центре внимания находятся управляющие воздействия. При этом считают, что материальные и энергетические потоки, как и готовность средств технологического оснащения, а также квалифицированная деятельность персонала являются необходимым, всегда выполняемым условием. Это приводит к кибернетическому представлению отдельной операции в виде некоторого нормально функциони-

рующего «черного ящика» (рис. 2.1, б); при этом внутреннее содержание, схема этого «черного ящика» не рассматриваются, основное внимание обращается на входную и выходную информацию о существенных факторах. В соответствии с этим ММ операции должна в количественной форме отражать реальные взаимосвязи между входными и выходными характеристиками изделия, геометрическими параметрами заготовок, электрофизическими характеристиками исходных материалов, параметрами комплектующих изделий, режимами технологического оборудования, параметрами инструмента и др. *Полнота и детальность математического описания реальных воздействий, состояния оборудования и выходных параметров изделия зависят от типа и уровня рассматриваемой технологической задачи.* В простейшем случае может оказаться вполне достаточным использовать алгебраические соотношения между числовыми значениями нескольких параметров, а в наиболее сложных – привлекать последние достижения новейших разделов математики.

Среди применяемых моделей наиболее общей является описание состояния объекта моделирования (в данном случае операции) конечномерным вектором  $Y$  определенных функциональных или числовых компонентов, называемых выходом системы или вектором отклика. Всякая ТО определяет вектор отклика в зависимости от воздействующих факторов, поэтому ее математическая модель должна содержать как математическое описание этих факторов, так и математическое описание соответствующих взаимосвязей между откликом и воздействующими факторами. В общем случае воздействие, как и отклик, описывается конечномерными векторами определенных функциональных или числовых компонентов, а реализуемые при выполнении ТО взаимосвязи между воздействием и откликом – соответствующими функциями.

При математическом моделировании ТО реальные воздействия делят на три группы факторов. *Первая* группа составляет  $k$ -мерный вектор  $X$  входных управляемых параметров – функций времени и пространственных координат, то есть таких, которые можно измерять и целенаправленно изменять их распределение во времени и в рабочем объеме, поддерживая при этом заданный технологический режим. Часто вектор  $X$  называют вектором управления или просто вектором факторов; область его возможных значений – множеством допустимых управлений или факторным пространством, а его составляющие – управлениями или факторами.

*Вторая* группа образует  $m$ -мерный вектор  $Z$  контролируемых, но неуправляемых функций, характеризующих состояние исходных факторов (например, чистота материалов, поступающих на операцию формирования тонких пленок) и операции в целом. Они не поддаются целенаправленному изменению в пределах данной операции.

*Третья* группа составляет  $p$  мерный вектор  $W$  неконтролируемых функций, а, следовательно, и неуправляемых параметров операции. Сюда относятся параметры, оказывающие недетерминированные возмущающие воздействия на ТО.

Таким образом, построить ММ технологической операции означает определить математические соотношения между всеми указанными векторами  $M_0[Y, X, W, Z]=0$  или предпочтительно в явном виде  $Y = M_Y[X, W, Z]$ .

Общие математические соотношения, связывающие пространственно-временные описания всех участвующих в ТО явлений, оказываются излишне сложными, что затрудняет их практическое использование. Поэтому на современном этапе развития математической теории технологии чаще всего прибегают к упрощенному моделированию, выбирая сложность модели из практических соображений. Построение простой ММ, достаточно точно описывающей ТО как элемент сложного комплекса, в большой степени зависит от опыта разработчика. Основой работы, особенно на первых порах, может явиться овладение типовыми ММ. Рассмотрим последовательность упрощенных описаний ТО.

Всякая ТО протекает во времени и в пространстве, поэтому как характеризующие ее состояние параметры  $Y$ , так и характеризующие различные воздействия внешней среды параметры  $X, W, Z$ , должны отражать изменчивость соответствующих величин как при изменении времени, так и при разных значениях пространственных координат.

Если для поставленной технологической задачи существенна зависимость параметров ТО и от времени, и от пространственных координат, приходим к наиболее сложной *динамической модели с распределенными параметрами*. При этом в каждый фиксированный момент времени состояние объекта и внешней среды характеризуется значениями параметров в бесконечном числе точек пространства, а сами эти параметры подчиняются системам нелинейных интегродифференциальных уравнений в частных производных. Иногда моде-

ли с распределенными параметрами удастся приближенно свести к моделям с сосредоточенными параметрами.

Если пространственное распределение параметров постоянно или для рассматриваемой задачи несущественно, то важно учитывать изменчивость во времени как внешних воздействий, так и описываемого «черного ящика». Например, в гибких ТП приходим к *динамической модели с сосредоточенными параметрами*. При этом в каждый фиксированный момент времени состояние объекта и внешней среды характеризуется конечным числом параметров, подчиняющихся в общем случае системам нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Аналогично тому, как производится дискретизация непрерывных пространственных координат в случае систем с распределенными параметрами, при описании динамических систем с непрерывным временем возможно упрощение модели путем перехода к дискретному времени. Разностные уравнения, определяющие значения переменных в дискретные моменты времени, выводятся из соответствующих уравнений, представляющих эти переменные в непрерывном времени.

Если режимы оборудования после наладки при проведении операции неизменны, в частности отсутствует подналадка, а внешние воздействия изменчивы во времени, получим *стационарную систему уравнений*, то есть с *постоянными коэффициентами*.

Если в ТО существенные факторы во времени не изменяются или их изменение для рассматриваемой задачи несущественно, приходим к *стационарной статической модели*. При этом состояние объекта и внешней среды для любого момента времени описывается конечным числом параметров, связанных между собой алгебраическими уравнениями.

Для ТО, у которой параметры изменяются во время ее выполнения, в частности при наличии подналадки технологического оборудования или оснастки, это будут *нестационарные уравнения*, то есть с коэффициентами, плавно или скачкообразно изменяющимися во времени.

Дополняя отмеченные ранее распределенность параметров и нестационарность, укажем, что нелинейность уравнений отражает зависимость модели от значений учитываемых параметров, наличие интегралов в уравнениях отражает влияние на ТО эффектов накопления вещества или энергии, наличие производных – влияние значений скоростей и ускорений учитываемых параметров.

Как мы уже отмечали, обоснованное исключение из модели одной или нескольких особенностей, то есть пренебрежение при построении ММ теми или иными реальными свойствами ТО, является способом получения приближенного математического описания ТО.

Из многообразия приближенных ММ реальных объектов в технических науках особое место занимают линейные модели. *Линейной* называется модель, обладающая так называемым свойством аддитивности по воздействию, то есть реакция на сумму воздействий равна сумме реакций этой модели на каждое слагаемое. Линейные модели описываются линейными уравнениями.

Все рассмотренные ранее системы соответствующих уравнений с достаточной для каждого случая полнотой описывают реальные ТО. В пределах одинаковой полноты описания однотипные ММ различных ТО будут отличаться порядком уравнений и значениями соответствующих коэффициентов в этих уравнениях, поэтому для сравнения различных ТО достаточно сравнивать упорядоченные последовательности коэффициентов. Более того, каждая ММ с исчерпывающей полнотой описывается упорядоченным набором коэффициентов соответствующих уравнений при заданных начальных условиях. Такое представление свойств ММ не единственно, а во многих задачах анализа и синтеза соответствующих ТО широко используются более удобные формы их описания.

Во многих случаях наглядно представление свойств ТО на основе решения соответствующих уравнений при вполне определенных типовых воздействиях на моделируемый объект. Другими словами, удобно сравнивать различные моделируемые объекты по величине и характеру их реакции на «пробное» – типовое по форме и стандартное по величине – воздействие. Особенно это целесообразно при анализе и синтезе стационарных линейных динамических объектов. Если в качестве пробного воздействия использовать одиночный скачок величины входного воздействия, то изменение выходного параметра различных ТО будет различным, ТО можно сравнивать по таким реакциям на одинаковые воздействия.

Реакция анализируемого объекта на единичный скачок носит специальное название – *переходная характеристика объекта*. *Переходная характеристика* ТО может быть вычислена, если при решении описывающей ее системы уравнений подставить в виде компонента внешнего воздействия единичный скачок.

Другим часто используемым «пробным» воздействием является кратковременное ударное воздействие, математической идеализацией которого является дельта-функция. Реакция анализируемого объекта на дельта-функцию называется его *импульсной переходной характеристикой*.

Если в качестве «пробного» использовать гармоническое колебание внешнего воздействия единичной амплитуды, то реакция стационарного линейного объекта также является гармоническим колебанием той же частоты, а изменения амплитуды и фазы этого колебания зависят от свойств этого объекта.

Функции, описывающие зависимость амплитуды и фазы выходного колебания от частоты синусоидального выходного колебания единичной амплитуды, называется соответственно амплитудно- и фазочастотными характеристиками данного объекта; именно они определяют комплексную функцию частоты, называемую передаточной функцией данного объекта.

Поскольку все названные характеристики, начиная с упорядоченного набора коэффициентов, однозначно характеризуют стационарные линейные объекты, они взаимосвязаны известными преобразованиями. Наиболее широко используется математическая идеализация реальных объектов, представляющая их линейными динамическими системами.

Технологический процесс производства ЭА может содержать заготовительные, обрабатывающие, сборочные, испытательные и контрольно-разбраковывающие операции, каждая из которых описывается своей ММ.

Для количественного описания ТП необходимо определить взаимосвязи между его контролируемыми параметрами, то есть построить ММ процесса в целом. При этом удобно составить обобщенную структурную схему ТП или исследуемой его части (рис. 2.2). Среди множества разнообразных ТП можно выделить типовые:

– простейшая *последовательная* структура (рис. 2.2, а), например, сборка и монтаж ПП, где в каждой операции выпускается только одно изделие и оно же (возможно, вместе с исходными) обрабатывается на последующей операции, двойные стрелки символизируют многопараметричность (векторный характер) описания входных и выходных изделий;

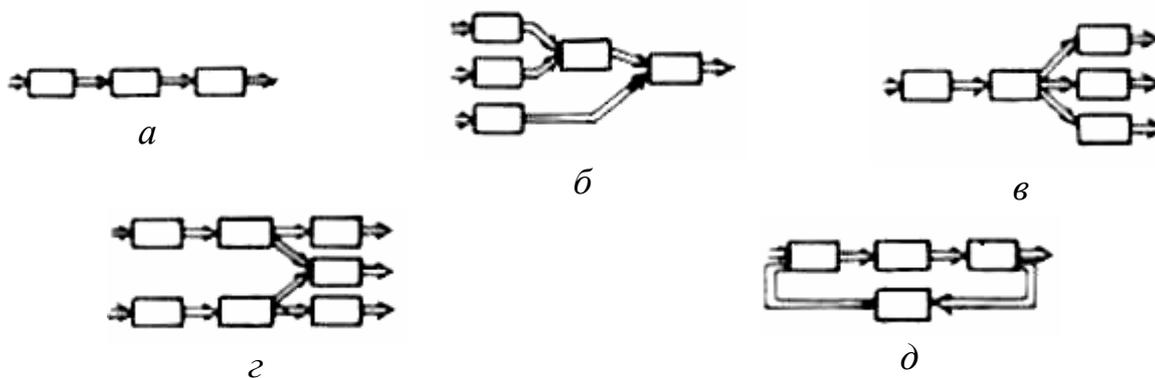
– *сходящаяся* структура (рис. 2.2, б), где в каждой операции опять-таки выпускается только одно изделие, но использоваться мо-

гут продукты нескольких предшествующих операций. Например, при изготовлении интегральных тонкопленочных схем результаты операций очистки подложки и подготовки масок используются затем в одной операции – нанесении пленки на подложку;

– *расходящаяся* структура (рис. 2.2, в), где операции типа разборки, сортировки, разделения используют одно из ранее выпускаемых изделий, но выпускают несколько. Например, после операции разбраковки изделий на несколько групп для селективной сборки каждая из групп деталей идет дальше на свою операцию сборки;

– *сходящаяся-расходящаяся* (параллельная) структура (рис. 2.2, г), где одна и та же операция выполняется параллельно на ряде однотипных рабочих мест, а затем их выходные изделия объединяются в единую партию для последующего использования. Например, изготовление одинаковых деталей на нескольких станках с последующим их использованием в одном сборочном узле;

– *структура с реверсом* (материальной обратной связью), где могут использоваться изделия, выпускаемые на последующих операциях (рис. 2.2, д). Примером такой структуры может служить ТП многослойной металлизации.



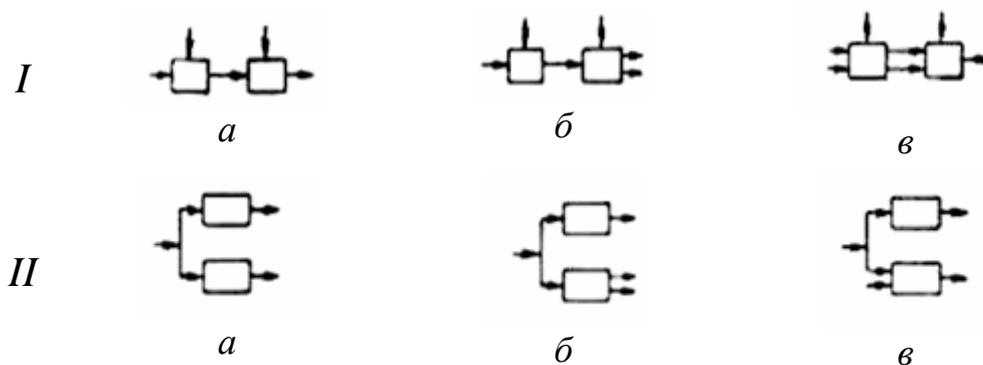
**Рис. 2.2.** Структурные схемы технологических процессов:

*а* – последовательная; *б* – сходящаяся; *в* – расходящаяся,  
*г* – параллельная; *д* – с обратной связью

При использовании ЭВМ необходимы формализованные модели связи элементов ТП. Эти модели можно представить в виде схем сопряжения, соединяющих входы и выходы элементов (рис. 2.3).

В тех немногих случаях, когда для относительно простых ТП удастся получить в явном виде аналитические выражения для их операторов или передаточных функций, говорят о получении *аналитической модели*. Однако в большинстве случаев ограничиваются *алго-*

*ритмическими моделями*, которые представляют собой сложные алгоритмические заданные функции многих переменных исходных данных, реализуемые на ЭВМ. Алгоритм вычисления подобных функций строится на сочетании традиционных аналитических форм ТО с логическими процедурами, отражающими взаимосвязи этих операций, например в виде операторов их сопряжений.



**Рис. 2.3.** Типы связей моментов для последовательных (I) и параллельных (II) схем:  
*a* – простейшая – простейшая; *б* – простейшей – расхождение;  
*в* – простейшая – схождение

Для анализа и синтеза ТП сборки и монтажа ЭА, оптимизации их структуры и принципов управления широкое распространение получил *метод статистического моделирования*. Его сущность состоит в создании специального алгоритма, реализуя который на ЭВМ, можно воспроизвести процесс по элементам (правда, в формализованном виде) с сохранением логической структуры и последовательности протекания процесса. В этом случае все реальные операции с их физико-химическим содержанием заменяются абстрактными, выполняющими функции преобразователя параметров изделий. Абстрактная операция сборки представляет собой такой элемент ТП над совокупностью полуфабрикатов (одного ведущего и нескольких ведомых), в результате которого изменяются значения хотя бы одного из параметров ведущего полуфабриката (за счет присоединения к нему ведомых), а соответствующие ведомые полуфабрикаты прекращают свое существование.

**Метод статистического моделирования** включает четыре этапа.

1. *Составление содержательного описания процесса.* Оно проводится на основе обстоятельного изучения процесса при выполнении натурального эксперимента на реально существующей аппаратуре и обо-

рудования, а также фиксации количественных характеристик. При отсутствии реального объекта используются накопленный опыт и результаты наблюдений за процессами аналогичного назначения. Содержательное описание позволяет составить ясное представление о физической природе и количественных характеристиках ТП; расчленить ТП на ТО и простейшие элементы, определить их показатели и параметры; составить схему взаимодействия элементов в операции, а операций в ТП; определить закономерности изменения показателей процесса при изменении его параметров в виде таблиц и графиков; сформулировать постановку задачи, значение начальных условий.

2. *Построение формализованной схемы.* На этом этапе уточняются количественные характеристики ТП, и дается строгое математическое определение всех зависимостей между показателями и параметрами ТП, его отдельных элементов. Полученные на предыдущем этапе экспериментальные данные подвергаются систематизации с учетом случайного характера их получения. В инженерной практике случайными объектами являются случайные события (появление брака, отказ оборудования), случайные величины (длительность операции, отклонения параметров качества, колебания режимов) и случайные функции (флуктуации характеристик во времени). При формализации различают случайные события, случайные величины и случайные функции. Случайные события задаются с помощью вероятностей или частотой их появления, случайные величины – законами распределения или их числовыми характеристиками: средним значением, среднеквадратическим отклонением, корреляционными моментами, а случайные функции – средними значениями и корреляционными функциями. В заключение устанавливается точная математическая формулировка задачи исследования.

3. *Составление моделирующего алгоритма* проводится на основе построенной ММ. Для преобразования формализованной схемы в ММ необходимо, воспользовавшись готовыми математическими схемами (случайное событие, система массового обслуживания и т. д.), записать в аналитической форме все соотношения, которые еще не были записаны, выразить логические условия в виде систем неравенств, а также придать аналитическую форму всем другим сведениям, имеющимся в формализованной схеме. Числовой материал для удобства обработки на ЭВМ используется не в первоначальном виде, а в форме аппроксимирующих функций. Моделирующие алго-

ритмы чаще всего представляются в виде схемы, где каждый блок изображает достаточно крупную группу элементов ТП, а связи между блоками отражают логическую структуру ТП. Схема алгоритма не учитывает особенностей системы команд ЭВМ, они вводятся при построении развернутых схем счета и программировании. Основными видами операторов, которые используются для реализации схем при статистическом моделировании, являются арифметические, логические, формирования случайных событий, формирования неслучайных событий и окончания вычислений.

4. *Разработка методики решения задачи и использование результатов моделирования.* Методика решения задачи определяется целью исследования. Количество реализаций процесса моделирования рассчитывается, исходя из заданной точности представления результатов. Полученные данные справедливы при фиксированных значениях параметров процесса, входной информации и начальных условиях.

Для формализованного представления сложных многовариантных ТП, содержащих множество ТО, которые, возможно, могут быть выполнены на различных сочетаниях оборудования, весьма перспективны так называемые сетевые модели.

### **2.3. Факторный анализ**

Математическая модель технологического процесса описывает связь между выходными и первичными параметрами процесса. Выходной параметр называют *целевой функцией* или *функцией отклика*, а геометрический образ, соответствующий этой функции, – *поверхностью отклика*. Независимые переменные величины, влияющие на функцию отклика, являются *первичными факторами*, или *входными параметрами*. Координатное пространство, по осям которого отложены первичные параметры, представляют собой *факторное пространство*.

В качестве *выходного параметра* может быть принята надежность, процент выхода годных деталей, точность, прочность соединения и др. Во всех случаях параметр оптимизации должен задаваться количественно, существовать для всех значений, которые могут принимать первичные факторы и измеряться с требуемой точностью.

Технологический процесс (операция) может иметь несколько выходных параметров. В этих случаях выбирают наиболее важные из них.

*Первичные параметры* должны быть управляемыми и независимыми, то есть давать возможность устанавливать и поддерживать их значения на определенном уровне независимо от значения других факторов. Они должны иметь четкий метрологический смысл и измеряться с требуемой точностью.

Перечень входных параметров зависит от целей исследования. Однако во всех случаях он должен быть практически целесообразным, то есть включать только те важнейшие параметры, которые наиболее существенно влияют на параметр оптимизации.

Обширный перечень варьируемых параметров не дает возможности получить простую и наглядную математическую модель и затрудняет проведение оценки влияния исходных факторов на параметр оптимизации. При большом числе (более 7) их необходимо ограничить, выделив из общей совокупности наиболее существенные (критичные). При отсеивании несущественных факторов очень важно не отнести к их числу значимые, так как от их правильного выбора зависит успех оптимизации. Для отсеивания несущественных параметров наиболее часто применяют *метод случайного баланса* (отсеивающего эксперимента) или *априорного ранжирования* (ранговой корреляции).

Функция связи между первичными ( $x$ ) и выходными параметрами  $y_j$ , ( $j=l, \dots, m$ ) определяется полиномами:

– линейным

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i;$$

– неполным квадратичным

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i \neq k}^{C_n^2} b_{ik} x_i x_k + \sum_{i \neq k \neq h}^{C_n^3} b_{ikh} x_i x_k x_h;$$

– полным квадратичным

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i \neq k}^{C_n^2} b_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2.$$

Путем проведения методов активного эксперимента можно достигнуть такого уровня знаний свойств системы, чтобы иметь возможность предсказать изменение параметров при любом изменении

входных параметров и определить их оптимальную область. При этом обычно ограничиваются представлением функциональной зависимости в виде линейного или неполного квадратичного полинома. Однако точность даже таких упрощенных математических моделей достаточно высока (-10 %). Кроме того, активный эксперимент является единственным методом, позволяющим найти функциональную связь между первичными и выходными параметрами с учетом эффекта взаимодействия. При этом существенно сокращаются сроки решения задачи, снижаются затраты на исследования и повышается качество полученных результатов.

Общим условием применимости методов активного эксперимента является воспроизводимость результатов. Поэтому, прежде чем приступить к планированию эксперимента, необходимо убедиться в том, что опыты воспроизводимы. Для этого проводят несколько параллельных опытов в рассматриваемой области изменения влияющих факторов и проверяют их воспроизводимость по критерию Кохрена.

Если объект исследования по техническим, технологическим или экономическим соображениям не допускает преднамеренного варьирования входных переменных в необходимом диапазоне, то для накопления статистического материала применяется пассивный эксперимент, заключающийся в наблюдении и регистрации значений входных \ выходных переменных в режиме нормального функционирования исследуемого объекта.

Применение метода пассивного эксперимента может быть успешным, если при его проведении соблюдаются необходимые условия, к которым относятся такие, как правильное определение времени регистрации данных, обеспечение независимости соседних измерений и входных переменных друг от друга, достаточный с точки зрения математической статистики объем экспериментальных данных.

Под **экспериментом** будем понимать метод научного исследования, когда исследователь активно и целенаправленно воздействует на объект исследования путем создания искусственных условий или использования естественных с целью получения информации о его свойствах.

Важнейшей **задачей** методов обработки, полученной в ходе эксперимента информации, является задача построения математической модели изучаемого явления, процесса, объекта. Ее можно использовать и при анализе процессов, и при проектировании объектов. Другой задачей обработки полученной в ходе эксперимента инфор-

мации является задача оптимизации, то есть нахождения такой комбинации влияющих независимых переменных, при которой выбранный показатель оптимальности принимает экстремальное значение.

**Планирование эксперимента** – выбор плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям, совокупность действий, направленных на разработку стратегии экспериментирования (от получения априорной информации до получения работоспособной математической модели или определения оптимальных условий). Это целенаправленное управление экспериментом, реализуемое в условиях неполного знания механизма изучаемого явления.

Под **планом эксперимента** – понимается совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов. Под словом опыт в данном случае имеется в виду отдельная, элементарная часть эксперимента. Соответственно, понятие «планирование эксперимента», определяемое как процесс разработки плана эксперимента, включает в себя все, что делается по разработке стратегии экспериментирования от начальных до заключительных этапов изучения объекта исследования, то есть от получения априорной информации до создания работоспособной математической модели объекта исследования или определения оптимальных условий. Планирование способствует значительной интенсификации труда исследователя и сокращению затрат на эксперимент, повышению достоверности полученных результатов исследования.

Основным **математическим аппаратом** теории планирования эксперимента является теория вероятностей и математическая статистика.

Многомерное **факторное пространство** – это множество точек, каждая из которых соответствует определенной комбинации факторов. Область возможных комбинаций факторов называется областью возможных (допустимых) планов эксперимента.

Вектор, образуемый выходными параметрами – характеристиками свойств или качеств объекта, называют **откликом**, а зависимость отклика от рассматриваемых факторов – **функцией отклика**. Геометрическое представление функции отклика в факторном пространстве называют **поверхностью отклика**. Функцию отклика называют также **целевой функцией**, имея в виду, что при планировании эксперимента с целью нахождения оптимальных условий она является критерием оптимальности.

Планирование эксперимента проводится в несколько **этапов**:

– постановка задачи (определение цели эксперимента, выяснение исходной ситуации, оценка допустимых затрат времени и средств, установление типа задачи);

– сбор априорной информации (получение литературы, опрос специалистов и т.п.);

– выбор способа решения и стратегии его реализации (установление типа модели, выявление возможных влияющих факторов, выявление выходных параметров, выбор целевых функций, создание необходимых нестандартных технических средств, формулировка статистических задач, выбор или разработка алгоритмов программ обработки экспериментальных данных).

Основными **концепциями** современного подхода к организации эксперимента являются рандомизация, многофакторность и автоматизация.

Сущность **рандомизации** состоит в следующем. Любое экспериментальное исследование проводится, как правило, в условиях действия систематических ошибок и факторов, которые трудно поддаются учету и контролю. При традиционном подходе к эксперименту исследователи нередко пытаются отделить изучаемое явление от мешающих факторов, как это можно сделать в детерминированных объектах с хорошо изученной структурой. Очевидно, что в недетерминированных объектах с огромным количеством случайных факторов ценность эксперимента, проведенного в особых условиях, не может быть высокой.

Концепция **рандомизации** предлагает принципиально новый подход к организации выборочных данных эксперимента. План эксперимента составляется таким образом, чтобы рандомизировать, то есть сделать случайными в пространстве и во времени, систематически действующие мешающие факторы. Тогда эти факторы можно рассматривать как случайные величины и, следовательно, учесть статистически их влияние в значении ошибки эксперимента. Иными словами, в противоположность традиционному подходу к эксперименту со стремлением стабилизировать мешающие факторы рандомизация внесла концепцию случая в эксперимент.

Принцип **многофакторности** отражает новый подход к эксперименту в задачах с многими факторами. При изучении объектов с несколькими факторами согласно этому принципу исследователю предлагается ставить опыты так, чтобы варьировать все факторы сразу

в отличие от традиционного подхода, когда исследователь пытается изучать действие каждого фактора при поочередном варьировании. Организация эксперимента с применением многофакторных схем варьирования позволяет повысить точностью оценок параметров подбираемых моделей для недетерминированных объектов, точнее оценить чувствительность выходной зависимой переменной объекта к вариации изучаемых входных независимых переменных.

Развитие технических программных средств вычислительной техники дает возможность говорить о новой концепции в организации научных исследований – **автоматизации** эксперимента. Технические средства вычислительных комплексов позволяют на качественно новом уровне по точности, быстродействию и наглядности решать задачи сбора, переработки и отображения информации. Программные средства предоставляют исследователю новые возможности организации процесса анализа данных, создания автоматически управляемой последовательности процедур анализа, использования интерактивного режима работы с пакетами прикладных программ.

Среди основных **методов планирования**, применяемых на разных этапах исследования, используют следующее:

- планирование отсеивающего эксперимента, основное значение которого выделение из всей совокупности факторов группы существенных факторов, подлежащих дальнейшему детальному изучению;
- планирование эксперимента для дисперсионного анализа, то есть составление планов для объектов с качественными факторами;
- планирование регрессионного эксперимента, позволяющего получать регрессионные модели (полиномиальные и иные);
- планирование экстремального эксперимента, в котором главная задача – экспериментальная оптимизация объекта исследования;
- планирование при изучении динамических процессов и т.д.

### ***Полный факторный эксперимент типа $2^k$***

Первый этап планирования эксперимента для получения линейной модели основан на варьировании факторов на двух уровнях. В этом случае, если число факторов известно, можно сразу найти число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов по формуле:

$$N=2^k,$$

где  $N$  – число опытов,  $k$  – число факторов, 2 – число уровней.

*Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом.*

Если выбранная модель включает только линейные члены полинома и их произведения, то для оценки всех параметров модели используется план эксперимента с варьированием всех факторов на двух уровнях. Такие планы принято называть планами типа  $2^n$ , где  $2^n=N$  – число всех возможных опытов,  $n$  – количество варьируемых факторов.

Полный факторный эксперимент может быть предложен исследователю как один из способов построения математической модели (идентификации) недетерминированного объекта. Этот способ оказывается наиболее предпочтительным в тех случаях, когда отсутствует априорная информация для обоснования структуры модели с позиций физико-химических представлений процессов, происходящих в объекте, отсутствует количественная оценка степени влияния изучаемых факторов на выходную переменную объекта, его выходной показатель.

В планировании эксперимента используются кодированные значения факторов: +1 и –1 (часто для простоты записи единицы опускают). Условия эксперимента можно записать в виде таблицы, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы – значениям факторов. Будем называть такие таблицы *матрицами (репликами) планирования эксперимента*.

Матрица планирования  $2^2$  для двух факторов показана в следующей таблице:

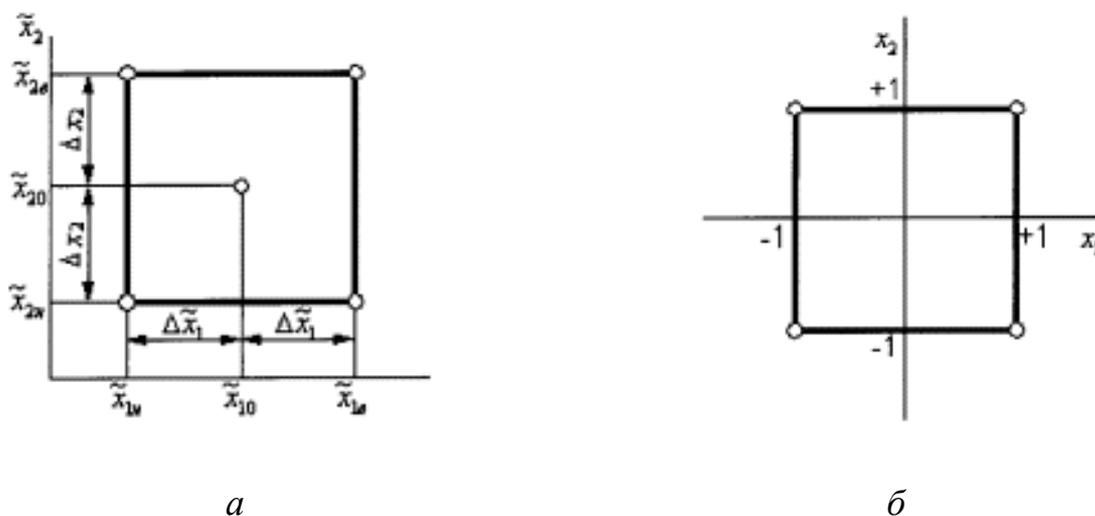
Номер опыта	Матрица планирования		Выход Y
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	
1	–1	–1	y <sub>1</sub>
2	+1	–1	y <sub>2</sub>
3	–1	+1	y <sub>3</sub>
4	+1	+1	y <sub>4</sub>

Каждый столбец в матрице планирования называют вектор-столбцом, а каждую строку – вектор-строкой.

Таким образом, мы имеем два вектора-столбца независимых переменных и один вектор-столбец параметра оптимизаций. То, что записано в этой таблице в алгебраической форме, можно изобразить геометрически. Найдем в области определения факторов точку, соответствующую основному уровню, и проведем через нее новые оси

координат, параллельные осям натуральных значений факторов. Далее, выберем масштабы по новым осям так, чтобы интервал варьирования для каждого фактора равнялся единице. Тогда условия проведения опытов будут соответствовать вершинам квадрата, центром которого является основной уровень, а каждая сторона параллельна одной из осей координат и равна двум интервалам (рис. 2.4). Номера вершин квадрата соответствуют номерам опытов в матрице планирования. Площадь, ограниченная квадратом, называется областью эксперимента. Иногда удобнее считать областью эксперимента площадь, ограниченную окружностью, описывающей квадрат. В задачах интерполяции область эксперимента есть область предсказываемых значений  $y$ .

На рис. 2.4 показан в факторном пространстве симметричный двухуровневый план для двухфакторной функции отклика  $y=f(x_1x_2)$  при нейтральном (рис. 2.4, а) и нормированном (рис. 2.4, б) представлении уровней факторов. Здесь  $\tilde{x}_{10}, \tilde{x}_{20}$  – искомые натуральные уровни факторов,  $\tilde{x}_{1*}, \tilde{x}_{2*}(-1,+1)$  – нижние,  $\tilde{x}_{1*}, \tilde{x}_{2*}(-1,+1)$  – верхние уровни,  $\Delta\tilde{x}_1, \Delta\tilde{x}_2$  – интервалы варьирования.



**Рис. 2.4.** Симметричный двухуровневый план для двухфакторной функции в факторном пространстве

Для движения к точке оптимума нам нужна линейная модель  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ . Наша цель – найти по результатам эксперимента значения неизвестных коэффициентов модели. Эксперимент проводится для проверки гипотезы о том, что линейная модель  $\eta = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2$  адекватна. Греческие буквы использованы для обозначения «истинных» генеральных значений соответствующих неиз-

вестных. Эксперимент, содержащий конечное число опытов, позволяет только получить выборочные оценки для коэффициентов уравнения  $y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k$ . Их точность и надежность зависят от свойств выборки и нуждаются в статистической проверке.

После проведения опытов во всех точках факторного пространства необходимо найти коэффициенты уравнения регрессии. Формулы для вычисления коэффициентов:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i;$$

$$b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{1i} Y_i;$$

$$b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{2i} Y_i$$

или в общем виде  $b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ji} Y_i, j = \overline{0, k}$ .

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак плюс, то с увеличением значения фактора параметр оптимизации увеличивается, а если минус, то уменьшается. Величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в величину параметра оптимизации при переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний.

Иногда удобно оценивать вклад фактора при переходе от нижнего к верхнему уровню. Вклад, определенный таким образом, называется эффектом фактора (иногда его называют основным или главным эффектом). Он численно равен удвоенному коэффициенту. Для качественных факторов, варьируемых на двух уровнях, основной уровень не имеет физического смысла. Поэтому понятие «эффект фактора» является здесь естественным.

Планируя эксперимент, на первом этапе мы стремимся получить линейную модель. Однако у нас нет гарантии, что в выбранных интервалах варьирования процесс описывается линейной моделью. Существуют способы проверки пригодности линейной модели. А если модель нелинейна, как количественно оценить нелинейность, пользуясь полным факторным экспериментом?

Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с тем, что эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. В этом случае говорят, что имеет место эффект взаи-

модействия двух факторов. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбец произведения двух факторов. При вычислении коэффициента, соответствующего эффекту взаимодействия, с новым вектор-столбцом можно обращаться так же, как с вектор-столбцом любого фактора. Для полного факторного эксперимента  $2^2$  матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия представлена в табл. Очень важно, что при добавлении столбцов эффектов взаимодействий все рассмотренные свойства матриц планирования сохраняются.

Матрица планирования эксперимента  $2^2$  с учетом взаимодействия факторов

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y$
1	+1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	+1	-1	-1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	+1	+1	$y_4$

Теперь модель выглядит следующим образом:

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2.$$

Коэффициент  $b_{12}$  вычисляется обычным путем.

Столбцы  $x_1$  и  $x_2$  задают планирование – по ним непосредственно определяются условия опытов, а столбцы  $x_0$  и  $x_1x_2$  служат только для расчета.

Обращаем ваше внимание на то, что при оптимизации мы стремимся сделать эффекты взаимодействия возможно меньшими.

### ***Дробный факторный эксперимент***

Если имеются основания считать, что в выбранных интервалах варьирования процесс может быть описан линейной моделью, то достаточно определить три коэффициента:  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ . Остается одна степень свободы. Употребим ее для минимизации числа опытов. При линейном приближении  $b_{12} \rightarrow 0$  и вектор-столбец  $x_1x_2$  можно использовать для нового фактора  $x_3$ . Поставим этот фактор в скобках над взаимодействием  $x_1x_2$  и посмотрим, каковы будут оценки коэффициентов. Здесь уже не будет тех отдельных оценок, которые мы имели в полном факторном эксперименте  $2^k$ . Оценки смешаются следующим образом:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}.$$

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
1	+1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	+1	+1	+1	$y_2$
3	+1	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	-1	-1	$y_4$

Поставив четыре опыта для оценки влияния трех факторов, мы воспользовались половиной полного факторного эксперимента  $2^3$ , или «полурепликой». Если бы мы  $x_3$  приравняли к  $-x_1x_2$ , то получили бы вторую половину матрицы  $2^3$ . В этом случае:  $b_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{23}$ ;  $b_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{13}$ ;  $b_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{12}$ . При реализации обеих полуреplik можно получить отдельные оценки для линейных эффектов и эффектов взаимодействия, как и в полном факторном эксперименте  $2^3$ .

Объединение этих двух полуреplik и есть полный факторный эксперимент  $2^3$ .

Матрица из восьми опытов для четырехфакторного планирования будет полурепликой от полного факторного эксперимента  $2^4$ , а для пятифакторного планирования – четверть-репликой от  $2^5$ . В последнем случае два линейных эффекта приравниваются к эффектам взаимодействия. Для обозначения дробных реplik, в которых  $p$  линейных эффектов приравнены к эффектам взаимодействия, удобно пользоваться условным обозначением  $2^{k-p}$ . Так, полуреплика от  $2^6$  запишется в виде  $2^{6-1}$ , а четверть-реплика от  $2^5$  – в виде  $2^{5-2}$ .

### ***Генерирующие соотношений и определяющие контрасты***

При построении полуреплики  $2^3$  существует всего две возможности: приравнять  $x_3$  к  $+x_1x_2$  или к  $-x_1x_2$ . Поэтому есть только две полуреплики  $2^{3-1}$ .

Номер опыта	I: $x_3 = x_1x_2$				II: $x_3 = -x_1x_2$			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$-x_1x_2x_3$
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1

Для произведения трех столбцов матрицы I выполняется соотношение:  $+1 = x_1x_2x_3$ , а матрицы II:  $-1 = x_1x_2x_3$ .

Символическое обозначение произведения столбцов, равного +1 или -1, называется определяющим контрастом. Контраст помогает определять смешанные эффекты. Чтобы определить, какой эффект

смешан с данным, нужно помножить обе части определяющего контраста на столбец, соответствующий данному эффекту. Так, для первой полуреплики определяющий контраст  $1=x_1x_2x_3$ , помогает вычислить генерирующие соотношения:  $x_1=x_1^2x_2x_3$ , так как  $x_j^2=1$ , получим  $x_1=x_2x_3$ , аналогично  $x_2=x_1x_2^2x_3=x_1x_3$  и  $x_3=x_1x_2x_3^2=x_1x_2$ .

Для второй полуреплики с помощью определяющего Контраста  $-1=x_1x_2x_3$  будем иметь другие генерирующие соотношения:  $x_1=-x_1x_2x_3=-x_2x_3$ ;  $x_2=-x_1x_2x_3=-x_1x_3$ ;  $x_3=-x_1x_2x_3=-x_1x_2$ .

*Соотношение, показывающее, с каким из эффектов смешан данный эффект, называется генерирующим соотношением.*

Полуреплики, в которых основные эффекты смешаны с двухфакторными взаимодействиями, носят название планов с разрешающей способностью III (по наибольшему числу факторов в определяющем контрасте). Такие планы принято обозначать:  $2_{III}^{3-1}$ .

При выборе полуреплики  $2^{4-1}$  возможно восемь решений:

1.  $x_4=x_1x_2$ ;
2.  $x_4=-x_1x_2$ ;
3.  $x_4=x_2x_3$ ;
4.  $x_4=-x_2x_3$ ;
5.  $x_4=x_1x_3$ ;
6.  $x_4=-x_1x_3$ ;
7.  $x_4=x_1x_2x_3$ ;
8.  $x_4=-x_1x_2x_3$ .

Разрешающая способность этих полуреплик различна. Так, реплики 1 – 6 имеют по три фактора в определяющем контрасте, а 7 – 8 по четыре. Реплики 7 и 8 имеют максимальную разрешающую способность и называются главными. Разрешающая способность задается системой смешивания данной реплики. Она будет максимальной, если линейные эффекты смешаны с эффектами взаимодействия наибольшего возможного порядка.

При отсутствии априорной информации об эффектах взаимодействия экспериментатор стремится выбрать реплику с наибольшей разрешающей способностью, так как тройные взаимодействия обычно менее важны, чем парные. Если существует информация об эффектах взаимодействия, то она должна использоваться при выборе реплики.

Реплики, в которых нет ни одного главного эффекта, смешанного с другим главным эффектом или парным взаимодействием, а все парные взаимодействия смешаны друг с другом, носят название планов

с разрешающей способностью IV (по наибольшему числу факторов в определяющем контрасте). Они имеют обозначение  $2_{VI}^{4-1}$ . Полуреплика, заданная определяющим контрастом  $I=+x_1x_2x_3x_4$ , имеет только четные комбинации букв в каждой строке. Ее можно записать следующим образом, считая строку (1) четной:

(1), *ad, bd, ab, ac, cd, bc, abcd*.

А полуреплика, заданная  $I = - x_1x_2x_3x_4$  имеет только нечетные комбинации *a, b, c, d, abd, acd, abc, bcd*.

Такие полуреплики называют главными полурепликами, так как они обладают наибольшей разрешающей способностью.

Пусть выбраны полуреплики, заданные определяющими контрастами  $I=+x_1x_2x_3x_4$  и  $I = - x_1x_2x_3x_4$ . Совместные оценки здесь определяются соотношениями:

- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 1. $x_1 = x_2x_3x_4$ | $x_1 = -x_2x_3x_4$ |
| 2. $x_2 = x_1x_3x_4$ | $x_2 = -x_1x_3x_4$ |
| 3. $x_3 = x_1x_2x_4$ | $x_3 = -x_1x_2x_4$ |
| 4. $x_4 = x_1x_2x_3$ | $x_4 = -x_1x_2x_3$ |
| 5. $x_1x_2 = x_3x_4$ | $x_1x_2 = -x_3x_4$ |
| 6. $x_1x_3 = x_2x_4$ | $x_1x_3 = -x_2x_4$ |
| 7. $x_1x_4 = x_2x_3$ | $x_1x_4 = -x_2x_3$ |

Такой тип смешивания даст возможность оценивать линейные эффекты совместно с эффектами взаимодействий второго порядка, а взаимодействия первого порядка – совместно друг с другом.

Если полуреплики заданы генерирующими соотношениями  $x_4 = x_1x_2$  и  $x_4 = -x_1x_2$ , то в этом случае определяющими контрастами являются  $I=x_1x_2x_4$  и  $I = - x_1x_2x_4$ , следовательно, мы получаем планы с разрешающей способностью III и некоторые основные эффекты смешиваем с парными взаимодействиями:

- |                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. $x_1 = x_2x_4$       | $x_1 = -x_2x_4$       |
| 2. $x_2 = x_1x_4$       | $x_2 = -x_1x_4$       |
| 3. $x_3 = x_1x_2x_3x_4$ | $x_3 = -x_1x_2x_3x_4$ |
| 4. $x_4 = x_1x_2$       | $x_4 = -x_1x_2$       |
| 5. $x_2x_3 = x_1x_3x_4$ | $x_2x_3 = -x_1x_3x_4$ |
| 6. $x_1x_3 = x_2x_3x_4$ | $x_1x_3 = -x_2x_3x_4$ |
| 7. $x_3x_4 = x_1x_2x_3$ | $x_3x_4 = -x_1x_2x_3$ |

Разрешающая способность этих полуреплик ниже, чем у планов с разрешающей способностью IV, с помощью которых линейные эффекты определяются независимо от парных взаимодействий.

Эти полуреплики имеют в каждой строке как четные, так и нечетные комбинации букв. Такие полуреплики не являются главными. Разумен выбор такой полуреплики, если имеется априорная информация о большей значимости тройных взаимодействий по сравнению с парными или о незначимости трех парных взаимодействий  $x_2x_4$ ,  $x_1x_4$ ,  $x_1x_2$ .

Применяя дробное планирование, нужно точно знать систему смешивания, четко представлять, какую информацию приходится терять.

*Выбор 1/4-реплик.* При исследовании влияния пяти факторов можно поставить не 16 опытов, как в предыдущем примере, а только 8, то есть воспользоваться репликой  $2^{5-2}$ . Здесь возможны двенадцать решений, если  $x_4$  приравнять парному взаимодействию, а  $x_5$  – тройному:

- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 1. $x_4 = x_1x_2$   | $x_5 = x_1x_2x_3$  |
| 2. $x_4 = x_1x_2$   | $x_5 = -x_1x_2x_3$ |
| 3. $x_4 = -x_1x_2$  | $x_5 = x_1x_2x_3$  |
| 4. $x_4 = -x_1x_2$  | $x_5 = -x_1x_2x_3$ |
| 5. $x_4 = x_1x_3$   | $x_5 = x_1x_2x_3$  |
| 6. $x_4 = x_1x_3$   | $x_5 = -x_1x_2x_3$ |
| 7. $x_4 = -x_1x_3$  | $x_5 = x_1x_2x_3$  |
| 8. $x_4 = -x_1x_3$  | $x_5 = -x_1x_2x_3$ |
| 9. $x_4 = x_2x_3$   | $x_5 = x_1x_2x_3$  |
| 10. $x_4 = x_2x_3$  | $x_5 = -x_1x_2x_3$ |
| 11. $x_4 = -x_2x_3$ | $x_5 = x_1x_2x_3$  |
| 12. $-x_4 = x_2x_3$ | $x_5 = -x_1x_2x_3$ |

Допустим, выбран пятый вариант:  $x_4 = x_1x_3$  и  $x_5 = x_1x_2x_3$ . Тогда определяющими контрастами являются:  $1 = x_1x_3x_4$  и  $1 = x_1x_2x_3x_5$ .

Если перемножить эти определяющие контрасты, то получится третье соотношение, задающее элементы столбца  $1 = x_2x_4x_5$ . Чтобы полностью охарактеризовать разрешающую способность реплики, необходимо записать обобщающий определяющий Контраст  $1 = x_1x_3x_4 = x_2x_4x_5 = x_1x_2x_3x_5$ .

Система смешивания определяется умножением обобщающего определяющего контраста последовательно на  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и т. д.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_3x_4 = x_1x_2x_4x_5 = x_2x_3x_5; \\ x_2 &= x_1x_2x_3x_4 = x_4x_5 = x_1x_3x_5; \\ x_3 &= x_1x_4 = x_2x_3x_4x_5 = x_1x_2x_5; \\ x_4 &= x_1x_3 = x_2x_5 = x_1x_2x_3x_4x_5; \end{aligned}$$

$$X_5 = X_1X_3X_4X_5 = X_2X_4 = X_1X_2X_3;$$

$$X_1X_2 = X_2X_3X_4 = X_1X_4X_5 = X_3X_5;$$

$$X_1X_5 = X_3X_4X_5 = X_1X_2X_4 = X_2X_3.$$

Получается довольно сложная система смешивания линейных эффектов с эффектами взаимодействия первого, второго, третьего и четвертого порядков. Если, например, коэффициенты  $b_{12}$  и  $b_{15}$  отличны от нуля, то возникают сомнения, можно ли пренебрегать другими парными взаимодействиями, с которыми смешаны линейные эффекты. Тогда следует поставить вторую серию опытов, выбрав нужным образом другую 1/4-реплику.

При этом можно воспользоваться методом «перевала». Смысл этого метода заключается в том, что вторая четверть-реплика получается из первой путем изменения всех знаков матрицы на обратные. Тогда в обобщающем определяющем контрасте тройные произведения имеют знак, противоположный их знаку в первой четверть-реплике. Тройные произведения определяют парные взаимодействия в совместных оценках для линейных эффектов. Усредняя результаты обеих четверть-реплик, можно получить линейные эффекты, не смешанные с парными взаимодействиями.

Для дополнения 1/4-реплики до 1/2-реплики, если есть подозрения, что эффекты взаимодействия первого порядка отличаются от нуля, нужно взять вторую четверть-реплику с обобщающим контрастом, в котором два тройных произведения имеют отрицательный знак, так как тройные произведения определяют парные взаимодействия в совместных оценках для линейных эффектов.

Однако можно представить себе и такой случай, когда целесообразно освободить линейные эффекты от эффектов взаимодействия второго порядка и только часть из линейных эффектов от парных взаимодействий. Тогда нужно выбрать 1/4-реплику таким образом, чтобы в обобщающем определяющем контрасте произведение четырех членов имело отрицательный знак, так как это произведение определяет тройные взаимодействия в совместных оценках для линейных эффектов.

Достоинство принципа насыщения становится более ощутимым с ростом факторов. Например, при изучении 15 факторов имеется возможность проведения 16 экспериментов, вместе  $32768 (2^{15})$ .

### Характеристика дробных реплик

Число факторов	Дробная реплика	Условное обознач.	Число опытов	
			Для дробных реплик	Для ПФЭ
3	1/2 – реплика от $2^3$	$2^{3-1}$	4	8
4	1/2 – реплика от $2^4$	$2^{4-1}$	8	16
5	1/4 – реплика от $2^3$	$2^{5-2}$	8	32
6	1/8 – реплика от $2^5$	$2^{6-3}$	8	64
7	1/16 – реплика от $2^6$	$2^{7-4}$	8	128
5	1/2 – реплика от $2^5$	$2^{5-1}$	16	32
6	1/4 – реплика от $2^6$	$2^{6-2}$	16	64
7	1/8 – реплика от $2^7$	$2^{7-3}$	16	128
8	1/16 – реплика от $2^8$	$2^{8-4}$	16	256
9	1/32 – реплика от $2^9$	$2^{9-5}$	16	512
10	1/64 – реплика от $2^{10}$	$2^{10-6}$	16	1024
11	1/128 – реплика от $2^{11}$	$2^{11-7}$	16	2048
12	1/256 – реплика от $2^{12}$	$2^{12-8}$	16	4096
13	1/512 – реплика от $2^{13}$	$2^{13-9}$	16	8192
14	1/1024 – реплика от $2^{14}$	$2^{14-10}$	16	16384
15	1/2048 – реплика от $2^{15}$	$2^{15-11}$	16	32768

Способ сокращения числа экспериментов можно сформулировать в виде общего правила.

Чтобы сократить число опытов, нужно дополнительно вводимый в эксперимент фактор варьировать как вектор – столбец матрицы, соответствующий взаимодействию, которым можно пренебречь. Тогда изменение уровней нового фактора определится знаками этого вектор – столбца.

При выборе дробных реплик необходимо определить и проанализировать с учетом априорной информации схему замещения оценок коэффициентов модели. С этой целью вычисляют генерирующие соотношения, которые показывают, с каким из эффектов смешан данный эффект.

В задачах с большим числом факторов выбор взаимодействия для насыщения плана решает относительно непросто. Следует помнить, что основное положение при выборе взаимодействий в общем случае состоит в следующем. При введении в эксперимент новых факторов следует выделять им столбцы матрицы, принадлежащие взаимодействиям с более высоким порядком. Так, вводя 4 – й фактор в план  $2^3$ , следует варьировать  $x_4$  как столбец матрицы с взаимодействием

третьего порядка  $x_1x_2x_3$ , то есть  $x_4=x_1x_2x_3$ , так как предположение об отсутствии взаимодействия  $x_1x_2x_3$  более реально, по сравнению, например, с взаимодействием  $x_1x_2$ .

### **Обработка результатов эксперимента**

Любой эксперимент, связанный с измерением величин, сопровождается погрешностями измерений, вносящими элемент неопределенности в результат эксперимента. В связи с этим порядок проведения опытов должен быть выбран таким, чтобы имелась возможность оценить случайную ошибку эксперимента и избежать влияния возможных систематических ошибок. Постановка повторных или параллельных опытов полностью не исключает неопределенность, так как они проводятся также с погрешностью воспроизводимости. Выделить ошибку эксперимента, оцениваемую с помощью дисперсии ошибки, возможно только при дублировании опытов повторением  $m$  раз каждой строки матрицы планирования.

Сделать случайными мешающие факторы, действие которых может иметь систематический характер, позволяет принцип рандомизации, применяемый при реализации матрицы планирования эксперимента.

Перед проведением опытов на объекте следует определить возможные факторы, мешающие исследованию, и провести рандомизацию порядка проведения опытов с тем, чтобы эти факторы влияли на результаты эксперимента случайным образом.

Рандомизацию следует проводить следующим образом: в таблице равномерно распределенных случайных чисел выбирается некоторый столбец, из которого в порядке их следования берутся числа от 1 до  $4m$  и записываются в столбцы, определяющие порядок следования опытов  $k_{im}$  матрицы планирования. Пусть, например, при  $i=2$   $k_{21}=4$ . Это значит, что вторая строка варьирования реализуется четвертой по порядку. При этом мешающий фактор при случайном порядке проведения опытов не будет вызывать систематической ошибки.

Например, для двухфакторного эксперимента

Номер опыта	Порядок проведения						Матрица планирования				Результаты проведения							
	$k_{i1}$	$k_{i2}$	-	$k_{ij}$	-	$k_{im}$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y_{i1}$	$y_{i2}$	-	$y_{in}$	-	$y_{im}$	$\bar{y}_i$	$\hat{\sigma}_i^2$
1	$k_{11}$	$k_{12}$	-	$k_{1j}$	-	$k_{1m}$	+1	-1	-1	+1	$y_{11}$	$y_{12}$	-	$y_{1n}$	-	$y_{1m}$	$\bar{y}_1$	$\hat{\sigma}_1^2$

2	$k_{21}$	$k_{22}$	-	$k_{21}$	-	$k_{2m}$	+1	+1	-1	-1	$y_{21}$	$y_{22}$	-	$y_{21}$	-	$y_{2m}$	$\bar{y}_2$	$\sigma_2^2$
3	$k_{31}$	$k_{32}$	-	$k_{31}$	-	$k_{3m}$	+1	-1	+1	-1	$y_{31}$	$y_{32}$	-	$y_{31}$	-	$y_{3m}$	$\bar{y}_3$	$\sigma_3^2$
4	$k_{41}$	$k_{42}$	-	$k_{41}$	-	$k_{4m}$	+1	+1	+1	+1	$y_{41}$	$y_{42}$	-	$y_{41}$	-	$y_{4m}$	$\bar{y}_4$	$\sigma_4^2$

Рассмотрим матрицу  $2^3$ , полученную из матрицы  $2^2$  обычным способом: два раза повторен план  $2^2$ , причем в первых четырех опытах  $x_3$  имеет верхнее значение, а в последних четырех опытах – нижнее значение. Допустим, что экспериментатор может поставить в первый день четыре опыта и во второй день также четыре опыта.

Ставя опыты подряд, вы разбиваете матрицу на две части или на два блока: в первый блок – входят опыты № 1, 2, 3 и 4, во второй – № 5, 6, 7 и 8. Если внешние условия первого дня каким-то образом отличались от внешних условий второго дня, то это способствовало возникновению некоторой систематической ошибки. Обозначим эту ошибку  $\varepsilon$ . Тогда четыре значения параметра оптимизации сдвинуты на величину  $\varepsilon$  по сравнению с истинными значениями. Пусть это будут параметры, входящие в первый блок:  $y_1+\varepsilon$ ,  $y_2+\varepsilon$ ,  $y_3+\varepsilon$ ,  $y_4+\varepsilon$ . Однако матрица построена так, что в первом блоке значения  $x_3$  находятся на верхнем уровне, а во втором – на нижнем уровне. Тогда при подсчете  $b_3$  получится следующая картина:

$$b_3 = \frac{1}{8} [(y_1+\varepsilon)+(y_2+\varepsilon)+(y_3+\varepsilon)+(y_4+\varepsilon)-y_5-y_6-y_7-y_8] \rightarrow \beta_3 + \frac{\varepsilon}{2},$$

где  $\beta_3$  – истинное значение коэффициента при  $x_3$ . Таким образом, возможное различие во внешних условиях смешалось с величиной линейного коэффициента  $b_3$  и исказило это значение. В такой последовательности опыты ставить нельзя. Опыты нужно рандомизировать во времени, то есть придать последовательности опытов случайный характер.

Приведем простой пример рандомизации условий эксперимента. В полном факторном эксперименте  $2^3$  предполагается каждое значение параметра оптимизации определять по двум параллельным опытам. Нужно случайно расположить всего 16 опытов. Присвоим параллельным опытам номера с 9 по 16, и тогда опыт № 9 будет повторным по отношению к первому опыту, десятый – ко второму и т. д. Следующий этап рандомизации – использование таблицы случайных чисел. Обычно таблица случайных чисел приводится в руководствах по математической статистике. В случайном месте таблицы выписыва-

ются числа с 1 по 16 с отбрасыванием чисел больше 16 и уже выписанных. В нашем случае, начиная с четвертого столбца, можно получить такую последовательность:

2; 15; 9; 5; 12; 14; 8; 13; 16; 1; 3; 7; 4; 6; 11; 10.

Это значит, что первым реализуется опыт № 2, вторым – опыт № 7 и т.д. Выбранную случайным образом последовательность опытов не рекомендуется нарушать.

Если экспериментатор располагает сведениями о предстоящих изменениях внешней среды, сырья, аппаратуры и т. п., то целесообразно планировать эксперимент таким образом, чтобы эффект влияния внешних условий был смешан с определенным взаимодействием, которое не жалко потерять. Так, при наличии двух партий сырья матрицу  $2^3$  можно разбить на два блока таким образом, чтобы эффект сырья сказался на величине трехфакторного взаимодействия. Тогда все линейные коэффициенты и парные взаимодействия будут освобождены от влияния неоднородности сырья (табл.).

В этой матрице при составлении блока 1 отобраны все строки, для которых  $x_1x_2x_3=+1$ , а при составлении блока 2 – все строки, для которых  $x_1x_2x_3=-1$ . Различие в сырье можно рассматривать как новый фактор  $x_4$ . Тогда матрица  $2^3$ , разбитая на два блока, представляет собой полуреплику  $2^{4-1}$  с определяющим контрастом  $1=x_1x_2x_3x_4$ .

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y$
1	+	-	-	+	+	-	-	+	$y_1+\varepsilon$
	+	+	-	-	-	-	+	+	$y_2+\varepsilon$
	+	-	+	-	-	+	-	+	$y_3+\varepsilon$
	+	+	+	+	+	+	+	+	$y_4+\varepsilon$
2	+	-	-	-	+	+	+	-	$y_5$
	+	+	-	+	-	+	-	-	$y_6$
	+	-	+	+	-	-	+	-	$y_7$
	+	+	+	-	+	-	-	-	$y_8$

Эффект сырья отразился на подсчете свободного члена  $b_0$  и эффекта взаимодействия второго порядка  $b_{123}$ . Аналогично можно разбить на два блока любой эксперимент типа  $2^k$ . Главное – правильно выбрать взаимодействие, которым можно безболезненно пожертвовать. При отсутствии априорных сведений выбирают взаимодействие самого высокого порядка.

При необходимости разбиения матрицы на большее количество блоков применяют блочное планирование, например, планирование по типу латинского квадрата и пр.

Результаты эксперимента для каждой строки опытов записываются в столбцы  $y_{im}$  таблицы и производится их осреднение:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m y_{il}.$$

То есть, среднее арифметическое  $y$  равно сумме всех  $m$  отдельных результатов, деленной на количество параллельных опытов  $m$ .

Отклонение результата любого опыта от среднего арифметического можно представить как разность  $y_q - \bar{y}$ , где  $y_q$  – результат отдельного опыта. Наличие отклонения свидетельствует об изменчивости, вариации значений повторных опытов. Для измерения этой изменчивости чаще всего используют дисперсию.

Дисперсией называется среднее значение квадрата отклонений величины от ее среднего значения. Дисперсия обозначается  $s^2$  и выражается формулой:

$$s_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \bar{y}_i)^2,$$

где  $(m-1)$  – число степеней свободы, равное количеству опытов минус единица. Одна степень свободы использована для вычисления среднего.

Корень квадратный из дисперсии, взятый с положительным знаком, называется средним квадратическим отклонением, стандартом или квадратичной ошибкой.

Дисперсия и с.к.о. – это меры рассеяния, изменчивости. Чем больше дисперсия и стандарт, тем больше рассеяны значения параллельных опытов около среднего значения.

Ошибка опыта является суммарной величиной, результатом многих ошибок: ошибок измерений факторов, ошибок измерений параметра оптимизации и др. Каждую из этих ошибок можно, в свою очередь, разделить на составляющие.

Матрица планирования состоит из серии опытов, и дисперсия всего эксперимента получается в результате усреднения дисперсий всех опытов. По терминологии, принятой в планировании эксперимента, речь идет о подсчете дисперсии параметра оптимизации или,

что тоже самое, дисперсии воспроизводимости эксперимента (или дисперсии ошибки эксперимента).

$$S_{\text{ош}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2, \text{ или } S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \bar{y}_i)^2.$$

Дисперсию воспроизводимости проще всего рассчитывать, когда соблюдается равенство числа повторных опытов во всех экспериментальных точках. На практике часто приходится сталкиваться со случаями, когда число повторных опытов различно. Это происходит вследствие отброса грубых наблюдений, неуверенности экспериментатора в правильности некоторых результатов (в таких случаях возникает желание еще и еще раз повторить опыт) и т.п.

Тогда при усреднении дисперсий приходится пользоваться средним взвешенным значением дисперсий, взятым с учетом числа степеней свободы. Число степеней свободы средней дисперсии в таком случае принимается равным сумме чисел степеней свободы дисперсий, из которых она вычислена.

Формулами для расчета дисперсии воспроизводимости можно пользоваться только в том случае, если дисперсии однородны. Последнее означает, что среди всех суммируемых дисперсий нет таких, которые бы значительно превышали все остальные.

Одним из требований регрессионного анализа является однородность дисперсий.

Проверка однородности дисперсий производится с помощью различных статистических критериев. Простейшим из них является критерий Фишера, предназначенный для сравнения двух дисперсий. Критерий Фишера (F-критерий) представляет собою отношение большей дисперсии к меньшей. Полученная величина сравнивается с табличной величиной F-критерия.

Если сравниваемое количество дисперсий больше двух и одна дисперсия значительно превышает остальные, можно воспользоваться критерием Кохрена. Этот критерий пригоден для случаев, когда во всех точках имеется одинаковое число повторных опытов.

В терминах дисперсионного анализа задача заключается в проверке нулевой гипотезы о равенстве дисперсий  $s_1^2 = s_2^2 = s_3^2 = s_4^2 = s^2$  во всех вариантах эксперимента.

Критерий Кохрена – это отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{s_i^2 \max}{\sum_{i=1}^N s_i^2}.$$

С этим критерием связаны числа степеней свободы  $f_1=m-1$  и  $f_2=N$ .

Гипотеза об однородности дисперсий подтверждается, если вычисленное значение  $G$  окажется меньше значения  $G_{\text{крит}}$ , найденного по таблице для выбранного уровня значимости  $\alpha$ . Тогда говорят, что данные эксперимента не противоречат проверяемой гипотезе об однородности дисперсий. Тогда можно усреднять дисперсии и пользоваться формулой для определения дисперсии воспроизводимости

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$$

с  $N(m-1)$  степенями свободы.

Если проверка воспроизводимости дала отрицательный результат, то остается признать невоспроизводимость эксперимента вследствие наличия в объекте источников неоднородности, для выделения которых следует обратиться к приемам дисперсионного анализа.

После проверки воспроизводимости эксперимента можно перейти к определению модели эксперимента в виде уравнений регрессии.

Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо.

Ее можно осуществлять двумя равноценными способами: проверкой по  $t$ -критерию Стьюдента или построением доверительного интервала. При использовании полного факторного эксперимента или регулярных дробных реплик доверительные интервалы для всех коэффициентов (в том числе и эффектов взаимодействия) равны друг другу.

Прежде всего надо найти дисперсию коэффициента регрессии  $s^2\{b_j\}$ .

Она определяется в нашем случае по формуле  $s^2\{b_j\} = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{N \cdot m}$ .

По сути при проверке значимости оценок коэффициентов уравнения регрессии требуется проверить нулевую гипотезу  $H_0: \beta_j=0$  отно-

сительно конкурирующей  $H_1: \beta_j \neq 0$ . Проверка гипотезы проводится с помощью  $t$ -статистики Стьюдента, которая вычисляется по формуле:

$$t_j = \frac{|b_j - \beta_j|}{s\{b_j\}} = \frac{|b_j|}{s\{b_j\}},$$

где  $s\{b_j\}$  – среднеквадратичное отклонение оценки коэффициентов  $b_j$ .

Если найденная величина  $t_j$  превышает критическое значение, определяемое по таблице для числа степеней свободы  $f=N(m-1)$  и заданной значимости  $\alpha$ , то нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается и коэффициент  $b_j$  считается значимым. В противном случае (при  $t_j \leq t_{\text{крит}}$ ) нуль – гипотеза принимается и коэффициент  $b_j$  считают статистически незначимым.

Незначимость некоторого коэффициента показывает, что в выбранном диапазоне варьирования переменных  $x_j$  отсутствует статистически значимое влияние данного фактора на выходную переменную  $y$ . Поскольку вычисленные оценки коэффициентов являются независимыми, то фактор с незначимым коэффициентом может быть выброшен из уравнения регрессии без пересчета остальных значимых коэффициентов.

После исключения факторов с незначимыми коэффициентами производится проверка адекватности полученной модели.

Для характеристики среднего разброса относительно линии регрессии вполне подходит остаточная сумма квадратов. Неудобство состоит в том, что она зависит от числа коэффициентов в уравнении: введите столько коэффициентов, сколько вы провели независимых опытов, и получите остаточную сумму, равную нулю.

Числом степеней свободы в статистике называется разность между числом опытов и числом коэффициентов (констант), которые вычислены по результатам этих опытов независимо друг от друга.

Если, например, вы провели полный факторный эксперимент  $2^3$  и нашли линейное уравнение регрессии, то число степеней свободы  $f=N-(k+1)=8-(3+1)=4$ .

Остаточная сумма квадратов, деленная на число степеней свободы, называется остаточной дисперсией  $s_{\text{ост}}^2$ , или дисперсией адекватности и характеризует рассеяние результатов эксперимента отно-

сительно подобранного уравнения регрессии. Дисперсия адекватности находится следующим образом:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{N-L} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2,$$

где  $m$  – число параллельных опытов;  $L$  – число оцениваемых коэффициентов в уравнении регрессии. Остаточная дисперсия оценивается с числом степеней свободы  $f=N-L$ .

Правило: в планировании эксперимента число степеней свободы для дисперсии адекватности равно числу различных опытов, результаты которых используются при подсчете коэффициентов регрессии, минус число определяемых коэффициентов.

Для проверки гипотезы об адекватности можно использовать  $F$ -критерий (Фишера).

Тогда для проверки адекватности выясняется соотношение между остаточной дисперсией и дисперсией ошибки эксперимента.

Если остаточная дисперсия (или дисперсия адекватности) не превышает ошибки эксперимента, то считается, что модель адекватно представляет результаты эксперимента: если остаточная дисперсия больше дисперсии ошибки эксперимента, то модель нельзя признать пригодной. Следовательно, проверяется нулевая гипотеза  $H_0: \sigma_{\text{ост}}^2 = \sigma_{\text{ош}}^2$  против  $H_1: \sigma_{\text{ост}}^2 > \sigma_{\text{ош}}^2$  с помощью  $F$ -отношения:  $F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{ош}}^2$ . Если вычисленное отношение меньше  $F_{\text{крит}}$ , найденного по таблице для соответствующих степеней свободы числителя  $f_{\text{ост}}=N-L$ , знаменателя  $f_{\text{ош}}=N(m-1)$  и выбранной вероятности  $1-\alpha$ , то нуль – гипотеза принимается. В противном случае гипотеза отвергается и модель признается не пригодной для представления выборочных данных эксперимента.

Таблица критерия Фишера построена следующим образом. Столбцы связаны с определенным числом степеней свободы для числителя  $f_1$ , а строки – для знаменателя  $f_2$ . На пересечении соответствующих строки и столбца стоят критические значения  $F$ -критерия. Как правило, в технических задачах используется уровень значимости 0,05.

### ***Оптимизация технологических процессов на основе экспериментально-статистической модели***

Оптимизация технологических процессов заключается в нахождении таких значений первичных параметров, которые позволяют по-

лучить экстремальное (максимальное или минимальное) значение выходного параметра (критерия оптимизации).

В практике оптимизации сложных моделей технологических процессов наряду с аналитическим методом широко применяют численные методы и наиболее часто – метод крутого восхождения (рис. 2.5). Если существует несколько экстремумов, то метод крутого восхождения позволяет определить тег из них, который расположен ближе к начальным точкам. При этом находят локальное описание поверхности отклика с помощью линейного уравнения регрессии и оценивают его коэффициенты.

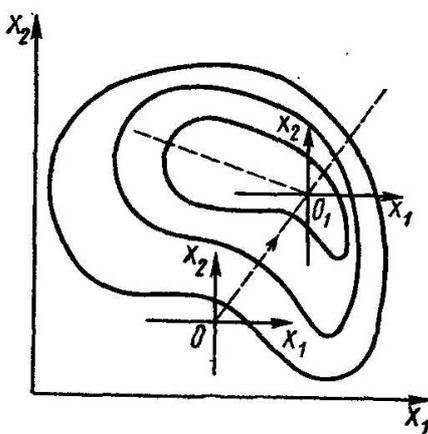


Рис. 2.5. Метод крутого восхождения

Если модель адекватна и все коэффициенты уравнения регрессии значимы, то переходят к движению по градиенту до достижения стационарной области, в которой располагается экстремум. Если при таком движении не удастся достигнуть оптимума, то ставят новую серию опытов в точке  $O_j$  с лучшим достигнутым значением параметра оптимизации, находят уравнение регрессии и на его основе определяют новое направление движения по градиенту. Такое чередование факторного планирования и движения по градиенту продолжается до достижения области оптимума, для описания которой используют планы более высоких порядков.

Процесс оптимизации приводит в область факторного пространства, близкую к экстремуму, где поверхность отклика имеет большую кривизну и не может быть описана линейным полиномом. Для адекватного математического описания такой поверхности используется полный квадратичный полином второго порядка.

Для полинома второго порядка число уровней независимых переменных должно быть на единицу больше степени интерполяционного полинома. Если использовать все возможные сочетания уровней по каждому фактору, то необходимо провести  $3^n$  опытов ( $n$  – число факторов), что нерационально. Сократить число опытов можно, используя центральное композиционное планирование (ЦКП), ядром которого являются линейные ортогональные планы и некоторое число дополнительных точек («звездные точки»).

### ***Ортогональное композиционное планирование второго порядка***

Для детального изучения области оптимума и участков поверхности отклика со значительной кривизной линейная модель становится неадекватной. В таких случаях для математического описания может быть достаточно полинома второго порядка, реже третьего порядка, полученного, используя планы соответственно второго и третьего порядков.

Планы 2-го порядка позволяют получить математическое описание в виде полной квадратичной модели, содержащей кроме основных эффектов  $b_i$  все парные взаимодействия  $b_{ij}$  и квадратичные эффекты  $b_{ii}$ .

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 .$$

Подобные планы применяют, как правило, либо в том случае, когда использование планирования первого порядка не позволило получить адекватную регрессионную модель и выяснилась необходимость ее усложнения, либо если заранее известно, что объект исследования обладает существенными нелинейными свойствами.

Планы  $2^k$  не могут обеспечить получение отдельных оценок коэффициентов  $b_{ij}$  при квадратичных функциях и коэффициента  $b_0$ .

Применение полного факторного эксперимента типа  $3^k$  для получения отдельных оценок коэффициентов полинома второго порядка не является рациональным, так как планирование на трех уровнях характеризуется резким увеличением объема эксперимента.

Целесообразнее для этой цели использовать композиционный план (рис. 2.б.), образованный путем добавления некоторого количества специальных точек к «ядру», состоящему из планов  $2^k$  или  $2^{k-p}$ . Если к «ядру» добавить точку в центре плана с координатами  $(0, 0-0)$  и  $2k$  так называемых «звездных» точек с координатами  $(\pm\alpha, 0-0)$ ,  $(0, \pm\alpha, ..0)$ ,  $-$ ,  $(0, 0- \pm\alpha)$ , то получим центральный композицион-

ный план, предложенный Боксом. В качестве ядра используются точки ПФЭ – вершины квадрата и куба соответственно.

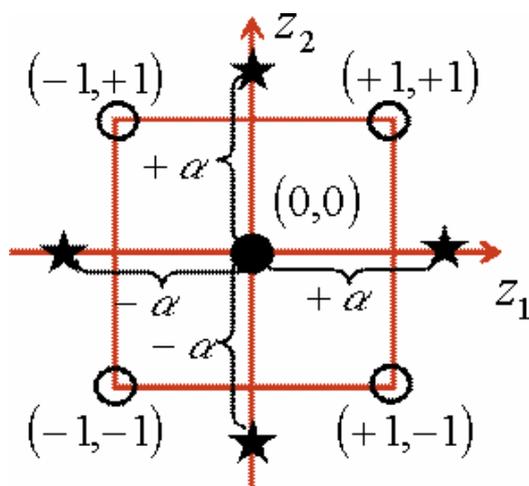


Рис. 2.6. Точки композиционного плана

Используют эти планы обычно на заключительном этапе исследования: при описании экспериментальной области в ситуациях, когда отсутствует априорная информация об объекте и его полиномиальную модель приходится подбирать последовательно, начиная с простейшего линейного уравнения, которое затем достраивается до полной квадратичной модели. В таких случаях применение композиционных планов оказывается наиболее выгодным по числу опытов.

В зависимости от применяемого критерия оптимальности различают ортогональное и рототабельное композиционное планирование. Рассмотрим ортогональное композиционное планирование, в котором в силу ортогональности матрицы плана все коэффициенты квадратичной модели оцениваются независимо друг от друга.

*Центрально-композиционные планы (ЦКП)* любой модификации состоят из трех частей. Первая часть – основа или ядро плана – это ПФЭ  $2^k$  или ДФЭ  $2^{k-p}$ , где  $k$  – количество неизвестных коэффициентов регрессии,  $p = 0, 1, 2$ . При этом требуется, чтобы ядро плана обеспечивало отдельную оценку коэффициентов регрессии и всех парных взаимодействий. Данное условие накладывает весьма жесткое ограничение на возможную степень дробности используемого ДФЭ. В частности, при  $k \leq 4$ , как показывают расчеты, может применяться лишь ПФЭ  $2^k$ ; если  $5 \leq k \leq 7$ , то кроме ПФЭ  $2^k$  можно использовать и ДФЭ  $2^{k-1}$ , а для  $k > 7$  допустим также и ДФЭ  $2^{k-2}$ . Вторая часть

ЦКП – так называемые «звездные» точки, расположенные на координатных осях на расстоянии  $\pm\alpha$  от центра эксперимента. Общее число таких точек равно  $2k$ . Третья часть ЦКП – опыты в центре плана; число таких опытов  $N_0 \geq 1$ . Приведен произвольный симметричный ЦКП:

Составные части ЦКП	G	Факторы		Число точек		
		$x_1$	$x_2$	–	$x_k$	
Ядро плана (ПФЭ $2^k$ илиДФЭ $2^{k-p}$ )	1	–1	–1	–	–1	$2^{k-p}$ p=0;1;2 ;
	2	+1	–1	–	–1	
	3	–1	+1	–	–1	
	4	+1	+1	–	–1	
	–	–	–	–	–	
	$2^{k-p}$	+1	+1	–	–1	
«Звездные» точки	$2^{k-p}+1$	$-\alpha$	0	–	0	2k
	$2^{k-p}+2$	$+\alpha$	0	–	0	
	$2^{k-p}+3$	0	$-\alpha$	–	0	
	$2^{k-p}+4$	0	$+\alpha$	–	0	
	–	–	–	–	–	
	$2^{k-p}+2k-1$	0	0	–	$-\alpha$	
	$2^{k-p}+2k$	0	0	–	$+\alpha$	
Центральные точки	$2^{k-p}+2k+1$	0	0	–	0	$N_0$
	–	–	–	–	–	
	$2^{k-p}+2k+N_0$	0	0	–	0	

Общее число опытов  $N=2^k+2k+1$ .

Конкретные значения  $\alpha$  и  $N_0$  выбираются исходя из тех или иных критериев оптимальности регрессионных экспериментов ( $\alpha$ –звездное плечо,  $N_0$ –количество экспериментов в центре плана). В связи с этим принято выделять ортогональные (ОЦКП) и рототабельные (РЦКП) центрально – композиционные планы.

В ОЦКП, как правило,  $N_0 = 1$ , а план целиком строится с учетом критерия ортогональности (сумма попарных произведений значений уровней двух любых факторов (столбцов) равна нулю). Для обеспечения попарной ортогональности столбцов, отвечающих свободному члену  $\beta_0$  и квадратичным коэффициентам  $\beta_i^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , а также столбцов, отвечающих квадратичным членам между собой, необходимо принять специальные меры.

С этой целью, прежде всего, несколько видоизменяют систему базисных функций, а именно – ищут регрессионную модель в виде:

$$y(x) = b_0' + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} (x_i^2 - x_i'^2),$$

где  $x_i'^2 = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 = \frac{2^{k-p} + 2\alpha^2}{N}$ ;  $N$  – общее число точек плана:

$$N = 2^{k-p} + 2k + 1;$$

$$\beta_0' = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i'^2 \text{ (где } p\text{-число, определяющее дробность}$$

эксперимента, а  $\beta_i$  – коэффициенты уравнения регрессии). Как видно, в этой модели при квадратичных коэффициентах используются центрированные переменные. Переход к таким переменным обеспечивает ортогональность столбца свободного члена уравнения регрессии (базисная функция  $f_0 \equiv 1$ ), и любого из столбцов центрированных квадратов (базисная функция вида  $\tilde{x}_i^2 = x_i^2 - x_i'^2$ ). Действительно, для указанных столбцов имеет место следующее равенство:

$$\sum_{g=1}^N f_0 (x_{ig}^2 - x_i'^2) = \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 - N x_i'^2 = \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 - N \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 = 0.$$

Это равенство справедливо независимо от конкретного значения  $\alpha$ . Однако при произвольном  $\alpha$  остаются неортогональными столбцы матрицы планирования, отвечающие различным центрированным квадратичным переменным. Поэтому, в ОЦКП числовое значение  $\alpha$  и выбирается как раз из условия ортогональности именно этих столбцов, то есть исходя из условия:

$$\sum_{\substack{g=1 \\ i \neq j}}^N (x_{ig}^2 - x_i'^2)(x_{jg}^2 - x_j'^2) = 0$$

или в развернутом виде:

$$2^{k-p} \left( 1 - \frac{2^{k-p} + 2\alpha^2}{N} \right)^2 + 4 \left[ \alpha^2 - \frac{2^{k-p} + 2\alpha^2}{N} \right] \left[ -\frac{2^{k-p} + 2\alpha^2}{N} \right] + \left[ -\frac{2^{k-p} + 2\alpha^2}{N} \right]^2 (2k - 3) = 0.$$

После несложных преобразований получаем уравнение для требуемого значения  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\sqrt{2^{k-p-2} (2^{k-p} + 2k + 1)} - 2^{k-p-1}} = \sqrt{\left( \sqrt{N \cdot 2^{k-p}} - 2^{k-p} \right) / 2}.$$

С помощью этой формулы найдены конкретные числовые значения  $\alpha$  при  $l = 2 \div 8$ :

$N$	2	3	4	5		6		7		8		
Ядро ЦПК	ПФЭ $2^2$	ПФЭ $2^3$	ПФЭ $2^4$	ПФЭ $2^5$	ДФЭ $2^{5-1}$	ПФЭ $2^6$	ДФЭ $2^{6-1}$	ПФЭ $2^7$	ДФЭ $2^{7-1}$	ПФЭ $2^8$	ДФЭ $2^{8-1}$	ДФЭ $2^{8-2}$
$N$	9	15	25	43	27	77	45	143	79	273	145	81
$\alpha$	1,000	1,215	1,414	1,596	1,547	1,761	1,724	1,909	1,885	2,045	2,029	2,000

Общее количество опытов  $N$  в ОЦКП равно  $N = 2^{k-p} + 2k + N_0$ . Таким образом, переходя к квадратичной модели с центрированными квадратичными переменными и используя указанные значения  $\alpha$ , можно добиться полной ортогонализации столбцов матрицы планирования.

$x_0$	$x_1$	$x_2$	-	$x_k$	$x_1 x_2$	-	$x_{k-1} x_k$	$x_1^2 - x'_1{}^2$	$x_2^2 - x'_2{}^2$	-	$x_k^2 - x'_k{}^2$
+1	-1	-1	-	-1	+1	-	+1	$1 - x'_1{}^2$	$1 - x'_2{}^2$	-	$1 - x'_k{}^2$
+1	+1	-1	-	-1	-1	-	+1	$1 - x'_1{}^2$	$1 - x'_2{}^2$	-	$1 - x'_k{}^2$
+1	-1	+1	-	-1	-1	-	-	$1 - x'_1{}^2$	$1 - x'_2{}^2$	-	$1 - x'_k{}^2$
+1	+1	+1	-	-1	+1	-	-	$1 - x'_1{}^2$	$1 - x'_2{}^2$	-	$1 - x'_k{}^2$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+1	+1	+1	-	+1	+1	-	+1	$1 - x'_1{}^2$	$1 - x'_2{}^2$	-	$1 - x'_k{}^2$
+1	$-\alpha$	0	-	0	0	-	0	$\alpha^2 - x'_1{}^2$	$-x'_2{}^2$	-	$-x'_k{}^2$
+1	$+\alpha$	0	-	0	0	-	0	$\alpha^2 - x'_1{}^2$	$-x'_2{}^2$	-	$-x'_k{}^2$
+1	0	$-\alpha$	-	0	0	-	0	$-x'_1{}^2$	$\alpha^2 - x'_2{}^2$	-	$-x'_k{}^2$
+1	0	$+\alpha$	-	0	0	-	0	$-x'_1{}^2$	$\alpha^2 - x'_2{}^2$	-	$-x'_k{}^2$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+1	0	0	-	$-\alpha$	0	-	0	$-x'_1{}^2$	$-x'_2{}^2$	-	$\alpha^2 - x'_k{}^2$
+1	0	0	-	$+\alpha$	0	-	0	$-x'_1{}^2$	$-x'_2{}^2$	-	$\alpha^2 - x'_k{}^2$
+1	0	0	-	0	0	-	0	$-x'_1{}^2$	$-x'_2{}^2$	-	$-x'_k{}^2$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
+1	0	0	-	0	0	-	0	$-x'_1{}^2$	$-x'_2{}^2$	-	$-x'_k{}^2$

Следовательно, оценки коэффициентов регрессии, полученные с помощью ОЦКП, некоррелированы между собой, что, впрочем, характерно для любого ортогонального плана.

Реализация эксперимента по выбранной матрице планирования проводится также с дублированием опытов в каждой точке плана аналогично ПФЭ  $2^k$ .

Оценки коэффициентов регрессии для соответствующих групп равны:

$$- \text{ для свободного члена: } \beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{0i} y'_i}{N};$$

$$- \text{ для линейных слагаемых: } \beta_u = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ui} y'_i}{2^{k-p} + 2\alpha^2}, \quad u = 1, 2, \dots, k;$$

$$- \text{ для попарных взаимодействий: } \beta_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{jui} y'_i}{2^{k-p}}, \quad j, u = 1, 2, \dots, k; \quad j \neq u;$$

$$- \text{ для центрированных квадратичных переменных: } \beta_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ki}^2 y'_i}{2\alpha^4}.$$

Приведем теперь уравнение регрессии к более привычному для нас виду:

$$y(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_i^2 x_i^2,$$

$$\text{где } \beta_0 = \beta_0' - x_i'^2 \sum_{i=1}^k \beta_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{0i} y'_i}{N} - \frac{2^{k-p} + 2\alpha^2}{N} \sum_{i=1}^k \beta_i^2.$$

Условие нормировки в случае ортогонального ЦКП не соблюдается, т.к.  $\sum_{i=1}^N x_{iu}^2 \neq N$  ( $u$  – номер любого столбца, кроме нулевого). Это значит, что точность оценки коэффициентов регрессии для разных групп неодинакова.

Оценки дисперсий для каждой из четырех однородных групп для  $m$  параллельных опытов подсчитываются по следующим формулам:

$$S^2\{\beta_i\} = \frac{S_B^2}{m(2^{k-p} + 2\alpha^2)};$$

$$S^2\{\beta_{ij}\} = \frac{S_B^2}{m \cdot 2^{k-p}};$$

$$S^2\{\beta_i^2\} = \frac{S_B^2}{m \cdot 2\alpha^4};$$

$$S^2\{\beta_0\} = \frac{S_B^2}{m(N + 2\alpha^4)},$$

где  $S_B^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Таким образом, дисперсия оценки  $Y'$  функции отклика в некоторой точке факторного пространства зависит не только от расстояния этой точки до центра плана  $\rho$ , но и от ее положения на гиперсфере. Значит, ОЦКП не удовлетворяет условию рототабельности. Поэтому, если не предъявляются особые требования к точности предсказания выходной величины по уравнению регрессии в любом направлении факторного пространства от базовой точки, предпочтительно применение ортогонального ЦКП ввиду его простоты.

## 2.4. Тест для проверки знаний

1. На каком уровне моделирования математической моделью технологического объекта является система дифференциальных уравнений с заданными краевыми условиями, точное решение которых возможно только для частных случаев:

- а) макроуровне;
- б) микроуровне;
- в) метауровне.

2. На каком уровне моделирования математической моделью технологического объекта является система дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями, построенными на основе сочетания компонентных уравнений отдельных элементов технологического процесса с топологическими уравнениями:

- а) макроуровне;
- б) микроуровне;
- в) метауровне.

3. На каком уровне моделирования технологического объекта используют стохастические методы событийного моделирования:

- а) макроуровне;
- б) микроуровне;
- в) метауровне.

4. Из множества факторов, влияющих на рассеяние выходной величины  $Y$ , выбирается один, который, по мнению исследователя, имеет наибольшее влияние на это рассеяние. Чтобы выявить эффект

исследуемого фактора, его делят на несколько четко делимых уровней, а остальные факторы рандомизируют. Это –

- а) однофакторный дисперсионный анализ;
- б) двухфакторный дисперсионный анализ;
- в) трехфакторный дисперсионный анализ.

5. Построение плана эксперимента по типу латинского квадрата –

- а) однофакторный дисперсионный анализ;
- б) двухфакторный дисперсионный анализ;
- в) трехфакторный дисперсионный анализ.

6. Метод выявления наиболее существенных факторов исследуемого процесса, основанный на опросе специалистов, работающих в этой области следующий:

- а) метод ранговой корреляции;
- б) дисперсионный анализ;
- в) методы насыщенных планов.

7. Для первоначального построения «грубой модели» исследуемого процесса, отбросив на первом этапе факторы, оказывающее незначительное влияние, используют следующее:

- а) метод ранговой корреляции;
- б) дисперсионный анализ;
- в) методы насыщенных и сверх насыщенных планов.

8. Предусматривает вмешательство в исследуемый технологический процесс, изменяя его по заранее разработанному экспериментатором плану и наиболее эффективен при исследовании в лабораторных условиях следующее:

- а) активный эксперимент;
- б) пассивный эксперимент;
- в) метод ранговой корреляции;
- г) симплексный метод.

9. Сводится к сбору и обработке данных, полученных в результате наблюдения за технологическим процессом в производственных условиях и дает наилучшие результаты при исследовании следующее:

- а) активный эксперимент;
- б) пассивный эксперимент;

- в) метод ранговой корреляции;
- г) симплексный метод.

10. К методам проведения активного эксперимента, в которых значения исследуемых факторов в каждом опыте изменяются в соответствии с матрицей планирования, относятся следующие:

- а) полный и дробный факторные эксперименты;
- б) центральные композиционные планы;
- в) регрессионный и корреляционный анализы;
- г) симплексный и градиентный методы.

11. К методам проведения пассивного эксперимента, при применении которых нет необходимости тратить время и средства на постановку опытов, относятся следующие:

- а) полный и дробный факторные эксперименты;
- б) регрессионный и корреляционный анализы;
- в) факторный анализ и метод главных компонентов;
- г) симплексный и градиентный методы.

12. Эксперимент, учитывающий влияние на функцию отклика исследуемого технологического процесса не только каждого рассматриваемого в эксперименте фактора в отдельности, но и их взаимодействий, основанный на математической модели

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} X_i X_j :$$

- а) полный факторный эксперимент;
- б) центральные композиционные планы;
- в) корреляционный анализ;
- г) дробный факторный эксперимент.

13. Эксперимент, учитывающий влияние на функцию отклика исследуемого технологического процесса только каждого рассматриваемого в эксперименте фактора в отдельности, без их взаимодействий, основанный на математической модели

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i :$$

- а) полный факторный эксперимент;
- б) центральные композиционные планы;
- в) регрессионный анализ;
- г) дробный факторный эксперимент.

14. Эксперимент, учитывающий влияние на функцию отклика исследуемого технологического процесса не только каждого рассматриваемого в эксперименте фактора в отдельности, но и их взаимодействий, основанный на математической модели 2-го порядка

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j}^k b_{ijj} X_i^2 X_j^2 :$$

- а) полный факторный эксперимент;
- б) центральный композиционный рототабельный план;
- в) дробный факторный эксперимент;
- г) центральный композиционный ортогональный план.

15. Определите порядок статистической обработки и анализ результатов эксперимента:

	Создание математической модели объекта с проверкой статистической значимости коэффициентов полинома.
	Проверка однородности дисперсий.
	Оценка дисперсии среднего арифметического в каждой строке матрицы.
	Проверка адекватности.

16. Определите порядок планирования и проведения эксперимента:

	Определение средних значений $\bar{Y}_\xi$ .
	Выбор центра плана $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0})$ .
	Проведение нескольких параллельных опытов при одних и тех же условиях.
	Задание интервала варьирования $\Delta x$ .
	Построение матрицы планирования.
	Рандомизация неконтролируемых параметров процесса.
	Преобразование значений факторов $x_i$ к безразмерным величинам.

## **3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЭС**

### **3.1. Методы размерной обработки изделий**

Под электрофизическими и электрохимическими методами размерной обработки понимают совокупность различных воздействий (электрических, электрохимических и др.) на обрабатываемую деталь для придания ей заданной формы и размеров. Эти методы можно разделить на четыре группы: электроэрозионные, лучевые, ультразвуковые и электрохимические. К новым электрофизическим методам относятся плазменная обработка, формование в магнитном поле и др.

Электрофизические и электрохимические методы обработки позволяют решать важные задачи, связанные с производством современных вычислительных машин. Особенно большое значение они имеют для изготовления изделий из материалов высокой твердости, обработка которых обычными методами невозможна или крайне затруднительна. К таким материалам относятся ферриты, германий, кремний, алмазы, рубины, кварц, твердые сплавы, керамика и др.

Основным преимуществом электрофизических и электрохимических методов обработки по сравнению с методами механической обработки является возможность копирования формы инструмента сразу по всей поверхности при простом поступательном перемещении инструмента, вследствие чего процесс обработки легко автоматизируется. Это дает возможность применить многостаночное обслуживание. Для всех методов обработки (кроме ультразвуковых) производительность не зависит от твердости и вязкости обрабатываемого материала, и обработка осуществляется практически без силового воздействия на обрабатываемое изделие.

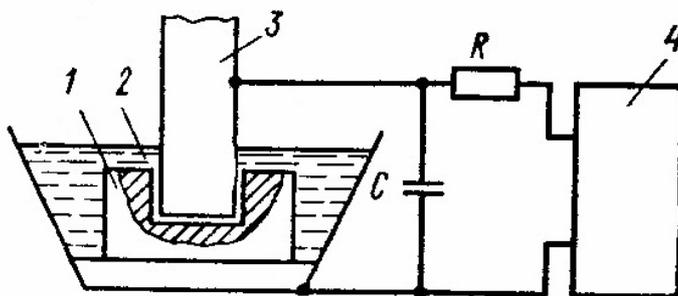
#### **Электроэрозионные методы обработки**

Электроэрозионные методы обработки применяют для всех токопроводящих материалов. Эти методы основаны на явлении электрической эрозии, то есть разрушении поверхности электродов электрическим разрядом, проходящим между ними. Разрушение материала происходит путем его оплавления с последующим выбросом из рабочей зоны в виде парожидкостной смеси. Основными методами электроэрозионной обработки являются электроискровая и анодно-механическая. Для этих методов характерны наличие жидкой диэлек-

трической среды между электродами и подача энергии в форме импульсов. Жидкая среда повышает эффективность разрушения металла и является средством эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки.

Электроэрозионные методы различают в зависимости от формы и параметров импульсов тока и напряжения, а также метода генерирования импульсов. Импульсы тока и напряжения могут иметь униполярную, знакопеременную и другие формы. Основными параметрами импульсов являются их длительность и скважность. По длительности импульсы делят на короткие, средние и длинные. Скважностью импульса называют отношение периода импульса к его длительности.

**Метод электроискровой обработки** основан на использовании импульсных искровых разрядов малой длительности (до нескольких сотен микросекунд) и большой скважности. Обработка может осуществляться методом копирования формы электрода инструмента и непрофилированным электродом. Обработка методом копирования производится при поступательном движении одного из электродов и неподвижно закрепленном втором электроде, при этом форма электрода-инструмента копируется деталью (рис. 3.1).



**Рис. 3.1** Схема установки для электроискровой обработки

Обрабатываемая деталь 1 и инструмент 3 включаются в цепь электрического колебательного контура, работающего в области искрового разряда. Схема имеет два контура: зарядный и разрядный. Зарядный контур состоит из сопротивления  $R$ , конденсатора  $C$  и проводящих проводов; разрядный контур – из конденсатора, проводящих проводов и рабочих электродов: изделия 1 (анод) и инструмента 3 (катод). Изделие помещается в ванну с рабочей жидкостью 2 (керосин, трансформаторное масло и др.). Сила тока регулируется сопротивлением  $R$ . Конденсатор  $C$  заряжается от источника постоянного тока 4. Напряжения на электродах при этом увеличивается, так как

они подключены параллельно конденсатору. При напряжении, равном величине пробоя, происходит разряд конденсатора через межэлектродный промежуток и энергия, накопленная конденсатором, мгновенно выделяется в процессе разряда.

Искровой разряд протекает в миллионные доли секунды и практически не нагревает обрабатываемое изделие. Так как место приложения импульсов строго определено, то обработку можно производить в намеченном месте.

При прохождении искрового разряда в жидкости возникают гидравлические явления и газообразования, создающие взрывной эффект, который способствует удалению из межэлектродного промежутка разрушенного разрядом металла. Источником питания служат обычно генераторы постоянного тока напряжением 30 – 220 В, создающие силу тока зарядного контура в пределах 5 А. Сила тока в разрядном контуре достигает 100 А и выше.

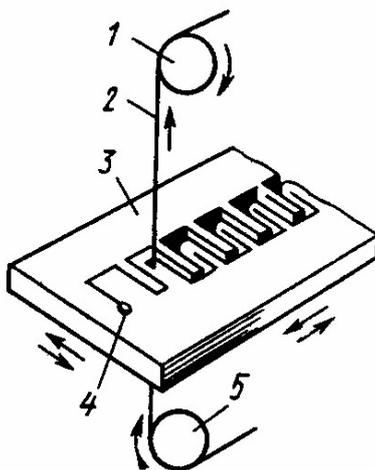
Основная часть энергии, получаемой при разрядке конденсаторов, выделяется в виде теплоты (температура доходит до 10 000°С). При этом теплота расходуется на испарение и плавление металла и лишь небольшая ее часть поглощается электродами.

Последовательное действие разрядов, вызывающих электрическую эрозию, приводит к образованию в изделии выемки, представляющей собой как бы отпечаток электрода инструмента. Во время работы разрядного контура вследствие эрозионного разрушения металла зазор между электродами постоянно увеличивается. В какой-то момент времени зазор возрастает настолько, что разряд не возникает и съем металла прекращается. Для обеспечения непрерывности процесса станки для электроискровой обработки снабжаются регуляторами, автоматически меняющими положение одного из электродов и регулирующими подачу.

Производительность процесса электроискровой обработки зависит от частоты, с которой будут следовать разряды, и от количества металла, выбрасываемого при каждом разряде.

Большое влияние на производительность оказывает материал электрода. Основным требованием, предъявляемым к материалу, является высокая эрозионная устойчивость. Этим требованиям лучше всего отвечают латунь ЛС59-1, красная медь и медно-угольная композиция. Форма электрода подобна форме прошиваемого отверстия, но размеры его меньше размеров отверстия.

**Метод электроискровой обработки непрофилированным** (проволочным) **электродом** (рис. 3.2). Электрод-проволока 2 диаметром 0,02 – 0,5 мм перематывается при определенном натяжении с подающей катушки 1 на приемную 5, прорезая (в результате электроэрозионного процесса) помещенную на ее пути обрабатываемую деталь 3.



**Рис. 3.2** Обработка непрофилированным электродом (проволокой)

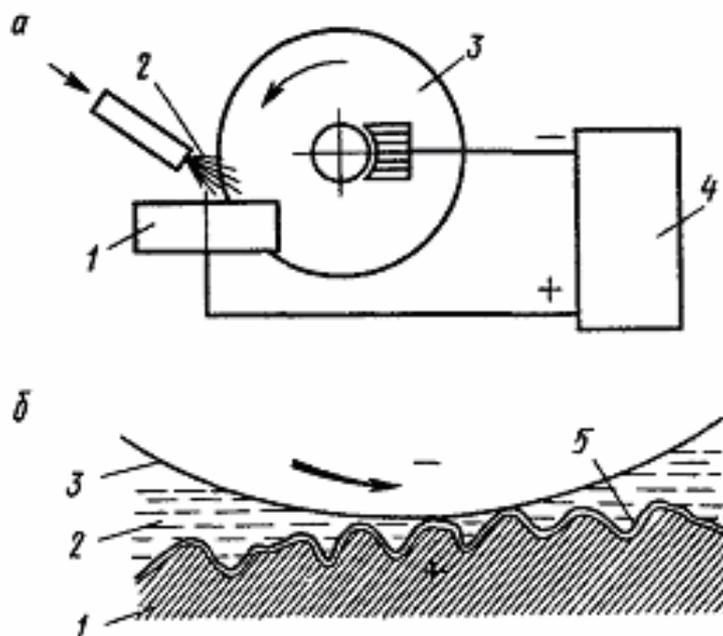
Направляя движение детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно вырезать любой заданный контур. Траектория обрабатывающего электрода-проволоки относительно детали задается копиром, имеющим соответствующие размеры. Для улучшения условий удаления продуктов эрозии проволока натянута в вертикальном направлении. В заготовке предусматривается технологическое отверстие 4.

В качестве материала проволоки применяют медь, а при диаметре менее 0,05 мм – вольфрам, так как прочность медной проволоки в этом случае недостаточна. Диаметр проволоки определяется требуемой шириной реза, значение которого складывается из диаметра проволоки и удвоенного значения зазора, который берется от 0,075 до 0,015 мм на сторону. В качестве рабочей жидкости применяют чистый керосин.

Основное достоинство такого способа – возможность полной автоматизации процесса на станках с ЧПУ.

**Анодно-механическая обработка** (рис. 3.3). Этот метод предложен В. Н. Гусевым в 1943 г. Он основан на использовании комбинированного процесса анодного растворения и эрозионного воз-

действия на обрабатываемую деталь. При грубых режимах доминирует электроэрозионный процесс, за счет которого и осуществляется сьем металла.



**Рис. 3.3** Анодно-механическая обработка:  
*а* – схема анодно-механической резки;  
*б* – принципиальная схема

Обрабатываемая деталь *1* включается в цепь постоянного тока в качестве анода, а рабочий инструмент *3* (диск, лента, проволока) – в качестве катода. Источником питания является генератор постоянного тока *4*. Межэлектродное пространство заполняют рабочей жидкостью *2* (обычно водным раствором жидкого стекла). Под действием постоянного напряжения (22 – 26 В) на поверхности детали образуется силикатная пленка *5*, имеющая повышенное электрическое сопротивление и исключающая замыкание электродов. Снятие пленки движущимися инструментами вызывает электротермическую эрозию обрабатываемого материала.

Наиболее целесообразно анодно-механическую обработку применять для разрезания твердых материалов, для наружного и внутреннего шлифования и заточки режущего инструмента из твердых сплавов.

### Лучевые методы обработки

Особенностью лучевых методов обработки является отсутствие рабочего инструмента, роль которого выполняет непосредственно

луч. Лучевые методы обработки особенно целесообразны для получения отверстий небольших размеров, так как изготовление инструмента в этих случаях очень трудоемко. Он быстро выходит из строя вследствие поломки, а при точных размерах изделия – из-за износа. Основными разновидностями лучевой обработки являются электронно-лучевая и светолучевая.

**Электронно-лучевая обработка.** Она основана на использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов поверхностью обрабатываемого изделия. При этом кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую и только незначительная часть (0,1 – 3 %) – в рентгеновское излучение.

Чем выше кинетическая энергия потока электронов и чем меньше площадь, на которой она сосредоточена, тем быстрее происходит нагрев.

В качестве источника свободных электронов (термокатода) используют металлическую проволоку (вольфрам, тантал и др.), нагретую до высокой температуры в глубоком вакууме.

В этих условиях электроны не испытывают столкновений с молекулами воздуха и друг с другом. При этом вся энергия, получаемая отдельными электронами, затрачивается на придание электрону определенной скорости. Количество электронов, испускаемых термокатодом, зависит от температуры нагрева и его материала.

Электроны сжимаются и формируются в узкий луч с высокой концентрацией энергии при помощи магнитных линз, представляющих собой катушки специальной формы.

Частоту и длительность импульсов подбирают таким образом, чтобы материал находился под воздействием электронного луча в течение очень малого промежутка времени. В этом случае луч будет расплавлять материал в ограниченной зоне, не вызывая резкого повышения температуры обрабатываемого материала в близко расположенной области.

Толщина слоя вещества, в котором электрон полностью теряет свою скорость, называется пробегом электрона. Глубина проникновения электрона зависит от значения ускоряющего напряжения.

Проникающий в материал электрон теряет энергию не сразу, а в процессе многочисленных соударений с решеткой, в результате этих столкновений меняются скорости и направление движения электронов. Потеря энергии электронами максимальна на некотором расстоянии от поверхности материала. Наиболее интенсивное выделение теплоты наблюдается на глубине пробега электрона.

На рис. 3.4 показана схема установки для обработки и сварки с помощью электронного луча. Источником электронов является катод 1, помещенный в формирующий электрод 2. При нагреве катода с его поверхности излучаются электроны, которые под воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между анодом 3 и катодом, приобретают высокую скорость и направляются в фокусирующую катушку 4. С помощью отклоняющей катушки 5 луч можно перемещать по поверхности детали 6, установленной на столе 7. Оптическая система наблюдения состоит из зеркала 8 и микроскопа 9.

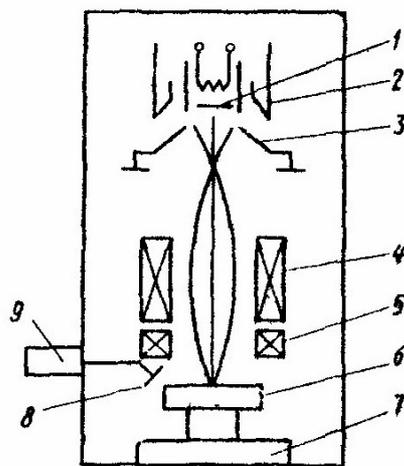


Рис. 3.4. Схема установки

Если система, отклоняющая луч, не работает, а изделие стоит неподвижно, то луч выполняет роль сверла.

Обработка осуществляется лучом малого диаметра ( $I - 10$  мкм) при плотности энергии  $10^7 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Длительность импульса составляет  $10^{-2} - 10^{-5}$  с. Электронный луч оказывает очень небольшое давление ( $\sim 1$  Па) на поверхность, а температура в месте воздействия луча достигает  $8000^\circ\text{C}$ . При этом металл мгновенно испаряется.

Электронно-лучевая обработка применима для всех материалов (металлов, ферритов, стекла, алмазов, графитов и др.). Благодаря малому времени воздействия теплоты термическое влияние на периферийные области незначительно. Недостатком метода является сложность установки из-за необходимости иметь вакуумную камеру.

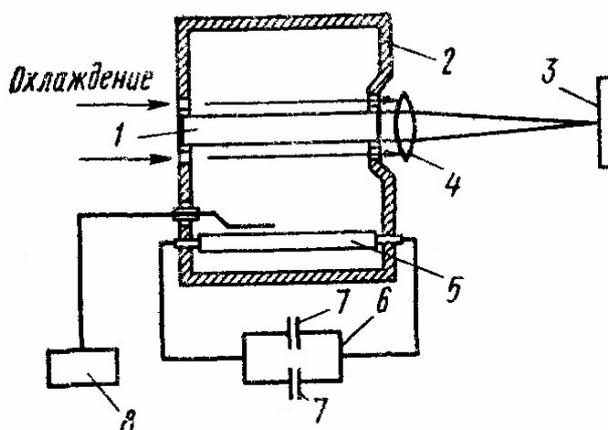
**Светолучевая обработка.** Она основана на применении лазера, представляющего собой квантовый генератор (усилитель) когерентного излучения оптического диапазона. Слово «лазер» составлено из начальных букв английского словосочетания «усиление света выну-

жденным излучением». Он способен давать весьма узкие направленные пучки монохроматического и когерентного излучений, характеризующиеся очень высокой плотностью тепловой энергии. Температура в зоне действия луча достигает до  $8000^{\circ}\text{C}$ .

Наиболее важным свойством лазерного излучения, используемого для технологических целей, является когерентность. При когерентном излучении волновые лучи, которыми называют несколько волн, идущих друг за другом, распространяются в одном направлении, имеют одинаковую длину волны и находятся в фазе друг с другом. Высокая степень когерентности проявляется также в малой расходимости лазерного луча. Когерентный лазерный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром порядка длины световой волны (1–10 мкм). Используя фокусировку, можно повысить интенсивность лазерного излучения.

В зависимости от рода активного материала различают лазеры на основе твердого тела (твердотельные), газовые и жидкостные.

Лазер на основе синтетического рубина показан на рис. 3.5. Он представляет собой оксид алюминия, в котором некоторые из атомов алюминия заменены атомами хрома (до 0,05 %), являющимися активными центрами.



*Рис. 3.5.* Принципиальная схема оптического генератора

Рубин 1 и импульсная лампа вспышки 5 устанавливаются в камере 2. Внутренняя поверхность камеры отполирована и является отражателем света. Зарядный агрегат 6 состоит из батареи конденсаторов 7. При помощи пускового устройства 8 происходит разряд конденсаторов и появляется вспышка света длительностью  $10^{-3}$  с. Свет

фокусируется на рубиновом стержне, в результате чего атомы хрома переходят на более высокий энергетический уровень. Торцы рубина 1 отполированы и представляют собой зеркала. Один торец покрыт плотным непрозрачным слоем серебра, а другой (со стороны линзы 4) имеет коэффициент пропускания около 8 %. Линза 4 формирует испускаемое излучение и направляет его к обрабатываемому изделию 3.

Под воздействием фотона атом, находящийся на верхнем уровне (возбужденный атом), может перейти на прежний (нижний) уровень. При этом появится новый фотон (вторичный). Переход атома на прежний уровень может происходить и за счет релаксационных процессов, стремящихся вернуть систему в равновесное состояние. Такой переход называется самопроизвольным или спонтанным, который имеет случайный характер. Если большинство атомов окажется на верхнем уровне, то будут происходить процессы индуцированного (вынужденного) излучения. Основной задачей при создании квантовых генераторов является получение инверсного состояния, то есть такого, когда число атомов на верхнем уровне превышает их число на нижнем уровне. Луч света, образовавшийся в результате возвращения атомов в исходное состояние, проходя вдоль оси рубина и многократно отражаясь, достигает большой интенсивности и проходит через полупрозрачный торец рубина.

Лазерную технологию широко используют при производстве электронных устройств, для получения отверстий малого размера в твердых материалах (ферритах, стекле и др.), сварки, термообработки, скрайбирования, маркировки и ряда других процессов.

Важной особенностью светолучевой сварки является малая длительность термического цикла, что обеспечивает возможность обработки материалов, особенно чувствительных к воздействию теплоты. Краткость импульсов предотвращает возможность получения крупнозернистой структуры и окисления металлов.

Возможность точной дозировки энергии делает этот метод особенно перспективным для сварки монтажных соединений в интегральных микросхемах. При этом возможна сварка через прозрачные оболочки, которые не являются препятствием для светового луча.

Сварка световым лучом имеет достаточно высокую производительность. Ее можно выполнять на воздухе, в атмосфере инертных газов и вакууме. При этом не требуется защиты обслуживающего персонала от рентгеновского облучения, вследствие чего оборудование значительно упрощается.

В производстве интегральных микросхем широко используют процесс скрайбирования, который заключается в нанесении на поверхность материала канавок, после чего материал легко раскалывается. Замена механического алмазного скрайбирования полупроводниковых пластин на лазерное скрайбирование или резку обеспечивает высокую производительность процесса и высокое качество выполнения операции. Лазеры широко применяют при маркировке хрупких изделий малых размеров и для зачистки монтажных проводов.

### Обработка ультразвуком

Ультразвуковая обработка представляет собой ударно-абразивный метод обработки твердых и хрупких материалов. Она осуществляется (рис. 3.6) инструментом 1, колеблющимся с ультразвуковой частотой 18 – 20 кГц. Под торец инструмента подается водная суспензия абразивного порошка. Зерна абразива 2, «вбиваемые» инструментом в заготовку 3, скалывают материал мелкими частицами, которые вместе с размельченным абразивом уносятся жидкостью. Если же инструмент ударяет по свободно висящему в жидкости зерну абразива, то выкалывания частиц материала изделия не происходит.

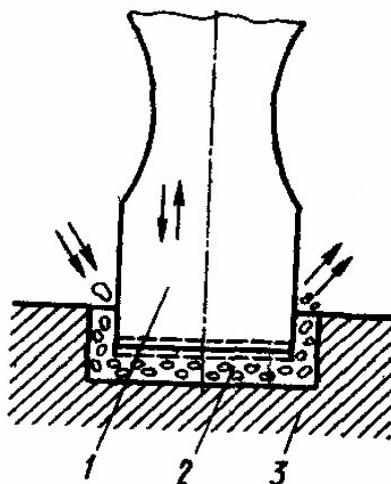


Рис. 3.6. Схема ультразвуковой обработки

Кавитационные явления сообщают зернам абразива скорости в десятки раз меньшие, чем инструмент в момент удара по зернам, но кавитация усиливает циркуляцию суспензии, что способствует попаданию свежего абразива в зону обработки, а также удалению сколотых частиц и разрушенных зерен абразива.

Этим методом хорошо обрабатываются твердые и хрупкие материалы: керамика, кварц, рубин, алмаз, кремний, твердые сплавы и др. При точной обработке применяют инструмент из незакаленной стали, так как при закалке может произойти его деформация.

Максимальная скорость съема материала по обработке стекла составляет  $9000 \text{ мм}^3/\text{мин}$ , а по твердому сплаву –  $200 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Вязкие материалы (например, сталь незакаленная) плохо обрабатываются ультразвуковым способом, так как под ударами зерен абразива не происходит сколов материала изделия, а зерна просто внедряются в обрабатываемый материал.

Производительность ультразвуковой обработки зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, зернистости абразива, состава абразивной суспензии, амплитуды колебаний инструмента и др.

Скорость обработки растет пропорционально квадрату амплитуды. В настоящее время максимальные амплитуды колебаний принимают в  $45\text{--}50 \text{ мкм}$ . Дальнейшее увеличение амплитуды приводит к быстрому усталостному разрушению инструмента.

Точность и частота обработанной поверхности при ультразвуковой обработке в основном зависят от величины зерен абразива в суспензии.

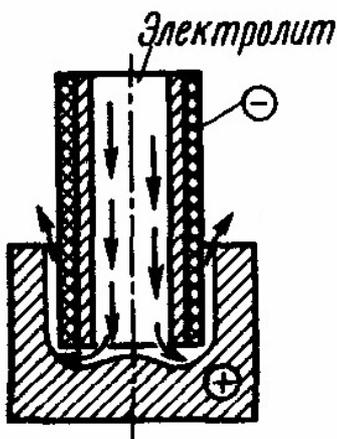
Наиболее целесообразно ультразвуковую обработку применять для обработки изделий из твердых сплавов (глухие отверстия штампов, пресс-форм и др.), резки германия и кремния, обработки алмазных и твердосплавных фильер, ферритовых плат и др.

### **Электрохимическая обработка**

Электрохимическая размерная обработка основана на явлении анодного растворения металла и удаления продуктов электрохимической реакции с обрабатываемой поверхности. Ее применяют для обработки токопроводящих материалов. При этом отсутствуют высокие давления и температуры, а, следовательно, и структурные изменения в поверхностном слое.

Производительность обработки не зависит от размеров деталей. Основные разновидности электрохимической обработки: анодно-гидравлическая в проточном электролите, электрохимическое полирование в неподвижном электролите и анодно-механические способы чистовой обработки. Анодное растворение происходит без образования механически прочных анодных пленок, вследствие чего удаление

продуктов электролиза осуществляется в результате принудительного интенсивного потока электролита. Интенсивность съема металла может достигать до  $400 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . При анодно-гидравлическом сверлении (рис. 3.7) инструментом служит медная трубка, изолированная снаружи. Под давлением вытекающего электролита между торцевой поверхностью трубки и детали образуется зазор, исключающий замыкание электродов. При прохождении электрического тока через электролит происходит растворение металла детали. Продукты электролиза удаляются электролитом. По мере растворения изделия трубка углубляется в деталь, поддерживая постоянство межэлектродного зазора.



*Рис. 3.7.* Анодно-гидравлическая обработка

Анодно-гидравлическую обработку целесообразно применять для снятия заусенцев у деталей сложной формы (мелкомодульные шестерни, храповые колеса и др.). Механическое удаление заусенцев является весьма трудоемкой операцией и не обеспечивает высокого качества деталей. При анодно-гидравлической обработке удаляются мельчайшие заусенцы и значительно повышается производительность труда. В практике находят применение анодно-механическое шлифование наружных цилиндрических поверхностей и чистовая обработка плоскостей.

В настоящее время используют комбинированные методы обработки, у которых анодное растворение металла сочетается с эрозионным или ультразвуковым разрушением, а продукты реакции удаляются с обрабатываемой поверхности механическим путем и выносятся из рабочей зоны потоком электролита.

## Обработка при помощи плазмы

Плазмой называют ионизированный газ, перешедший в это состояние в результате нагрева до очень высокой температуры или вследствие столкновения частиц газа с быстрыми электронами (в газовом разряде). При этом молекулы распадаются на атомы, от которых отрываются электроны и возникают ионы. Последние ионизируют газ и делают его электропроводным. Однако не всякий ионизированный газ можно назвать плазмой. Необходимым условием существования плазмы является ее электрическая квазинейтральность, то есть она должна содержать в единице объема примерно равное количество электронов и положительно заряженных ионов. Наряду с ними в плазме может находиться некоторое количество неионизированных атомов или молекул.

На плазму могут воздействовать магнитные и электрические поля.

Внешнее магнитное поле позволяет сжимать струю плазмы, а также управлять ею (отклонять, фокусировать).

Большая степень ионизации обуславливает высокую температуру газоразрядной плазмы, которая может достигать  $50\ 000^{\circ}\text{C}$  и выше. Свойства плазмы можно изменять путем применения различных газов (азота, аргона, водорода, гелия и др.).

Основным методом получения плазмы для технологических целей является пропускание струи сжатого газа через пламя электрической дуги.

Современные плазменные горелки делят на горелки прямого действия (с внешней дугой) и косвенного действия (с внутренней дугой).

Горелки прямого действия (рис. 3.8, *a*) применяют для обработки электропроводящих материалов. Дуга возбуждается между обрабатываемым изделием 4, являющимся анодом, и вольфрамовым электродом 1 (катодом). Поток газа поступает в охлаждаемую водой 2 медную оболочку 3. Дуга, выходя из сопла, направляется вместе с потоком газа к изделию.

В качестве рабочего газа наиболее часто используют аргон, который ионизируется. При использовании в качестве рабочего газа гелия скорость истечения струи при температуре  $10\ 000 - 15\ 000^{\circ}\text{C}$  приблизительно равна звуковой.

Горелки косвенного действия можно применять для обработки токопроводящих материалов и диэлектриков.

В горелках косвенного действия (рис. 3.8, б) дуга образуется между вольфрамовым катодом 1 и стенками медного сопла 3. Поток газа, охлаждаемого водой 2, поступает в медную оболочку, и, проходя через дугу, ионизируется. Дуга под действием струи газа выходит за пределы сопла, а плазма в виде факела и направляется на обрабатываемое изделие 4, которое изолировано от дуги.

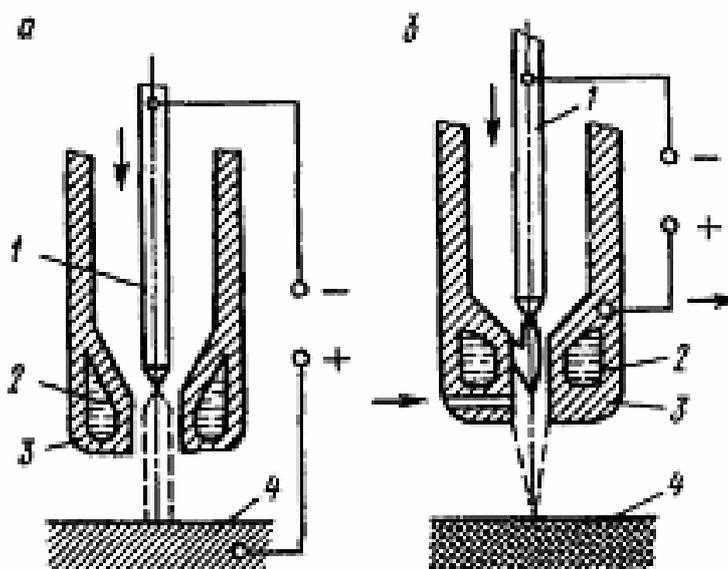


Рис. 3.8. Плазменные горелки прямого (а) и косвенного (б) действия

Практическое осуществление плазменных горелок оказалось возможным благодаря способности плазмы сжиматься в узкий пучок. Защитой сопла от разрушения служит оболочка газа, которая образует прослойку между факелом и стенками сопла.

Наиболее целесообразно плазменный нагрев использовать для напыления тугоплавких неметаллических материалов, которые вводятся в плазму в виде порошка. Этим методом можно получать многослойные покрытия из одного или нескольких порошков.

Качество покрытий зависит от подготовки поверхности, вида применяемого порошка и материала основания. Подготовка поверхности заключается в очистке и обезжиривании.

При помощи плазменной горелки можно обрабатывать материалы любой твердости и любого химического состава.

Весьма эффективно применение плазмы при резке нержавеющей сталей и других металлов. Поверхность среза при этом получается гладкой, а глубина зоны влияния – незначительной.

## **3.2. Защитные покрытия**

### **Виды защитных покрытий**

Назначение покрытий – защита от коррозии, придание красивого внешнего вида и некоторых свойств поверхностному слою, отличных от основного металла (твердости, электропроводности и др.).

Процесс коррозии заключается в окислении металла и превращении его в соответствующие химические соединения. Коррозия металлов причиняет огромный ущерб народному хозяйству. Ежегодно вследствие коррозии разрушается много тысяч готовых изделий. Особенно интенсивно корродируют черные металлы. Разрушающее действие коррозии сказывается не только на внешнем виде изделия, но и на его механических качествах, прочности и надежности в эксплуатации. Коррозия, например, может нарушить электрический контакт. Оксиды металла, образующиеся под действием влаги, могут распространяться по поверхности изоляционных материалов и тем самым создавать утечки или замыкания в схеме.

Виды покрытий. Вид защитно-декоративных покрытий определяется способом их получения, материалом и толщиной покрытия и его последующей обработкой. Различают покрытия на неорганической основе – металлические и химические (оксидные) и покрытия на органической основе – лакокрасочные, полимерные и пластмассовые.

Условия эксплуатации. При выборе вида покрытия необходимо учитывать условия эксплуатации: легкие (Л), средние (С), жесткие (Ж) и очень жесткие.

Легкие условия эксплуатации изделия характерны для закрытых, отапливаемых и вентилируемых помещений с незагрязненной атмосферой, при относительной влажности 65 % и температуре +25°C; средние условия эксплуатации характерны для изделий, эксплуатируемых в атмосфере, загрязненной небольшим количеством промышленных газов и пылью при отсутствии непосредственного воздействия атмосферных осадков и прямой солнечной радиации. Относительная влажность среды 95 % при температуре +30°C. В жестких условиях эксплуатируются детали негерметизированной аппаратуры при непосредственном воздействии атмосферных осадков, сернистых газов в атмосфере, загрязненной промышленными и топочными газами.

Особые условия эксплуатации (очень жесткие) определяются в каждом конкретном случае.

## Металлические покрытия

Металлические покрытия представляют собой тонкий слой металла, нанесенного на поверхность. В зависимости от характера защиты изделий от коррозии металлические покрытия разделяют на анодные и катодные.

Анодными защитными покрытиями называют такие, электрохимический потенциал металла которых в данной среде более электроотрицателен, чем электрохимический потенциал основного металла; катодными – покрытия с обратным соотношением потенциалов.

С точки зрения защиты от коррозии более целесообразно иметь анодное покрытие. Вследствие большой химической активности анодное покрытие быстро разрушается и непригодно в тех случаях, когда требуется хороший вид (декоративное покрытие).

Основные требования, предъявляемые к металлическим покрытиям, – прочное сцепление с основным металлом; мелкокристаллическая структура, обеспечивающая наилучшие механические свойства; минимальная пористость; равномерная толщина покрытия. В ряде случаев предъявляются и дополнительные требования (высокая твердость, износоустойчивость и др.), которые при определенных условиях эксплуатации могут стать и основными.

Технологический процесс нанесения покрытий включает в себя следующие основные этапы: подготовку поверхности, нанесение покрытий, промывку и сушку детали.

*Подготовка поверхности.* Этап включает в себя операции механической обработки, обезжиривания и декапирования (травления).

Механическую обработку производят с целью повышения чистоты поверхности, удаления неровностей, забоин, продуктов коррозии.

Обезжиривание поверхности осуществляют путем промывки в органических растворителях (бензине, керосине), обезжиривания известью, обработки в горячих щелочных растворителях (химическим или электрохимическим способом).

Декапирование (легкое травление) является заключительной операцией подготовки поверхности под покрытие. Осуществляют его путем погружения изделия на 1–2 мин в 5–10 %-ный раствор серной или соляной кислоты. Назначение этой операции – удаление с поверхности изделия тонких оксидных пленок и выявление структуры основного металла, что способствует лучшему сцеплению основного металла с металлом покрытия. После декапирования изделия промываются проточной водой.

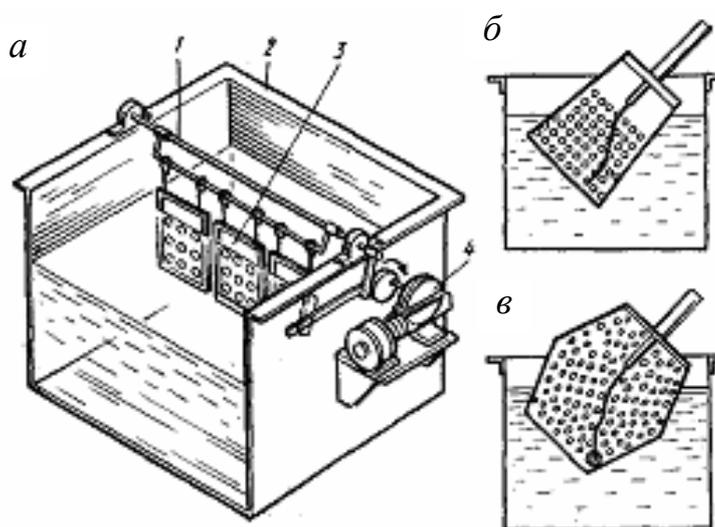
**Нанесение покрытий.** Металлические покрытия могут быть нанесены электролитическим (гальваническим), химическим и другими способами.

**Гальванический (электролитический)** способ является наиболее распространенным. Он заключается в осаждении металлов при электролизе водных растворов соответствующих солей. Покрываемая деталь является отрицательным полюсом (катодом), а металл покрытия – положительным полюсом (анодом).

Основным показателем, характеризующим процесс электролиза, является плотность тока на катоде, представляющая собой отношение силы тока к площади электрода.

На катоде, как правило, кроме металла выделяется водород. Вследствие этого, количество металла, отлагающегося на катоде всегда меньше расчетного.

Нанесение покрытий производится в гальванических ваннах (рис. 3.9). Детали помещают на подвесках или в сетчатых корзинках. Большинство электролитов требует подогрева и перемешивания. В этих случаях применяют ванны с качающимися штангами (рис. 3.9, а).



**Рис. 3.9.** Ванны для нанесения гальванических покрытий:  
а – с качающейся штангой; б, в – вращающиеся колокольного типа;  
1 – качающаяся катодная штанга; 2 – корпус;  
3 – подвески с деталями; 4 – привод

Они позволяют перемешивать электролит, не взмучивая шлам со дна ванны. Качание или встряхивание способствуют удалению с поверхности изделия выделяющихся при электролизе пузырьков водорода.

Покрытие мелких деталей целесообразно выполнять во вращающихся ваннах колокольного типа (рис. 3.9, б). Более равномерное покрытие получается в ваннах, имеющих форму двух усеченных конусов (рис. 3.9, в).

В массовом производстве используются автоматизированные агрегаты с программным управлением. Они представляют собой установки из ряда вайй, в которых выполняются все операции, начиная с обезжиривания и кончая сушкой. Подвески с деталями перемещаются в соответствии с заданным ритмом. Структура покрытий и равномерность отложения металла зависят от состава электролита, его температуры и чистоты, плотности тока и др.

Положительное влияние на структуру покрытия оказывает ток переменной полярности. Осадки металла получаются более мелкозернистые и плотные, чем при постоянном токе. Толщина гальванического осадка не бывает равномерной по всей его поверхности. Способность электролитической ванны давать равномерный по толщине осадок называется рассеивающей способностью ванны.

*Прочность сцепления металла покрытия с основным металлом зависит главным образом от состояния покрываемой поверхности.* Присутствие в электролите посторонних примесей не позволяет получить беспористые осадки.

Гальванический способ дает возможность получать покрытия высокого качества и строго определенной толщины. К числу недостатков относятся пористость и невозможность получения равномерного осадка на всех участках поверхности детали сложной формы. При выборе металла покрытия необходимо учитывать назначение покрытия, условия эксплуатации, материал детали и др. Нельзя допускать образования гальванических пор, вызывающих коррозию металла. Минимальная толщина покрытия должна обеспечивать требуемую защитную способность. Характеристики некоторых гальванических покрытий даны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Характеристики гальванических покрытий*

Вид покрытия	Условия работы и толщина покрытия, мкм	Область применения и свойства покрытия
1	2	3
Цинк	Л 6 – 9 С 15– 18 Ж 30– 36	Защита от коррозии деталей из черных металлов. Покрытия хорошо выдерживают изгибы, но плохо свариваются и паяются

1	2	3
Кадмий	Л 9– 12 С 15 Ж 24	По свойствам близок к цинковому покрытию, хорошо защищает в условиях морской среды
Хром по стали без подслоя	Л 18 С 36 Ж 48	Защита от коррозии, повышение твердости, износоустойчивости, жаропрочности. Покрытие хрупкое, пористое и плохо смачивается маслом
Хром по никелю	Л 6– 9 С 12– 15 Ж 18-21	
Никель по меди	Л 6– 9 С 12'– 15	Обладает магнитными свойствами, хорошо полируется, сохраняет блеск. Имеет зеркально блестящую поверхность
Олово по меди	Л 9 С 15	Для предохранения деталей от окисления, облегчения пайки, герметизации резьбовых соединений. Покрытие весьма пластично

*Химический* способ получения металлических покрытий осуществляется с помощью специальных растворов при отсутствии электрического тока. Он основан на восстановлении ионов осаждаемого металла в результате взаимодействия с восстановителем. Последний, окисляясь, отдает свои электроны, а находящиеся в растворе ионы металла, присоединяя электроны, превращаются в атомы и осаждаются в виде металлической пленки. Реакция восстановления протекает лишь на металлической поверхности, являющейся каталитической для данного процесса. Наиболее широко применяют химическое никелирование и меднение. Химическое никелирование дает возможность покрывать детали сложной формы и внутренние поверхности, которые недоступны для покрытия гальваническим способом. Оно состоит в восстановлении никеля из водных растворов. Химическое меднение используется для металлизации пластмасс при изготовлении печатных плат.

### **Химические и электрохимические покрытия**

*Химические* покрытия представляют собой тонкий слой оксида металла детали, образующийся на ее поверхности под действием тех или иных реагентов. Наиболее широкое применение из оксидных покрытий получили оксидирование и фосфатирование.

Оксидирование используют для защиты от коррозии черных и цветных металлов. Оксидные пленки на черных металлах могут

быть получены химическим и электрохимическим (анодно-оксидным) способами. Химический способ заключается в нагревании стальной детали в атмосфере водяного пара или расплавленной селитры. При этом на поверхности образуется защитная пленка.

Обычно химическое и электрохимическое оксидирование производится в растворе едкой щелочи. Электрохимическое оксидирование ведут при следующих режимах: анодная плотность постоянного тока  $5 - 10 \text{ А/дм}^2$ , температура электролита  $122^\circ\text{С}$  в течение  $10 - 30$  мин. Подготовка поверхности заключается, как и при гальванических методах, в механической обработке, обезжиривании и травлении. Качество пленок при химическом и электрохимическом оксидировании стали получается почти равноценным.

Толщина пленок составляет  $0,6 - 0,8$  мкм, но может достигать  $1,5 - 3$  мкм. Пленки эластичны, но не прочные и не могут быть использованы для деталей, работающих в условиях трения. Вследствие малой толщины и значительной пористости оксидные пленки защищают от коррозии при работе в легких условиях. Защитная способность их может быть повышена обработкой смазочными маслами или покрытием лаками. Размеры деталей при оксидировании практически не изменяются. Цвет оксидной пленки на малоуглеродистых сталях черный, на высокоуглеродистых – черный с серым оттенком.

Одним из основных методов защиты алюминия и его сплавов от коррозии является анодное оксидирование (*анодирование*), которое дает возможность получить пленки толщиной  $3 - 12$  мкм. В хромовокислых растворах получают пленки светло-серого цвета, в сернокислых — бесцветные. Для уменьшения пористости оксидной пленки применяют дополнительную обработку анодированных деталей горячей водой, водяным паром, пропитывание ланолином, парафином, лаками и т. п.

Оксидирование меди и ее сплавов используют для защиты от коррозии, деталей, работающих в атмосфере с нормальной влажностью. Толщина пленки составляет  $1 - 2$  мкм. Она более твердая и износостойчивая, чем основной металл, и довольно хорошо сопротивляется действию влаги. Лучшее качество покрытия получается при электрохимическом оксидировании.

*Фосфатирование* применяют в сочетании с защитными смазками или лакокрасочными покрытиями для защиты от коррозии черных металлов, магния, цинка, а также для уменьшения трения при разного рода вытяжках и для изоляции поверхности при лужении, цинкова-

нии и т. п. Фосфатный слой обладает хорошей адгезионной способностью, прочно удерживает масла, лаки и, краски, имеет высокое электрическое сопротивление и выдерживает напряжение до 1200 В. Жаростойкость пленки составляет 400 – 500°С. Фосфатные покрытия используют для изоляции трансформаторных, роторных и статорных пластин. Образование пленки на поверхности производится после вырубки, снятия заусенцев и отжига пластин.

Химическое фосфатирование осуществляют путем погружения деталей в ванну, содержащую фосфорно-кислые соли железа и марганца. Толщина пленки при мелкокристаллическом строении составляет 2 – 4 мкм, при крупнокристаллическом – 10 – 15 мкм. Фосфатирование практически не изменяет размеров детали, так как наряду с ростом толщины пленки уменьшается толщина металла за счет его растворения. Цвет покрытия — светло-серый или темно-серый. Для повышения коррозионной устойчивости необходимо производить дополнительную обработку, которая заключается в нанесении жировых пленок, лаков и красок.

### **Лакокрасочные покрытия**

Лакокрасочные покрытия применяют для придания поверхности детали антикоррозионных свойств и красивого внешнего вида. Их нельзя применять для деталей, имеющих точные допуски и трущиеся поверхности, подвергающихся механическим воздействиям и нагреву. Для обеспечения антикоррозионной защиты стальные детали предварительно подвергают цинкованию, детали из алюминия и его сплавов — анодированию, детали из магниевых сплавов – оксидированию.

Лакокрасочные покрытия классифицируют по материалу покрытия, внешнему виду поверхности покрытия (класс покрытия) и по условиям эксплуатации (группа покрытия).

Различают семь классов покрытия. Наиболее высокие требования предъявляются к внешнему виду поверхностей I класса. В этом случае не допускаются дефекты поверхности, видимые невооруженным глазом.

По степени блеска лакокрасочные покрытия делят на глянцевые, полуглянцевые и матовые. Группа покрытия выбирается по условиям эксплуатации (атмосферостойкие, химически стойкие, маслостойкие и др.)

Технологический процесс нанесения лакокрасочных покрытий состоит из этапов подготовки поверхности, грунтования, шпатлевания, нанесения покрытия, сушки.

*Подготовка поверхности* заключается в очистке ее от продуктов коррозии и загрязнений (химическим или механическим способом) и тщательном обезжиривании.

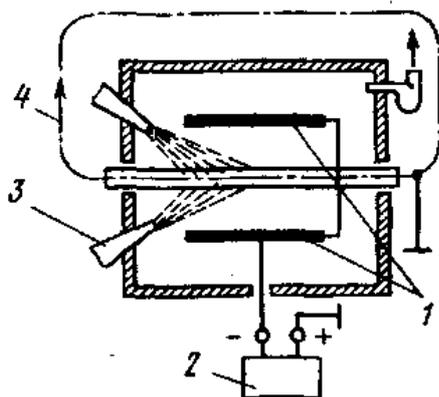
*Грунтование* – нанесение слоя грунта толщиной около 20 мкм. Основное назначение этой операции состоит в создании адгезии между металлом и последующими слоями лакокрасочного покрытия. Наиболее часто применяют масляные грунты (свинцовый и железный сурик на олифе), лаковые грунты и др. Грунт можно наносить распылением, окунанием или кистью. После нанесения каждого слоя производят сушку.

*Шпатлевание* – выравнивание загрунтованной поверхности. Шпатлевка – это пастообразная масса, состоящая из пигментов, наполнителей и лаков с добавлением или без добавления пластификаторов. Местное шпатлевание заключается в выравнивании отдельных углубленных мест. Затем проводят сплошное шпатлевание. Шпатлевки наносят на поверхность при помощи шпателя или краскораспылителя. В последнем случае их разбавляют растворителем. После нанесения шпатлевки поверхность сушат и шлифуют мелкой шкуркой.

*Нанесение* лакокрасочных покрытий производится с помощью кисти, окунанием и распылением. Окрашивание кистью является малопродуктивным процессом и применяется для медленно сохнущих лаков, для подкраски поверхности и нанесения обозначений по трафарету. Нанесение покрытий окунанием применяется для деталей, не требующих тщательной отделки и имеющих удобную для стекания краски форму. При этом способе получается неравномерная толщина пленки и повышенный расход материала. Более высокая производительность (в 7 – 12 раз) и высокое качество поверхности достигаются при окрашивании распылением. Однако этот метод связан с повышенным расходом материала и необходимостью вести процесс в специальной камере.

При *окраске в электростатическом поле коронного разряда* (рис. 3.10) изделие подвешивается на заземленный конвейер 4, проходящий между электродами 1, которые соединены с отрицательным полюсом источника 2 напряжения 100 кВ постоянного тока. Коронный разряд, возникающий между электродами и заземленным изделием, ионизирует молекулы воздуха, находящиеся в электрическом

поле. В образующееся электростатическое поле направляется от распылителя 3 струя краски. Частицы ее, заряжаясь отрицательно, притягиваются к положительно заряженным деталям. При этом способе повышается качество окраски, так как разброс по толщине составляет всего 5 – 8 мкм. Производительность труда повышается в 3 – 4 раза, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда и сокращается расход краски (ее потери составляют всего 5 – 10 %). Процесс окраски может быть полностью механизирован.



*Рис. 3.10.* Окраска  
в электростатическом поле

*Сушка* является заключительным этапом. Ее производят в сушильных шкафах, рефлекторных сушилках и т. д. Наиболее совершенна сушка инфракрасными лучами. Этот способ дает большую экономию энергии и позволяет значительно сократить производственные площади.

### **Контроль покрытий**

Покрытия проверяются по внешнему виду, толщине, пористости и прочности сцепления с основным материалом.

*Внешний вид* покрытия проверяют визуально с помощью лупы с увеличением 4х, сравнивая с эталонным образцом при дневном или искусственном свете.

Для контроля *толщины* металлических и неметаллических (неорганических) покрытий используют физические (неразрушающие) и разрушающие (химические) методы.

Сущность неразрушающих методов заключается в том, что в зависимости от толщины покрытия изменяются сила отрыва постоянного магнита от поверхности детали (магнитный метод), интенсив-

ность отражения  $\beta$ -излучения (радиоактивный метод,) магнитный поток, возникающий между преобразователем прибора и деталью (электромагнитный метод) и др.

Наиболее простым неразрушающим методом является весовой. Среднюю толщину покрытия (мкм) рассчитывают по формуле:

$$H_{cp}=(g_1-g_2)\cdot 10000/(S\gamma),$$

где  $g_1, g_2$  – массы детали до и после нанесения покрытия, г;

$S$  – площадь покрытия,  $см^2$ ;

$\gamma$  – плотность материала покрытия,  $г/см^3$ .

Химический метод контроля покрытий, называемый методом капли, заключается в том, что участок покрытия растворяется каплями раствора. Они наносятся и выдерживаются в течение определенного промежутка времени. Толщину покрытия рассчитывают по числу капель, которые наносят до тех пор, пока не обнаружится участок основного металла.

Местная толщина покрытия:

$$H_m=H_k(n-0,5),$$

где  $H_k$  – толщина покрытия, снимаемая одной каплей раствора в течение заданного времени, мкм;  $n$  – количество капель, израсходованных на растворение покрытия.

За результат принимают среднее арифметическое значение трех измерений.

Контроль *пористости* покрытий осуществляют путем наложения фильтровальной бумаги и паст. Эти методы основаны на химическом взаимодействии основного металла с реагентом в местах пор и других несплошностей покрытия с образованием окрашенных соединений. После снятия бумагу промывают и подсчитывают число пор, которые видны в виде точек или пятен.

Прочность сцепления покрытия можно определять методом изгиба под углом  $90^\circ$  или путем нанесения сетки царапин. В последнем случае на поверхности контролируемого покрытия наносят 4 – 6 параллельных линий глубиной до основного металлу, на расстоянии 2 – 3 мм друг от друга и 4 – 6 параллельных линий, перпендикулярных им. На контролируемой поверхности при этом не должно быть отслоения.

В *обозначении покрытия* указываются способ нанесения, вид покрытия, толщина покрытия, степень блеска, вид дополнительной обработки.

Гальванический способ нанесения покрытий, являющийся самым распространенным, в обозначении не указывается. Например, цинковое покрытие толщиной 12 мкм, матовое, наносится гальваническим методом, обозначается Ц12м.

В обозначении лакокрасочных покрытий указываются материал покрытия, внешний вид (класс покрытия) и условия эксплуатации (группа покрытия). Например, эпоксидная эмаль ЭП-140, цвет синий, IV класс отделки для изделий, эксплуатируемых внутри помещений (П). Обозначение: ЭмЭП-140, синий, IV, П.

### 3.3. Герметизация ЭС

#### Методы защиты от внешней среды

Для современных вычислительных устройств, эксплуатируемых в сложных климатических условиях, большое значение имеет защита их от воздействия внешней среды.

Герметизация. Одним из наиболее эффективных методов защиты от климатических факторов (влаги, пониженного давления и др.) является *герметизация*, которая может быть полной или частичной.

*Частичной герметизации* подвергаются наименее стойкие к внешним воздействиям детали и узлы (например, трансформаторы, дроссели и др.). При этом кожух не является герметизирующим элементом. Основным методом частичной герметизации – изолирование жидкими диэлектриками.

*Полная герметизация* достигается применением защитных корпусов из металла, керамики и других материалов. Она весьма эффективна для аппаратуры, устанавливаемой на летательных аппаратах. В этих случаях полная герметизация предохраняет не только от действия влаги и пониженного давления, но и исключает возможность электрического пробоя.

Широкое распространение получили комбинированные способы герметизации, в которых используются защитные корпуса, компаунды, изоляционные пленки, покровные лаки и др.

*Консервация*. Готовые изделия и запасные части к ним после сборки и испытания не сразу поступают в эксплуатацию, а подвергаются консервации. Различают консервацию длительную, местную и общую. Длительная консервация должна обеспечивать сохранность изделия в течение не менее двух лет. В случае более длительного хранения изделия подлежат переконсервации.

Местная консервация заключается в защите от коррозии отдельных наружных поверхностей. Для защиты деталей из алюминия, меди и их сплавов применяют технический вазелин. Смазку наносят кистью или путем окунания. Для этого технический вазелин нагревают до 45°С. Общая консервация достигается герметичной упаковкой изделия.

### **Процессы изолирования жидкими диэлектриками**

Основное назначение процессов изолирования жидкими диэлектриками заключается в защите отдельных деталей и элементов от влаги. Проникновение влаги в поры изоляционных материалов заметно ухудшает их свойства и вызывает возрастание диэлектрических потерь, а продолжительное воздействие влаги приводит к изменению электрических параметров элементов и нарушению режимов работы отдельных цепей.

*Методы защиты аппаратуры.* Основными методами защиты аппаратуры от влаги являются пропитка, заливка и обволакивание.

*Пропитка* заключается в заполнении пор, трещин, пустот, в изоляционных материалах, а также промежутков между конструктивными элементами узлов электроизоляционными негигроскопичными материалами. Пропитке подвергаются многие детали и узлы вычислительных устройств, изготовляемых из волокнистых электроизоляционных материалов, являющихся пористыми и гигроскопичными. Одновременно с повышением влагозащиты при пропитке достигается повышение механической прочности, нагревостойкости, диэлектрической прочности, теплопроводности и химической стойкости.

*Заливка* заключается в заполнении диэлектриком свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками кожуха или заливочной формы.

*Обволакивание* – процесс покрытия изделия пленкой только снаружи. Нанесенный слой удерживается на поверхности в результате адгезии, которой должны обладать материалы, применяемые для обволакивания.

Пропитка, обволакивание и заливка могут применяться самостоятельно и в любых сочетаниях.

Изоляционные материалы, применяемые для влагозащитных операций, должны иметь хорошие пропитывающие и высокие диэлектрические свойства, а также обеспечивать надежную работу в условиях воздействия резких перепадов температур, высокой влажности, агрессивных сред, радиации и механических перегрузок.

Герметизирующие материалы должны обеспечивать целостность готового изделия, поэтому важными свойствами их являются механическая прочность и адгезия к разнообразным материалам.

### **Электроизоляционные материалы**

Основными электроизоляционными материалами являются пропиточные лаки, компаунды, покровные лаки и эмали.

*Пропиточные лаки* состоят из пленкообразующих веществ (основы); растворителей; сиккативов – веществ, ускоряющих процессы отверждения лаковой основы; пластификаторов, придающих гибкость лаковой пленке. Изоляционные свойства лаков зависят от свойств основы. В качестве растворителя основы наиболее часто применяют авиационный бензин, этиловый спирт и др. Пропитка лаками не создает надежной герметизации, так как содержащиеся в них растворители в процессе сушки улетучиваются, оставляя поры. Применение многократных пропиток способствует перекрытию пор последующими слоями, но даже в этом случае они полностью не устраняются.

*Компаунды* – механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей. В момент применения компаунды находятся в жидком состоянии и твердеют при охлаждении (термопластические компаунды) или в процессе полимеризации (терморезактивные компаунды). В настоящее время широко применяют эпоксидные компаунды на основе смолы, представляющие собой смеси синтетических смол с добавлением отвердителей, наполнителей и пластификаторов. Свойства компаунда зависят не только от исходной смолы, а также от рода и количества отвердителя. Компаунды, состоящие только из смолы и отвердителя, обычно отличаются высоким коэффициентом термического расширения. При изолировании таким компаундом металлических деталей возникают большие внутренние напряжения, приводящие к растрескиванию изоляции. Для устранения внутренних напряжений в компаунд вводят наполнитель, который снижает температурный коэффициент линейного расширения, уменьшает усадку и улучшает теплопроводность компаунда.

Порошкообразные материалы (оксид алюминия, пылевидный кварц, молотая слюда, диоксид титана и др.) широко используют в качестве наполнителей. Для заливочных компаундов количество наполнителей составляет до 150 % по отношению к связующему веществу.

*Эмали и покровные лаки* используют для обволакивания. Они состоят из основы и растворителя, должны быстро сохнуть и образовывать блестящую пленку, хорошо сцепляющуюся с покрываемой поверхностью. Лаки и эмали могут отвердевать как при воздушной, так и при печной сушке.

*Технологический процесс влагозащитных операций.* Технологический процесс включает в себя операцию сушки, которая производится до и после пропитки, заливки и обволакивания.

*Предварительная сушка* необходима для удаления влаги из пор изоляционных материалов и промежутков в деталях и узлах. Наличие влаги в изделии ухудшает его качества, так как влага закупоривается внутри изделия и препятствует достаточно глубокому проникновению в нее пропитывающего состава. После пропитки, заливки и обволакивания сушка необходима для удаления растворителя и ускорения процесса формирования лаковой пленки или полимеризации терморезактивных материалов.

Температуру сушки устанавливают не ниже температуры кипения воды и не выше теплостойкости изоляционных материалов. Для сушки изделий с органическими изоляционными материалами наиболее приемлема температура сушки порядка  $105^{\circ}\text{C}$ , которую выдерживают большинство изоляционных материалов. Продолжительность сушки устанавливают опытным путем, причем критерием обычно служит сопротивление изоляции. Основными видами сушки являются конвекционная, радиационная, индукционная и вакуумная.

Пропитка может производиться при атмосферном давлении (свободная пропитка), под давлением и в вакууме.

*Пропитку при атмосферном давлении* используют в тех случаях, когда пропиточный состав имеет небольшую вязкость, а растворителем является вещество, обладающее большой летучестью (например, полистироловый лак, в котором до 90 % по весу составляет бензол). Пропитка состоит в погружении еще не остывших после сушки изделий ( $t=60 - 80^{\circ}\text{C}$ ) в лак. Свободная пропитка имеет ограниченное применение, так как не обеспечивает высокого качества изоляции.

Пропитку под давлением применяют при использовании вязких пропиточных составов или компаундов с наполнителями. Для создания избыточного давления используют нейтральный газ (азот, аргон и др.), так как атмосферный воздух вызывает повышение кислотности пропиточных составов и компаундов. При этом способе пропитки

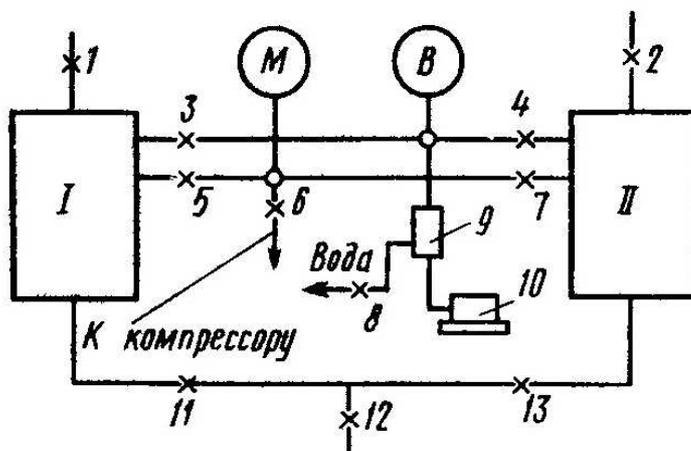
предварительно просушенные изделия загружают в специальные котлы (автоклавы) с пропиточным составом, где создается повышенное давление (0,5 – 1 Па), что ускоряет проникновение пропиточного состава в поры и капилляры изделий. Рекомендуется применять тренировочный режим, при котором каждые 5 – 10 мин снижают рабочее давление до атмосферного, а затем вновь повышают. По окончании 10 – 15 циклов давление снижают до атмосферного и изделия вынимают из автоклава. Этот способ обеспечивает проникновение пропиточного состава в глубокие и узкие поры.

*Пропитка в вакууме* осуществляется одновременно с сушкой. Для этой цели применяют специальные установки, имеющие два герметически закрывающихся бака с обогревателями. В один бак загружают изделия в сеточной корзине, а другой заполняют пропиточным составом. Затем включают обогрев и производят вакуумную сушку. После сушки пропиточный состав перекачивают из второго бака и производят вакуумную пропитку при остаточном давлении 266 Па в течение 10 мин. За это время в первом баке производят вакуумную сушку. По окончании вакуумной пропитки в первом баке пропиточный состав перекачивают обратно во второй бак, где начинается процесс пропитки. Изделия из первого (бака после стекания излишков пропиточного состава) выгружают и подвергают окончательной сушке. Пропитку можно вести и в одном баке. Тогда второй бак является только хранилищем для пропиточного состава.

Вакуумная циклическая пропитка применяется при вязком пропиточном составе. Установка для такой пропитки (рис. 3.11) состоит из автоклава *II* и подготовительного бачка *I*, которые закрываются герметическими крышками. Изделия, высушенные в сушильном шкафу, загружают в автоклав, нагретый до 80 – 90°C. По окончании вакуумной сушки, которая проходит в течение 5 – 10 мин, бачок отключают от вакуумной системы и заполняют пропиточным составом.

Для этого открывают краны трубопровода, соединяющего автоклав с бачком, в котором находится пропиточный состав. Под действием разности давлений пропиточный состав перегоняется в автоклав и в течение 5 – 10 мин проходит вакуумная пропитка. Затем открывают краны, соединенные с компрессором, и в бачке создают давление 0,3 – 0,6 МПа в течение 10 мин. После этого бачок *I* подключают к вакуумной системе и пропиточный состав возвращается в бачок. Вследствие чередования вакуума и давления пропиточный состав

полностью заполняет все поры и промежутки в изделии. Число циклов зависит от вязкости пропиточного состава.



**Рис. 3.11.** Вакуумная циклическая пропитка:  
*M* – манометр, *B* – вакуумметр, *I* – бачок, *II* – автоклав,  
 1, 2 – спускные краны; 3, 4 – краны линии вакуума,  
 5 – 7 – краны линии давления, 8 – водопроводный кран,  
 9 – фильтр, 10 – вакуумный насос,  
 11, 13 – краны прокачки пропиточного состава,  
 12 – сливной кран

*Заливка* применяется для получения относительно толстого изоляционного слоя (1 мм и более). Изделия, полученные заливкой, имеют точные размеры, устойчивы к воздействию влаги, механических нагрузок и изменению атмосферного давления. Наиболее часто заливку производят компаундами на основе эпоксидных смол. Изделие при этом помещают в ферму и заполняют заливочным материалом так, чтобы он полностью окружал изделие. После окончания процесса отверждения заливочного материала форма удаляется. При этом получается гладкая однородная поверхность изделия, повторяющая поверхность формы.

*Обволакивание* заключается в нанесении одного или нескольких слоев влагостойкого электроизоляционного материала на поверхность изделия. В качестве обволакивающего материала обычно применяют компаунды, в которые погружают изделия. После заливки их подвергают нагреву для полимеризации компаунда. Основное преимущество процесса заключается в его простоте, малом расходе материала при достаточно высокой степени защиты. Однако по надежности защиты метод обволакивания уступает заливке вследствие меньшей толщины изоляционного покрытия.

## **Полная герметизация**

Для общей защиты изделия от воздействия климатических факторов применяют специальные корпуса (кожухи) и оболочки, в которые заключают изделие. Выбор материала и конструкции герметического корпуса определяется назначением и сроком службы изделия. Наиболее широко применяют металлические корпуса, изготовленные из мягкой листовой стали. Если по условиям работы недопустимо использование ферромагнитных материалов, то корпуса изготавливают из листовой меди или листовой латуни. Для корпусов, выполненных из листового материала, необходимо предусматривать ребра жесткости.

Металлические корпуса могут быть изготовлены литьем, штамповкой или сваркой. Литые корпуса применяют главным образом в корабельной аппаратуре, а штампованные и сварные – в самолетной. Керамические и стеклянные корпуса используют для герметизации небольших изделий.

Оптимальной конструкцией является корпус, состоящий из двух герметичных деталей (основания и крышки), а обязательными конструктивными элементами такого корпуса – герметичные выводы. Необходимая герметизация крышки достигается различными прокладками из резины или других материалов. Сравнительно малая газонепроницаемость и высокий предел упругой деформации обусловили широкое применение резины как уплотняющего материала, хотя ей свойствен ряд недостатков (зависимость деформаций от температуры и времени, недостаточный диапазон температур и др.).

Широко распространенный способ получения герметичных соединений – пайка легкоплавкими припоями.

В настоящее время корпуса интегральных схем изготавливают со стеклянными изоляторами.

Для повышения степени герметизации свободное пространство корпуса заполняют заливочными материалами или нейтральным газом (азот, аргон и др.). Обязательным условием использования газов является очистка их от паров и тщательная сушка изделия. Если необходимо улучшить условие теплоотдачи, то для заполнения свободного пространства надо применять водород или гелий, которые обладают высокой теплопроводностью.

В процессе герметизации производится проверка корпуса с помощью избыточного давления.

### 3.4. Тест для проверки знаний

1. Какие методы размерной обработки основаны на разрушении поверхности электродов электрическим разрядом, проходящим между ними:

- а) электроискровой обработки;
- б) электроэрозионные;
- в) лучевые.

2. Какой метод размерной обработки основан на использовании комбинированного процесса анодного растворения и эрозионного воздействия на обрабатываемую деталь:

- а) электроискровой;
- б) анодно-механический;
- в) электронно-лучевой.

3. Какой метод размерной обработки основан на использовании импульсных искровых разрядов малой длительности и большой скважности:

- а) электроискровой;
- б) анодно-механический;
- в) электронно-лучевой.

4. Какой метод размерной обработки основан на использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов поверхностью обрабатываемого изделия:

- а) электроискровой;
- б) анодно-механический;
- в) электронно-лучевой.

5. При каком методе размерной обработки отсутствуют высокие давления, температуры, и производительность не зависит от размеров деталей:

- а) плазменной обработки;
- б) ультразвуковом;
- в) электрохимическом.

6. При нанесении каких покрытий используются технологические операции грунтования и шпатлевания:

- а) металлических;
- б) химических;
- в) лакокрасочных.

7. С какой целью на поверхность деталей ЭВС наносят металлические покрытия:

- а) повышение электропроводности;
- б) повышение коррозионной устойчивости;
- в) получение изоляции.

8. Расположите операции технологического процесса нанесения металлических покрытий в правильном порядке:

- |                          |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | промывка детали;               |
| <input type="checkbox"/> | механическая обработка детали; |
| <input type="checkbox"/> | нанесение покрытия;            |
| <input type="checkbox"/> | обезжиривание детали;          |
| <input type="checkbox"/> | сушка детали;                  |
| <input type="checkbox"/> | декапирование.                 |

9. Расположите операции технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий в правильном порядке:

- |                          |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | грунтование;                   |
| <input type="checkbox"/> | нанесение покрытия;            |
| <input type="checkbox"/> | подготовка поверхности детали; |
| <input type="checkbox"/> | сушка детали;                  |
| <input type="checkbox"/> | шпатлевание.                   |

10. Технологический процесс какого метода герметизации состоит из операций – фиксация изделия в пресс-форме, нагрев; заполнение расплавленным герметиком формующей полости; полимеризация пресс-композиции; извлечение изделия; очистка пресс-формы:

- а) пропитка;
- б) литьевое прессование;
- в) заливка.

11. Процесс заполнения пор, трещин, пустот в изоляционных материалах, а также промежутков между конструктивными элементами узлов электроизоляционными негигроскопичными материалами называется:

- а) пропитка;
- б) заливка;
- в) обволакивание.

12. Процесс заполнения диэлектриком свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками кожуха называется:

- а) пропитка;
- б) заливка;
- в) обволакивание.

13. Процесс покрытия изделия пленкой только снаружи называется:

- а) пропитка;
- б) заливка;
- в) обволакивание.

14. Нанесение одного или нескольких слоев влагостойкого электроизоляционного материала на поверхность изделия лежит в основе метода герметизации:

- а) заливки;
- б) обволакивания;
- в) пропитки.

15. К корпусным способам герметизации относятся:

- а) пассивирование;
- б) обволакивание;
- в) капсулирование.

16. Какому методу герметизации подвергаются наименее стойкие к внешним воздействиям детали и узлы:

- а) частичной герметизации;
- б) полной герметизации;
- в) комбинированному.

17. Какой метод герметизации предохраняет не только от действия влаги и пониженного давления, но и исключает возможность электрического пробоя:

- а) частичной герметизации;
- б) полной герметизации;
- в) комбинированный.

## 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

### 4.1. Элементы конструкций печатных плат

Наиболее важными факторами, влияющими на разработку конструкций печатных плат и их топологий, являются конфигурации выводов активных компонентов и шаг между ними, особенно для тех микросхем и их корпусов, конструкция которых определяется необходимой плотностью компоновки и, соответственно, плотностью монтажа. Эти факторы определяют облик конструкции печатной платы и печатного узла.

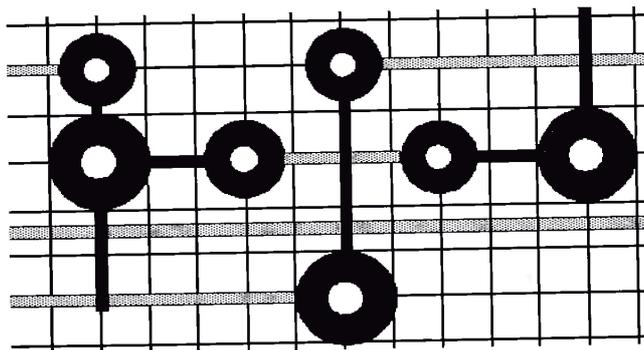
С самого начала кристаллы микросхем помещали внутрь керамических или пластмассовых корпусов. Примерно до 1980 г. все корпуса микросхем имели выводы, предназначенные для монтажа в металлизированные отверстия (PTH – Plated Through-hole) печатной платы и последующей пайки. Позднее, с увеличением интеграции, их выводы стали делать в форме, пригодной для технологии поверхностного монтажа (SMT – Surface Mounting Technology), ставшей преобладающей технологией монтажа электронных компонентов.

На промежуточном этапе развития технологий монтажа получили распространение корпуса микросхем, пригодные как для монтажа в отверстие, так и для поверхностного монтажа.

Основными типами корпусов микросхем, в зависимости от расположения их выводов, являются корпуса с периферийным расположением выводов, когда выводы расположены по краям кристалла или корпуса микросхемы, и корпуса с матричным расположением выводов.

Положение печатного рисунка на плате регламентируется условной координатной сеткой – ортогональной сеткой, состоящей из параллельных осей X-Y линий, условно или фактически нанесенных на чертеж печатной платы. Расстояние между двумя ближайшими параллельными линиями называют *шагом координатной сетки*. Точки пересечения линий координатной сетки называют узлами. Узлы координатной сетки предназначены для определения местоположения монтажных и переходных отверстий, контактных площадок для монтажа поверхностно-монтируемых компонентов. Поэтому шаг координатной сетки печатной платы должен строго соответствовать шагу выводов радиоэлементов (рис. 4.1).

В отечественной практике используют шаг основной координатной сетки 2,5 мм. По мере уплотнения печатного монтажа используют вспомогательные координатные сетки, шаг которых получают делением или умножением шага основной координатной сетки на 2. Таким образом получают ряд мелких шагов вспомогательных сеток: 0,625; 0,3125 мм и дополнительных шагов, получаемых путем сложения разных шагов, например,  $2,5+0,625=3,125$  или  $0,625+0,31,25=0,9375$  мм.



*Рис. 4.1.* Координатная сетка

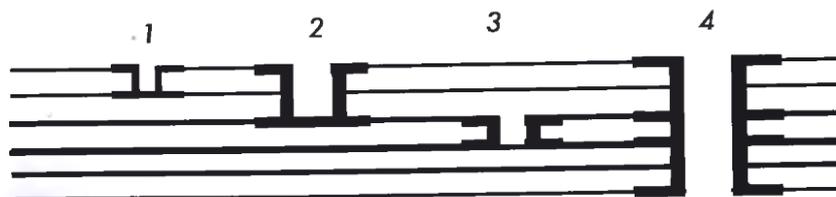
Иногда возникает необходимость назначения координатной сетки печатных проводников с шагами, отличающимися от шага основной или вспомогательной координатной сетки. Например, в отдельных случаях для уравнивания изоляционных зазоров удобно принять шаг проводников, равный 0,5 мм.

Сейчас при преимущественном использовании импортных компонентов с дюймовой метрической системой повсеместно перешли на так называемую дюймовую сетку с шагом основной координатной сетки 2,54 мм. Однако и современные импортные компоненты с матричной системой выводов начинают приобретать шаги в метрической системе измерений. Поэтому нужно быть готовым к смешению систем измерений и простановки размеров. В этом случае при переходе от дюймовой системы к метрической нужно проставлять размеры с округлением до знака, соответствующего допуску на проставляемый размер. Неправомерно, например, переводить дюймовый размер  $1/8''$  в метрический, как 3,175 мм, если допуск на этот размер проставляется  $\pm 0,1$  мм. Значение этого метрического размера нужно округлить до 3,2 мм.

Размеры печатных проводников по длине и ширине выбираются с позиций обеспечения электрических требований по плотности тока,

омическому сопротивлению, реализации специальных электрических параметров и механической устойчивости. С другой стороны, эти требования должны соответствовать разрешающей способности печатного рисунка. Последнее обстоятельство определяется принятым методом изготовления печатной платы и адгезионными свойствами базового материала.

Металлизированные отверстия выполняют роль монтажного элемента или межслойного соединения (рис. 4.2).



**Рис. 4.2.** Типы переходных отверстий, выполняющих роль межслойных соединений:

- 1 – глухое отверстие в одном уровне;
- 2 – глухое отверстие – соединение в двух уровнях;
- 3 – внутренний межслойный переход – слепое отверстие;
- 4 – сквозное отверстие

Диаметры сквозных монтажных отверстий для выполнения нормальных условий пайки должны быть на 0,2 – 0,4 мм больше диаметра вывода радиоэлемента. Вместе с этим гальваническое покрытие получается удовлетворительным при определенном соотношении между диаметром отверстия и толщиной платы. Это соотношение связано с рассеивающей способностью электролитов и, отчасти, с режимами гальванического осаждения.

Переходные сквозные отверстия должны быть отделены от монтажных контактных площадок, чтобы предотвратить вытекание припоя с монтажных поверхностей.

Основное условие гарантий надежности соединений по металлизированному отверстию состоит в том, что толщина медного гальванопокрытия без дефектов не должна быть менее 20 – 25 мкм. Чтобы не допустить дефектов металлизации в виде незначительных неметаллизированных участков, создающих очаги повышенной концентрации напряжений, толщину металлизации увеличивают до 30 – 35 мкм.

Характер проводящего рисунка во многом определяет технологичность конструкции, надежность производства печатных плат. Анализ практики производства позволяет сформулировать ряд правил для конструирования печатного рисунка.

При трассировке проводников следует избегать острых углов. Во внутреннем пространстве такого угла образуется своеобразный карман, в котором часто наблюдаются недотравленные места, где при пайке скапливаются наплывы и сосульки припоя. При незначительных напряжениях сжатия в гальванических осадках, в результате термических воздействий пайки, острый угол может отслоиться от основания. Если проводник находится под высоким потенциалом, острие угла приобретает высокий градиент электрического поля, здесь сосредотачиваются загрязнения в результате электростатического осаждения пыли. Создастся опасность электрического пробоя.

Целесообразно размеры контактных площадок со стороны монтажа выполнять меньшими или, по крайней мере, такими же, как и со стороны пайки, чтобы в общем балансе теплопереноса уменьшить теплоотвод со стороны монтажа. Для качественного формирования припоя, когда не используется паяльная маска, печатные проводники со стороны пайки следует располагать параллельно длинной стороне платы; в этом направлении наиболее вероятно движение платы при пайке волной припоя. Экраны и цепи питания, выполненные в виде массивов фольги, должны иметь вырезы и освобождения вокруг монтажных отверстий, чтобы предотвратить непропаи, отслоения фольги из-за напора газовой выделений из материала основания и обеспечить возможность демонтажа выводов элементов.

Существует четыре пути повышения плотности межсоединений и монтажа компонентов на печатных платах:

- уменьшение размера отверстий и контактных площадок, чтобы высвободить пространство для трассировки проводников;
- увеличение количества трасс между отверстиями за счет уменьшения ширины проводников и зазоров;
- введение многоуровневых межсоединений: отказ от сквозных отверстий в пользу глухих и слепых межслойных переходов;
- увеличение количества слоев.

Следует отметить, что большая часть аппаратуры выполнена с использованием двусторонних печатных плат. Если возникает необходимость в особо плотном монтаже, современные технологии и средства проектирования позволяют обойтись 6 – 10 слоями.

## **4.2. Классификация конструкций печатных плат**

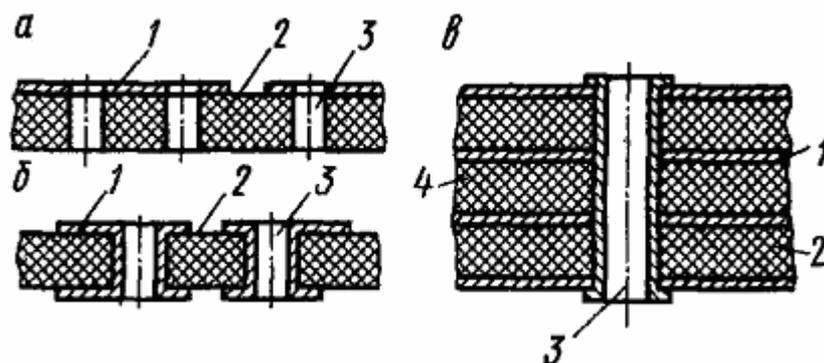
Под печатной платой понимается конструкция электрических межсоединений на изоляционном основании. Печатная плата с уста-

новленными и смонтированными на ней электронными компонентами представляет собой печатный узел, способ его формирования назван печатным монтажом. Проводники, лежащие в одной плоскости, называют печатным рисунком, слоем. По функциональному назначению различают сигнальные (информационные), потенциальные (заземление, питание), экранирующие и технологические слои проводников, а по расположению – внутренние и внешние слои. Кроме проводников платы содержат следующее:

- присоединительные элементы монтажа: контактные площадки и монтажные отверстия;
- фиксирующие (базовые) элементы для совмещения выводов корпусов электронных компонентов с контактными площадками или монтажными отверстиями на печатной плате;
- печатные ламели для контактирования с разъемами;
- теплоотводящие и тепловыравнивающие участки;
- маркированные слои;
- технологические контактные площадки;
- паяльные маски – термостойкое электроизоляционное пленочное покрытие;
- элементы схем, выполняемые методами печати: индуктивности, емкости, сопротивления.

В зависимости от назначения и от возможностей производства печатные платы выполняют односторонними, двусторонними или многослойными, на жестком или гибком основании.

**Односторонние печатные платы** (рис. 4.3, а) представляют собой изоляционное основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок.



**Рис. 4.3.** Сечения печатных плат:

- а – односторонней; б – двусторонней; в – многослойной;  
 1 – медные проводники; 2 – диэлектрик; 3 – отверстия;  
 4 – межслойная изоляция

Для механической фиксации выводов штыревых компонентов в плате служат сквозные неметаллизированные отверстия, а для присоединения – контактные площадки, которыми заканчиваются все печатные проводники. Трассировка проводников на одной поверхности (в одном слое, в одном уровне) не позволяет разрешить конфликт пересекающихся трасс иначе, как установкой навесных проводных перемычек.

**Двусторонняя печатная плата** (рис. 4.3, б) имеет одно основание, на обеих сторонах которого выполнены проводящие рисунки, и все требуемые электрические соединения двух сторон соединяются преимущественно сквозными металлизированными отверстиями. Конфликты пересекающихся соединений здесь решаются возможностью переноса конфликтующей трассы в обход на другую сторону печатной платы с использованием металлизированных отверстий. Такое отверстие для переноса трассы называют переходным, в отличие от монтажного. При этом конструкция переходного отверстия может быть произвольной, а монтажного – по нормам формирования паяного узла.

**Многослойные печатные платы** (МПП) (рис. 4.3, в) содержат чередующиеся слои тонких изоляционных подложек с нанесенными на них проводящими рисунками, физически соединенными в одно многослойное основание. Электрические соединения в многослойной структуре МПП осуществляются сквозными (преимущественно) или глухими отверстиями. Каждый из внутренних слоев может представлять собой одностороннюю плату или двустороннюю с межслойными переходами.

Слои в МПП имеют определенное функциональное назначение:

- наружные монтажные слои конструируются и используются для монтажа электронных компонентов;

- сигнальные слои несут на себе топологическую схему сигнальных межсоединений;

- слои земли и питания выполняют, как правило, большими полигонами с минимальным омическим и индуктивным сопротивлением, они одновременно служат электрическими экранами, заземленными по высокой частоте развязывающими емкостями;

- теплоотводящие или тепловыравнивающие слои.

Увеличение плотности компоновки, связанное с этим увеличение количества межсоединений обычно решались увеличением слоев.

Существуют примеры создания 40 и более слойных МПП. Сегодня преимущественное направление увеличения количества межсоединений:

- увеличение плотности трасс за счет уменьшения шага трассировки с одновременным уменьшением ширины проводников;
- выполнения межслойных переходов в шаге трасс, то есть в размерах тонких проводников;
- выполнением многоуровневых межсоединений в многослойных структурах: сквозных, слепых, глухих (рис. 4.4).

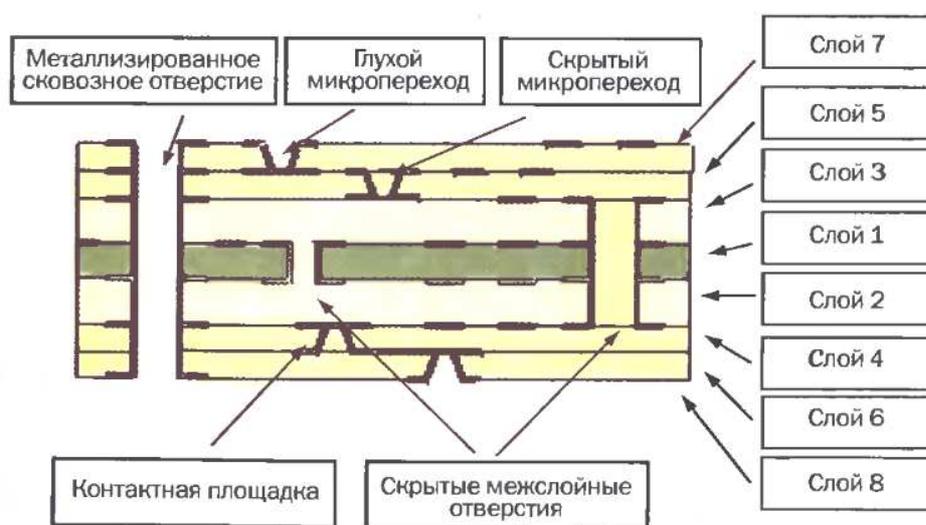


Рис. 4.4. Многоуровневые межсоединения в МПП

**Гибкие печатные платы**, по существу, реализации межсоединений подобны односторонним, двусторонним и многослойным с той разницей, что изоляционные и металлические слои выполняются тонкими для гибкости из материалов, выдерживающих многократные изгибы.

Использование гибких диэлектрических материалов для изготовления печатных плат дает как разработчику, так и пользователю электронных устройств ряд уникальных возможностей. Это, прежде всего, – уменьшение размеров и веса конструкции, повышение эффективности сборки, повышение электрических характеристик, теплоотдачи и, в целом, надежности.

Если учесть основное свойство таких плат – динамическую гибкость – становится понятным все возрастающий объем применения таких плат в автомобилях, бытовой технике, медицине, в оборонной и аэрокосмической технике, компьютерах, в системах промышленного контроля и бортовых системах.

Гибкие печатные платы (ГПП) изготавливаются на полиимидной или лавсановой пленке и поэтому могут легко деформироваться даже после формирования проводящего рисунка. Большая часть конструкций гибких ПП аналогична конструкциям печатных плат на жесткой основе.

### 4.3. Методы изготовления печатных плат

Основные технологические принципы изготовления печатных плат:

- 1 – субтрактивный;
- 2 – аддитивный;
- 3 – полуаддитивный, сочетающий преимущества субтрактивного и аддитивного методов;
- 4 – комбинированный.

#### Субтрактивные методы

Субтрактивный метод наиболее освоен и распространен для простых и очень сложных конструкций печатных плат. Собственно, с него исторически начиналась индустрия печатных плат. В качестве исходного материала используются фольгированные (в основном медью) изоляционные материалы. После переноса рисунка печатных проводников в виде стойкой к растворам травления пленки на фольгированную основу, незащищенные ею места химически стравливаются. Защитную пленку наносят методами полиграфии: фотолитографией, трафаретной печати и др. При использовании фотолитографии, защитная пленка формируется из фоторезиста материала, чувствительного через фотокопию печатного рисунка–фотошаблон. При трафаретной печати используют специальную, химически стойкую краску, называемую трафаретной.

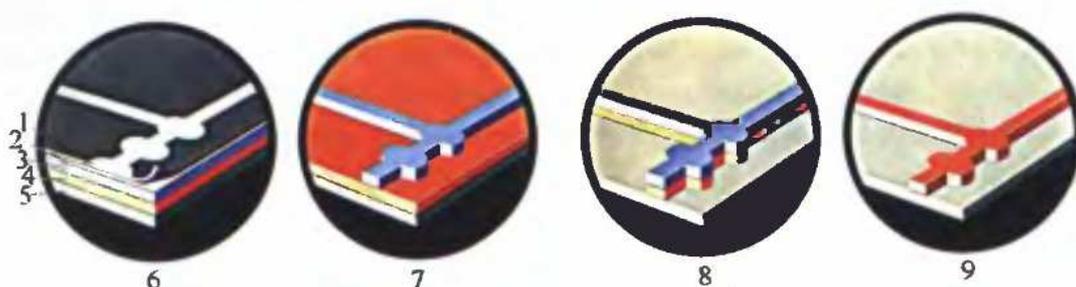
Субтрактивный метод, в чистом виде, реализуется в производстве односторонних печатных плат, где присутствуют только процессы селективной защиты рисунка проводников и стравливания металла фольгированных диэлектриков с незащищенных мест.

На рисунке 4.5 приведен фрагмент субтрактивного (химического) метода изготовления на основе фотолитографии.

Схема стандартного *субтрактивного (химического)* метода изготовления односторонних печатных плат (рис. 4.5):

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий;

- подготовка поверхности фольги (дезоксидация), устранение заусенцев;
- трафаретное нанесение кислотостойкой краски, закрывающей участки фольги, не подлежащих вытравливанию;
- травление открытых участков фольги;
- сушка платы;
- нанесение паяльной маски;
- горячее облуживание открытых монтажных участков припоем;
- нанесение маркировки;
- контроль.



**Рис. 4.5.** Фрагменты субтрактивного (химического) метода изготовления ПП:

- 1 – фотошаблон; 2 – защитная пленка; 3 – фоторезист; 4 – фольга;  
 5 – основание ПП; 6 – экспонирование фоторезиста через фотошаблон и защитную пленку; 7 – рисунок из фоторезиста проявлен и способен защитить фольгу от травления; 8 – рисунок из фольги вытравлен;  
 9 – фоторезист удален (мешает пайке), после сверления монтажных и крепежных отверстий плата будет готова

Вместо химического травления изоляционные зазоры между проводниками можно формировать механическим удалением при помощи режущего инструмента. Для изготовления односторонних печатных плат можно обойтись всего одним станком с ЧПУ, позволяющим по программе сверлить сквозные отверстия и скрайбировать зазоры.

**Скрайбирование** обычно ведется коническими фрезами 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 подложки, неравномерный прижим заготовки к рабочему столу могут привести к разбросу ширины реза. Именно поэтому сверлильно-фрезерные станки должны иметь специальные прижимные головки, принудительно выравнивающие заготовки плат в плоскость стола станка.

Метод отличается коротким технологическим циклом изготовления, малой капиталоемкостью, не создает экологических проблем. Он очень удобен для изготовления полноценных экспериментальных образцов монтажных подложек. Но образцы плат получаются дороже (большой расход фрез), чем изготовленные химическим методом. Поэтому и из-за большого ритма выпуска (плата изготавливается более, чем 4 часа) этот метод не годится для серийного производства.

### **Аддитивные методы**

Эти методы предполагают использование нефольгированных диэлектрических оснований, на которые тем или другим способом избирательно (там, где нужно) наносят токопроводящий рисунок. Разновидности метода определяются способами металлизации и избирательностью металлизации.

*Токопроводящие элементы рисунка можно создать следующим образом:*

- химическим восстановлением металлов на катализированных участках диэлектрического основания (толстослойная химическая металлизация – ТХМ);
- переносом рисунка, предварительно сформированного на металлическом листе, на диэлектрическую подложку (метод переноса);
- нанесением токопроводящих красок или паст или другим способом печати;
- восстановительным вжиганием металлических паст в поверхность термостойкого диэлектрического основания из керамики и ей подобных материалов;
- вакуумным или ионно-плазменным напылением;
- выштамповыванием проводников.

*Избирательность осаждения металла можно обеспечить следующим образом:*

- фотолитографией (через фотошаблон) фоторезиста, закрывающего в нужных местах участки поверхности основания, неподлежащие металлизации (для метода толстослойной химической металлизации – ТХМ);
- избирательным фотоочувствлением (через фотошаблон или сканирующим лучом) катализатора, предварительно нанесенного на всю поверхность основания (для фотоаддитивного метода ТХМ);
- трафаретной печатью (для паст и красок);
- масочной защитой.

**Фотоаддитивный процесс** (рис. 4.6). Схема процесса *фотоаддитивной* технологии (как пример одного из вариантов аддитивного метода):

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий под металлизацию;
- нанесение фотоактивируемого катализатора на все поверхности заготовки и в отверстия;
- активация катализатора высокоэнергетической экспозицией через фотошаблон-негатив;
- толстослойное химическое меднение активированных участков печатной платы (печатных проводников и отверстий);
- отмывка платы от остатков технологических растворов и неактивированного катализатора;
- глубокая сушка печатной платы;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы – сертификация.



**Рис. 4.6.** Схема фотоаддитивного процесса

*Преимущества:*

- использование нефольгированных материалов;
- возможность воспроизведения тонкого рисунка.

### *Недостатки:*

– длительный контакт открытого диэлектрика с технологическими растворами металлизации, ухудшающими характеристики электрической изоляции без дополнительных мер по отмывке;

– длительность процесса толстослойного химического меднения.

*Схема процесса аддитивной технологии с использованием фоторезиста:*

– вырубка заготовки;

– сверление отверстий под металлизацию;

– нанесение катализатора на всю поверхности заготовки и отверстий;

– проявление фоторезиста с обнажением участков поверхности платы с нанесенным катализатором;

– толстослойная химическая металлизация отверстий и проводников;

– нанесение маркировки;

– обрезка платы по контуру;

– электрическое тестирование;

– приемка платы – сертификация.

### *Преимущества:*

– использование нефольгированных материалов;

– изоляционные участки платы защищены фоторезистом – изоляция не загрязняется технологическими растворами;

– фоторезист может оставаться на плате в качестве защитного покрытия.

### *Недостатки:*

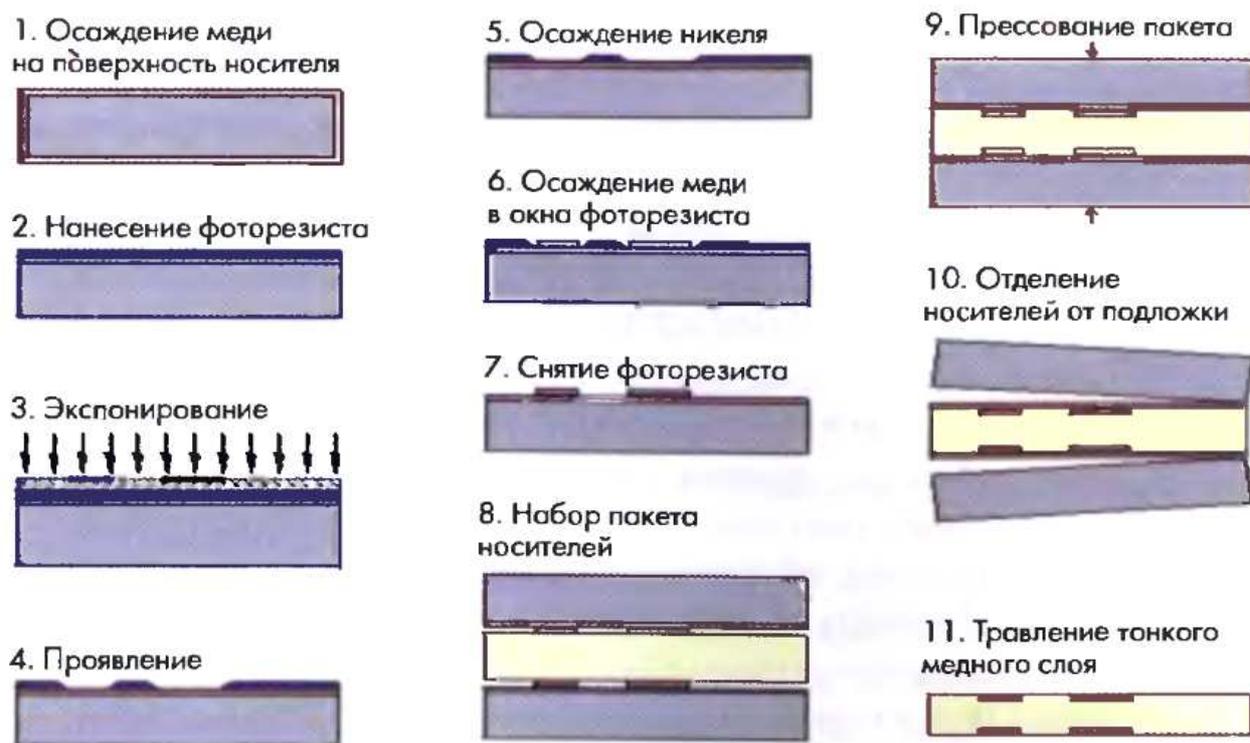
– длительный процесс толстослойной химической металлизации;

– необходимость использования фоторезиста, стойкого к длительному воздействию растворов химического меднения с щелочной реакцией.

К аддитивным процессам можно полноправно отнести и **метод переноса**. Один из перспективных вариантов реализации такого процесса с использованием электрохимического осаждения металлов (**ПАФОС**) показан на рис. 4.7. В методе переноса проводящий рисунок создается на временных «носителях» – листах из нержавеющей стали, поверхность которых предварительно покрывается гальванически осажденной медью толщиной 2 – 5 мкм.

По тонкому медному покрытию формируется защитный рельеф фоторезиста. Проводники получают гальваническим осаждением

тонкого слоя никеля (2 – 3 мкм) и меди (30 – 50 мкм) в рельеф фоторезиста. Затем фоторезист удаляют и проводящий рисунок на всю толщину впрессовывают в диэлектрик. Впрессованный рисунок проводников вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности временных носителей. Таким образом его переносят с металлического листа на диэлектрическую подложку. Отсюда название процесса – «метод переноса».



*Рис. 4.7.* Схема изготовления печатных плат методом переноса

В слоях без межслойных переходов медная шина стравливается. При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами тонкая медная шина служит проводящим подслоем для электрохимического процесса металлизации отверстий.

Проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и сверху защищенный слоем никеля, не подвергается травлению при стравливании меди. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяется рисунком рельефа в фоторезисте, то есть процессами фотолитографии.

В большинстве аддитивных методов полностью отсутствуют процессы травления (удаления металла – субтракции), и, в этом смысле они экологически чистые, хотя другие, сопутствующие им процессы

(отмывки от технологических загрязнений и растворов, избыточность растворов химической металлизации при их корректировках и т.п.) загрязняют промышленные стоки, но не в той мере, как субтрактивные технологии. И если все-таки процессы травления в них присутствуют (ПАФОС), то их объемы настолько незначительны, что они не создают серьезных экологических проблем.

*Распространению аддитивных методов мешает ряд сложностей их использования:*

- нет возможности использовать высокопроизводительные процессы электрохимической металлизации элементов печатного монтажа на диэлектрическом основании из-за их электрической разобщенности. Это, правда, не относится к методу ПАФОС;

- толстослойная химическая металлизация (ТХМ) – сложный и низкопроизводительный процесс, требующий управления по большому количеству параметров. При любых сбоях управления он способен разрушаться с большими издержками для производства. Мало того, этот процесс имеет большую длительность: для достижения приемлемой толщины осаждения (например, 25 мкм для меди) процесс длится часами. Надежность технологических и энергетических систем зачастую не позволяет выдерживать нужные режимы осаждения в течение этого времени;

- по всем (кроме чисто аддитивного процесса) схемам затруднена металлизация отверстий;

- токопроводящие пасты имеют повышенное сопротивление, от чего, по крайней мере, цепи питания не могут быть реализованы приемлемыми ширинами проводников; напыление через маски требует их очистки от осевших на них металлов химическим травлением, что уравнивает их с субтрактивными методами;

- штампы для тиснения металлического порошка и выштамповки проводников из фольги дорогие, так что они оправдывают себя только при объемах партии более десятков тысяч.

### **Полуаддитивные методы**

Полуаддитивные методы придуманы, чтобы избавиться от длительных и неустойчивых процессов ТХМ, заменив их на высокопроизводительные надежные электрохимические (гальванические) методы металлизации. Но для *электрохимических* методов металлизации электроизоляционных оснований нужен токопроводящий подслой.

Его создают любым способом, удовлетворяющим требованиям по проводимости и прочности сцепления с подложкой:

- химическим осаждением тонкого слоя (до 1 мкм) металла. Процесс тонкослойной металлизации длится не более 15 мин и не требует высокой технологической надежности;
- вакуумным напылением металла, в том числе магнетронным;
- процессами газотермической металлизации;
- процессами термолиза металлоорганических соединений.

Уместно заметить, что для полуаддитивных методов неприемлемы процессы прямой металлизации, так как их использование связано с большим расходом катализатора, и возникают проблемы удаления проводящего подслоя из пробельных мест.

**Классический полуаддитивный метод.** По этому методу диэлектрическая подложка металлизуется тонким проводящим слоем.

По проводящему слою на подложку наносится и проявляется фоторезист или трафаретный рисунок из химически стойкой краски. В рельефе проявленного фоторезиста гальванически наращивается металл до толщин, обеспечивающих его механическую прочность и токонесущую способность проводников и отверстий (для меди – порядка 25 – 35 мкм). После этого защитные покрытия (фоторезист, краски) удаляются, в результате в пробельных местах обнажается тонкий проводящий подслой (порядка 1 мкм), который теперь не нужен и подлежит удалению для электрического разобщения элементов печатного монтажа. Стравливание такого тонкого подслоя (1 мкм) связано с гораздо меньшими затратами на очистку промышленных стоков, чем травление фольги (18 – 35 мкм). Мало того, стравливание тонкого слоя не создает такого подтравливания проводников, как для субтрактивных методов. Это означает, что при использовании полуаддитивных методов тонкие проводники и зазоры воспроизводятся гораздо лучше. Можно сказать, что разрешающая способность полуаддитивных методов соизмерима с возможностями используемых фоторезистов.

Распространению полуаддитивных методов мешает слабая сила сцепления проводников с подложкой и химическая неоднородность поверхностей промышленных диэлектриков, заставляющие для их компенсации использовать сложные процессы подготовки (активации) поверхности. В противовес этому производители фольгированных материалов научились изготавливать материалы с ультратонкой фольгой, что снимает необходимость в использовании технологиче-

ских операций металлизации поверхностей у производителей печатных плат, а для отверстий применять процессы прямой металлизации

Тем не менее полуаддитивные методы незаменимы, когда необходимо по тем или иным причинам использовать нефольгированные диэлектрические подложки или получать тонкие проводники и зазоры (менее 0,1 мм).

Схема полуаддитивного процесса:

- вырубка заготовки;
- сверление отверстий под металлизацию;
- нанесение тонкого проводящего подслоя (чаще – тонкослойная химическая металлизация медью толщиной до 1 мкм);
- усиление тонкого слоя металлизации – гальваническая затяжка (до 6 мкм);
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон-позитив;
- основная гальваническая металлизация (до 25 мкм в отверстиях);
- гальваническое нанесение металлорезиста (олова, олова-свинца, олова-никеля, олова-кобальта, серебра, золота, никеля или др.);
- удаление экспонированного фоторезиста;
- вытравливание тонкой металлизации (гальванической затяжки) с пробельных участков;
- стравливание металлорезиста на основе олова для последующего нанесения паяльной маски;
- гальваническое осаждение контактных покрытий на концевые ламели;
- отмывка платы от остатков технологических растворов;
- глубокая сушка печатной платы;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишных покрытий на монтажные элементы под пайку;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы – сертификация.

*Преимущества:*

- использование нефольгированных материалов; хорошее воспроизведение тонких проводников.

### *Недостатки:*

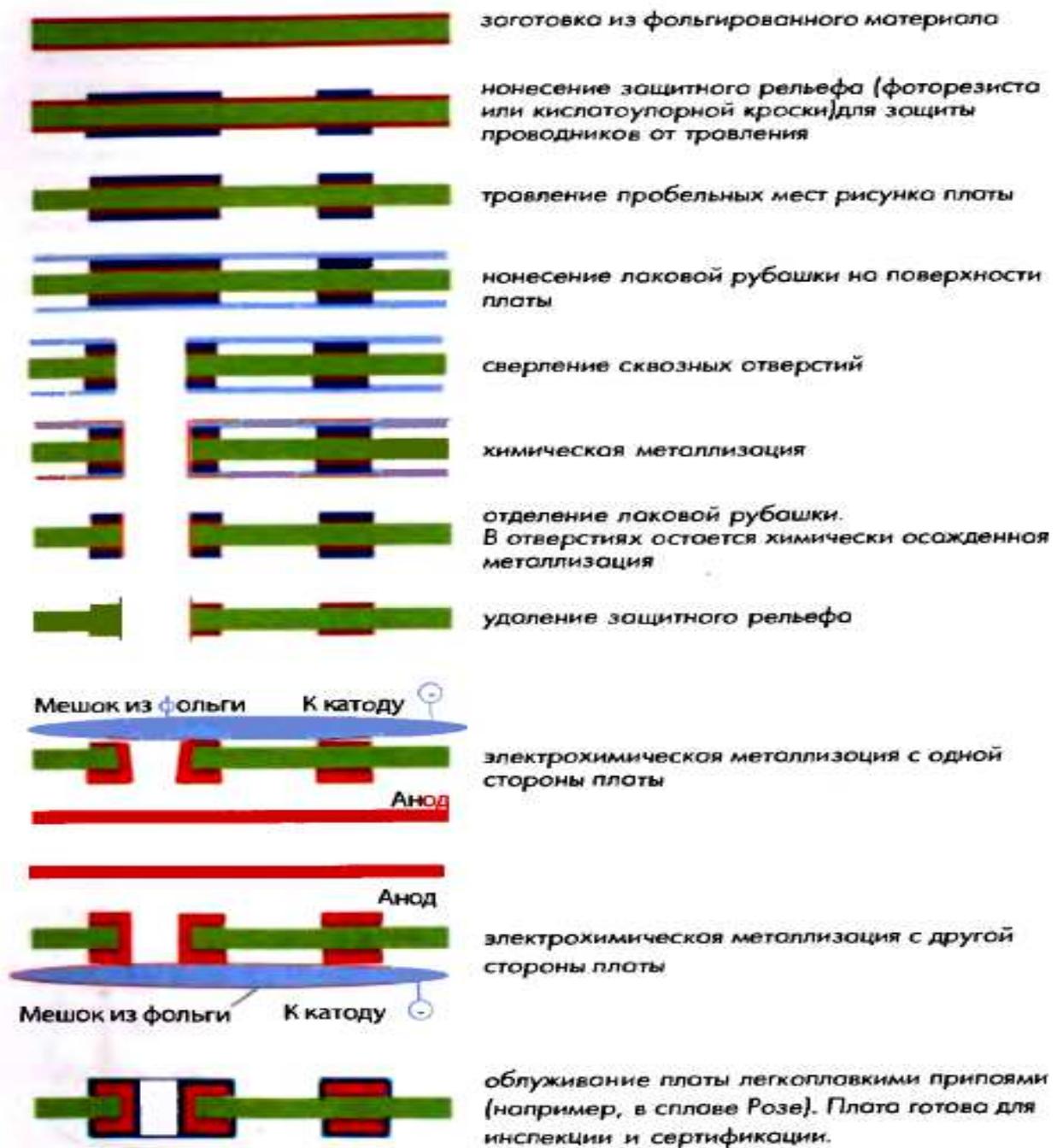
- недостаточная адгезия металлизации к диэлектрической подложке;
- контакт открытой поверхности диэлектрика с растворами металлизации приводит к его загрязнению и требует дополнительных усилий для обеспечения требуемых электроизоляционных свойств.

### **Комбинированные методы**

Комбинированные методы объединяют в себе все приемы изготовления печатных плат, необходимые для изготовления печатных проводников и металлизированных отверстий. Поэтому они называются комбинированными. В зависимости от последовательности операций формирования печатных проводников и металлизированных отверстий различают *комбинированный позитивный метод* (используются фотошаблоны – позитивы) и *комбинированный негативный* (используются фотошаблоны – негативы).

***Комбинированный негативный метод.*** В негативном методе сначала вытравливаются проводники, и затем металлизуются отверстия. Метод возник, когда в производстве еще отсутствовали сверлильные станки с программным управлением, и платы были вынуждены сверлить вручную по рисунку схемы (по контактными площадкам). Поскольку после травления рисунка нужно было не только сверлить отверстия, но и их металлизировать, принимались меры для создания проводящего подслоя в отверстиях, но не на поверхности платы. Для этого перед сверлением плату покрывают защитной «лаковой рубашкой», сверлят через нее отверстия всю заготовку. Лаковую рубашку наносят так, чтобы она легко отслаивалась, и после ее удаления химически осажденный металл остается только в отверстиях. Поскольку рисунок схемы уже вытравлен, металлизированные отверстия, подлежащие электрохимической металлизации, не имеют электрического соединения с катодом гальванической ванны. Его создают или проводом, нанизывая на него все отверстия платы, или мягкими проводящими подушками, поддуваемыми воздухом или наполняемыми водой для надежного электрического контактирования по всей поверхности заготовки. Естественно, что подушки могут располагаться только с одной стороны платы, оставляя другую открытой для электролита металлизации. Чтобы обеспечить равномерность металлизации отверстий, в процессе осаждения заготовки меняют сто-

ронами. Схема процесса комбинированного негативного метода изготовления печатных плат показана на рис.4.8.



**Рис. 4.8.** Схема процесса изготовления печатных плат комбинированным негативным методом

*Недостатки метода:*

- при металлизации открытые участки диэлектрического основания насыщаются химическими растворами и получают за счет этого повышенную проводимость. Надежность изоляции, реализуемая этим методом, – низкая;

для гальванической металлизации отверстий возникают большие затруднения для организации электрического контакта стенок отверстий с катодом гальванической ванны. Это обуславливает наличие заметного количества непрокрытых или плохо покрытых отверстий;

- при отделении лаковой рубашки возможно частичное разрушение проводящего подслоя в отверстиях. Условия для электрохимической металлизации нарушаются.

В связи с этим негативный метод уступил в распространении позитивному.

**Комбинированный позитивный метод.** Единственным преимуществом негативного метода на ранних стадиях развития производства печатных плат с металлизированными отверстиями являлась возможность сверления отверстий по сформированному рисунку печатной платы, когда контактные площадки можно было использовать как мишень для ручного сверления отверстия. С появлением высокопроизводительных сверлильных станков с ЧПУ это единственное преимущество негативных методов исчезло.

В позитивном методе травление рисунка происходит после металлизации отверстий, а для соединения металлизированных отверстий с катодом используется еще не вытравленная фольга, изначально присутствующая на поверхности заготовки.

Схема комбинированного позитивного метода изготовления двусторонних печатных плат с металлизированными отверстиями:

- нарезка технологических заготовок;
- очистка поверхности фольги (дезоксидация);
- сверление отверстий, подлежащих металлизации, на станках с ЧПУ;
- активация поверхностей под химическую металлизацию;
- тонкая химическая металлизация (до 1 мкм);
- предварительное тонкая гальваническая металлизация (до 6 мкм) – «гальваническая затяжка»;
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон – позитив;
- основная гальваническая металлизация (до 25 мкм внутри отверстий);
- нанесение металлорезиста;
- удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков фольги;
- удаление металлорезиста;

- нанесение контактных покрытий на концевые печатные ламели;
- тщательная отмывка платы, сушка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишных покрытий под пайку;
- нанесение маркировочных знаков;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование;
- приемка платы – сертификация.

*Преимущества:*

- возможность воспроизведения всех типов печатных элементов с высокой степенью разрешения;
- защищенность фольгой изоляции от технологических растворов – хорошая надежность изоляции;
- хорошая прочность сцепления (адгезия) металлических элементов платы с диэлектрическим основанием.

*Недостатки:*

- относительно большая глубина травления (фольга + металлизация затяжки) создает боковой подтрав, ограничивающий разрешающую способность процесса; травление рисунка по металлорезисту ограничивает свободу выбора травящих растворов;
- после травления рисунка схемы металлорезист или осветляют для улучшения паяемости, или удаляют, и после нанесения паяльной маски осаждают финишные покрытия под пайку. Оба варианта требуют дополнительных капитальных затрат и прямых расходов.

**Тентинг-метод.** Процесс изготовления плат комбинированным позитивным методом становится короче и дешевле, если для защиты рисунка от травления использовать не металлорезист, а прочный, сухой пленочный фоторезист. Главная проблема тентинг-процесса – надежно закрыть отверстия от доступа травящих растворов. Не все пленочные фоторезисты способны к этому. Но, когда они появились, тентинг-метод начал успешно применяться для изготовления плат невысокой сложности.

Название процесса произошло именно потому, что пленка фоторезиста накрывает отверстия как бы зонтиком или крышей, отсюда английское происхождение термина «tenting».

### **Выбор методов изготовления печатных плат**

Правильный выбор материалов, технологических процессов и элементной базы при разработке современных печатных узлов во

многим определяет уровень работоспособности и надежность электронного устройства в целом при рациональных экономических затратах в производстве. При этом рассматриваются следующие аспекты:

- **Назначение электронной системы:** технические условия на изделия, ожидаемый рабочий ресурс, элементная база с характеристиками по быстродействию, выходному сопротивлению, уровню рабочих сигналов, напряжению питания и т. д.

- **Эксплуатационные требования** по ремонтпригодности: возможности профилактики и ремонта, наличие запасных печатных узлов и блоков.

- **Окружающие условия при хранении и работе.** Технология изготовления: совместимость с действующим производством, степень и характер механизации и автоматизации при заданном объеме производства.

- **Базовые и вспомогательные материалы:** объем возможных поставок, стоимость, необходимость отбора по специальным требованиям.

Основным отличием, характеризующим возможности того или другого метода, можно считать реализуемую им плотность межсоединений. При этом необходимо иметь в виду практически возможное число монтажных точек на единицу площади поверхности платы. Например, для двусторонних печатных плат возможная плотность монтажа, рассчитанная теоретически, составляет 15 выводов/1 см<sup>2</sup> при разрешающей способности по ширине проводников и зазоров, равной 0,5 мм. Однако реальные предельные значения этой плотности, как правило, не превышают 2,8 выводов/см<sup>2</sup>. Практическое ограничение плотности монтажа обусловлено в большей степени размерами элементов и специальными требованиями к электрическим параметрам печатных связей.

Все методы изготовления печатных плат можно расположить в следующий ряд возрастания плотности печатного монтажа:

- односторонние печатные платы;
- двусторонние печатные платы (ДПП) комбинированным позитивным методом;
- ДПП полуаддитивным методом;
- ДПП полуаддитивным методом с дифференциальным травлением;
- МПП методом попарного прессования;

- МПП методом открытых контактных площадок;
- МПП методом металлизации сквозных отверстий;
- МПП методом послойного наращивания;
- МПП комбинацией методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания

**Рассмотрение методов изготовления печатных плат с учетом современной практики печатного монтажа позволяет отдать предпочтение в производстве односторонних печатных плат химическому методу, двусторонних – комбинированному позитивному, многослойных – методу металлизации сквозных отверстий. Названные методы признаны базовыми в отечественной и зарубежной практике производства печатных схем.**

#### **4.4. Базовые материалы для изготовления печатных плат**

Базовыми материалами принято называть те, что остаются в конструкции печатных плат. В этом смысле можно было бы назвать базовыми материалы оснований, металлизации, паяльные маски и т.д. Но этим понятием «базовые материалы» ограничили круг материалов — оснований печатных плат (синонимы: монтажная подложка, диэлектрическое основание).

Характеристики печатного монтажа в значительной степени определяются свойствами базовых материалов. В качестве их обычно используются фольгированные медью (для субтрактивной технологии) листы диэлектрика: полимеры или композиционные материалы — слоистые прессованные пластики различного типа, армированные всевозможными волокнами на основе бумаги (гетинаксы), стеклоткани (стеклотекстолита), ткани из полиэфирных волокон, стеклошпон, кварцевые ткани и т.п. В композиционных материалах в качестве связующего элемента используются всевозможные смолы, обладающие хорошей адгезией к медной фольге, стойкие к воздействию агрессивных растворов, используемых в производстве печатных плат, устойчивые к температурам пайки, обеспечивающие приемлемый коэффициент температурного расширения.

Основания печатных плат могут быть жесткими или гибкими. В ряде конструкций печатных плат используются материалы, находящиеся первоначально в жидком или пастообразном состоянии. В объем диэлектрического основания могут быть введены добавки,

придающие им особые свойства, – катализаторы для аддитивных и фотоаддитивных процессов, фирменные знаки (логотипы) и идентификаторы, ультрафиолетовая блокировка, делающая основание непрозрачным, что необходимо при двустороннем экспонировании паяльной маски и т.д.

При проектировании и изготовлении ПП большое значение имеет правильный выбор конструкционных материалов в зависимости от конструкторских, технологических и эксплуатационных характеристик плат, используемых в конкретных ЭУ. Таким образом, требования в конструкционных материалах определяются следующим:

- электрофизическими, механическими, тепловыми и надежностными характеристиками;
- условиями эксплуатации;
- технологичностью конструкции;
- экономическими показателями.

В производстве ПП используют большое разнообразие органических и неорганических материалов, а также их комбинаций.

Основными преимуществами *органических* материалов (по сравнению с неорганическими) являются следующие:

- доступность и дешевизна углеводородного сырья;
- простота получения, связанная с тем, что синтез таких материалов осуществляется почти всегда при невысоких температурах с использованием несложного оборудования;
- возможность обеспечения и варьирования (в широком диапазоне) свойств материала за счет введения в композиционную массу полимера различных добавок;
- высокая технологичность при формообразовании;
- возможность создания на основе данных материалов гибких ПП и МПП с минимальными массогабаритными показателями.

Основными недостатками органических материалов пока еще остаются невысокие нагревостойкость и теплопроводность по сравнению с неорганическими материалами и большая, чем у неорганических материалов, склонность к старению, особенно при эксплуатации в экстремальных условиях.

*Неорганические* материалы отличаются от органических высокой нагревостойкостью, лучшей теплопроводностью и стабильностью электрофизических, прочностных и прочих характеристик, а также гораздо меньшей склонностью к старению даже в экстремальных ус-

ловиях эксплуатации. Вместе с тем, они менее технологичны, имеют большую массу и более высокую стоимость, чем органические материалы.

В табл. 4.1 указаны широко используемые конструкционные материалы для производства ПП, при этом видно преимущественное применение для ПП фольгированных органических материалов.

Таблица 4.1

*Основные конструкционные материалы для производства ПП*

Вид материала, марка	Толщина		Назначение
	фольги, мкм	материала, мм	
1	2	3	4
Гетинакс фольгированный: – ГФ-1-35, – огнестойкий ГОФ-2-50Г – влагостойкий ГОФВ-2-35.	35,50 35,50 35,50	1 – 3 1 – 3 1 – 3	ОПП ОПП, ДПП
Стеклотекстолит нефольгированный: – с адгезионным слоем СТЭК; – с катализатором СТАМ.	– –	0,8 – 1,5 0,7 – 2,0	ДПП ДПП
Стеклотекстолит фольгированный: – СФ-1(2)-35; – огнестойкий СФО-1(2)-35; – СОНФ-1(2)-50; – самозатухающий ДФС-1(2); тонкий ФДМ-1А; – ФДМЭ-2А; – гибкий ФДЛ; – травящийся ФТС-1(2); – теплостойкий СТФ-1(2); – с тонкой фольгой СТПА-5-1; – слофадит; – негорючий СТНФ; – общего назначения, негорючий СОНФ-2.	35,50 18,35 50 18,35 18,35 18,35 18,35 18,35 18,35 18,35 5 5 18,35 18,35	0,5 – 3 0,8 – 3 0,8 – 3 0,06 – 2 0,2 – 0,35 0,1 – 0,2 0,06 – 0,12 0,08 – 0,5 0,1 – 3 0,1 – 2 0,5 – 3 0,08 – 3 0,13 – 3	ОПП, ДПП ОПП, ДПП ОПП, ДПП ДПП, МПП МПП МПП МПП, ГПК МПП ДПП, МПП ОПП, ДПП ГПП ДПП, МПП МПП, ДПП
Фторопласт фольгированный: – ФФ-4; – армированный ФАФ-4Д; – ФЛАН-2,8 (3,8; 5; 7,2; 10; 16).	50 50 35	1,5 – 5 0,5 – 3 1 – 10	ОПП, ДПП ГПК ДПП, СВЧ ПП
Полистирол и его сополимеры с на- полнителями: ПТ-3 (5, 7, 10, 16); СТ-3 (5, 7, 10, 16).	50 50	1,0 – 1,5 1,0 – 15	ОПП, СВЧ ПП ДПП

Окончание табл. 4.1

1	2	3	4
Керамика алюмооксидная ВК-94-1.	–	0,5 – 2	МПП
Лавсан фольгированный: ЛФ-1;	35	0,05	ГПП
ЛФ-2.	50	0,1	ГПК
Полиимид фольгированный : ПФ-1;	30	0,05	ГПП
ПФ-2.	50	0,1	ГПК
Полиимид нефольгированный: ПМ-1;	–	0,025 – 0,07	ДПП, МПП
Каптон.	–	0,025 – 0,07	ДПП, МПП
Стеклоткань прокладочная: СП-1-0,025;	–	0,025	МПП
травящаяся СП-3-0,06;	–	0,06	МПП
самозатухающая СПС-1.	–	0,1	МПП
Фольга электролитическая: ФМЭГ-Н (общего назначения);	18 – 105	–	СФ, ФТС
ФМЭГ-ЛН (пластичная);	18 – 105	–	ПФ, ЛФ
ФМЭГ-ЛН (нагревостойкая);	18 – 105	–	СТФ
ФМЭГ-ЛНП;	18 – 105	–	ФЛАН
ФМЭХ (с хромовым покрытием);	50	–	ФФ – 4,
Фольга напыленная ФМНГ.	3 – 5	–	ФАФ СТПА

Фольгированные диэлектрики состоят из диэлектрического основания плакированного с одной либо двух сторон основания обычно электролитической медной фольгой (толщиной 2,5 – 50 мкм) с оксидированным гальваностойким слоем (или слоем хрома толщиной 1 – 3 мкм) для улучшения прочности сцепления с диэлектрическим основанием и шероховатостью открытой поверхности фольги с высотой микронеровностей не более 0,4 – 0,5 мкм (а для МПП не менее 3 мкм, причем шероховатой в этом случае должна быть приклеиваемая поверхность, а не открытая). Медная фольга характеризуется высокой чистотой (99,5 % Cu), пластичностью и наименьшим удельным сопротивлением по сравнению с алюминиевой или никелевой фольгой, которую гораздо реже применяют.

Диэлектрические основания изготавливают из слоистых пластиков – композиционных материалов, состоящих из 3-х – 4-х слоев волокнистого армирующего наполнителя, пропитанных и склеенных между собой различными полимерными связующими (табл. 4.2). В состав композиционных материалов обычно вводят разные добав-

ки, придающие слоистым пластикам требуемые свойства (например, теплостойкость, негорючесть, влагостойкость, травимось, повышенную адгезию при химической металлизации, улучшенные механические и электрофизические свойства, включая возможность применение таких диэлектриков в СВЧ ЭУ и др.).

Таблица 4.2

*Основные составляющие слоистых пластиков для изготовления ПП*

Наименование слоистого пластика	Армирующий наполнитель	Связующее
Гетинакс	Пропиточная ацелированная бумага толщиной 0,09 – 0,13 мм	Фенолформальдегидная смола (ФФС)
Текстолит	Хлопчатобумажная и синтетические ткани (саржа, бязь, шифон, капрон, лавсан, бельтинг (техническая ткань) и др.)	ФФС
Стеклотекстолит	Стеклоткани из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла, кварцевая стеклоткань и др.	Совмещенная эпоксидная и ФФС; совмещенная эпоксикремнийорганическая смола; совмещенная с эпоксидной полиимидная смола, триазиновая смола; смеси 2-х последних смол и др.

Изготовление фольгированных слоистых пластиков включает следующие этапы: подготовка слоев диэлектрика (включая пропитку каждого слоя армирующего наполнителя связующим); изготовление фольги; сборка в пакеты; прессование в листы на гидравлических прессах при температуре 150 – 180<sup>0</sup>С и давлении 5 – 15 МПа.

*Гетинакс* (ГФ) – материал на основе электроизоляционной бумаги с пропиткой фенольной смолой. По ГОСТ 10316 обозначается как ГФ, по стандартам NEMA – ХРС, ХХХРС и ХХХР. Обычный цвет – коричневый. Нагревостойкость – не выше 90° С. Предназначен для работы в нормальных условиях влажности окружающей среды (относительная влажность 45 – 75 % при температуре 15 – 35° С). Огнестойкие варианты гетинакса обозначаются FR-1 и FR-2.

*Эпоксидный гетинакс* (FR-3) выполняется на бумажной основе, пропитанной эпоксидной смолой (отечественной промышленностью

не выпускается). По стандарту NEMA обозначается, как тип FR-3. Цвет светло-желтый или белый, полупрозрачен. Нагревостойкость 120 – 135° С. Штатпуется без нагрева при толщинах до 1,5 мм.

*Эпоксидный стеклотекстолит (СФ, G-10)* имеет в качестве основы стеклоткань, связующее вещество – эпоксидная смола. В отечественном производстве обычно используют эпоксидно-фенолоформальдегидную смолу – эпоксидную смолу, отверждаемую смолой резального типа. Обозначается по ГОСТ 10316 как СФ, по стандарту NEMA – G-10. Стеклотекстолиты полупрозрачны и имеют зеленый (зарубежные) или светло-коричневый цвет. Нагревостойкость фольгированных стеклотекстолитов 135 – 150°С. Способны работать после пребывания в условиях повышенной влажности (относительная влажность до 98 % при Температуре 40°С). Штатпуется без нагрева.

*Нагревостойкий эпоксидный стеклотекстолит (СФН)* предназначен для изготовления печатных плат, допускающих работу при температуре до 180° С в течение суммарного или непрерывного времени до 100 ч, а также кратковременную работу при относительной влажности до 98 % при температуре не менее 40° С. Обозначается по ГОСТ 10316 СФ-2Н-50, по стандартам NEMA – G-7, G-10, G-11. По внешнему виду материал может быть непрозрачным разных цветов или полупрозрачным коричневого или темно-зеленого цвета.

*Нагревостойкие огнестойкие эпоксидные стеклотекстолиты* на бромированном огнестойком связующем на основе эпоксидных смол и их смесей с другими улучшающими качество компонентами. В частности, температура стеклования этих материалов находится в диапазоне 180–190°С.

*Полиэфирные текстолиты* изготавливают полностью на основе полиэфирной ткани и полиэфирного связующего.

Гетинакс, обладая удовлетворительными электроизоляционными свойствами в нормальных климатических условиях, хорошей обрабатываемостью и низкой стоимостью, нашел применение в производстве бытовых ЭУ. Текстолит в 5 – 6 раз дороже гетинакса, обладает более высокой прочностью (при сжатии) и ударной вязкостью, стоек к истиранию, но менее нагревостоек, чем гетинакс, поэтому преимущественно используется для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание. Для ПП, эксплуатирующихся в сложных климатических условиях, используют более дорогие, обладающие лучшими техническими характеристиками стеклотексто-

литы. Они отличаются от других слоистых пластиков широким диапазоном рабочих температур, низким водопоглощением, высоким значением удельного сопротивления, стойкостью к короблению.

Наличие в коммутирующих устройствах мощных цепей питания и высокого напряжения увеличивает опасность возгорания ПП. Повышение огнестойкости органических диэлектриков достигается введением в их состав антипиренов (например, тетрабромдифенилпропана).

Нефольгированные диэлектрики применяют при химической и химико-гальванической технологии металлизации ПП. Для улучшения прочности сцепления металлического покрытия с основанием на его поверхность наносят тонкий (50 – 100 мкм) полутвержденный клеевой слой (например, эпоксикаучуковую композицию). Введение в лак, пропитывающий стеклоткань, 0,1 – 0,2 мас. % палладия, смеси палладия с оловом или закиси меди незначительно снижает сопротивление изоляции, но повышает качество металлизации.

Соединение отдельных слоев МПП осуществляют специальными склеивающими прокладками, которые изготавливают из стеклоткани, пропитанной недополимеризованной эпоксидной смолой. Содержание смолы в прокладках должно быть в пределах 42 – 52 %, а летучих веществ – не более 0,75 %. Длительное сохранение клеящих свойств межслойных прокладок достигается их консервацией в герметически упакованных полиэтиленовых мешках при пониженной (+10<sup>0</sup>С) температуре.

Для производства печатных кабелей применяют армированные фольгированные пленки из фторопласта и полиэфирные пленки (например, из полиэтилентерефталата).

Более высокой термостабильностью (до 250<sup>0</sup>С), прочностью на растяжение, несгораемостью, радиационной стойкостью, а также способностью к равномерному травлению в щелочных растворах обладают полиимидные пленки, но высокая стоимость и водопоглощение ограничивают их широкое применение коммутационными платами (ДПП и МПП) для микроэлектронной аппаратуры. Термопластичные материалы, обладающие повышенной текучестью, используются при изготовлении рельефных ПП. К ним относятся сложные композиции, основу которых составляют полиэфирсульфоны, полиэфиримиды и др. Введение в пластмассы стеклянного и другого наполнителя увеличивает их рабочую температуру до 260<sup>0</sup>С, что позволяет осуществлять групповые способы пайки навесных компонентов на таких ПП.

В качестве основы для ПП СВЧ-диапазона используют неполярные полимеры (фторопласт, полиэтилен, полипропилен, полистирол, полифениленоксид) и их сополимеры.

Направленное изменение свойств органических материалов достигается введением добавок (например, алунда, двуокиси титана и др.), армированием полимеров (например, кварцевой стеклотканью, высокопрочными тканями и (или) дискретными волокнами политетрафторэтилена, полиимида, арамида, кевлара и др.), использованием сочетания эпоксидной и полиимидной смол, а также новых полимерных материалов в качестве связующего (например, бисмалеинимидов, триазинов или продуктов их взаимодействия в виде ВТ-смол и др.) и плакированием фольгой с низким ТКЛР (например, со структурой медь-инвар-медь).

Керамические материалы характеризуются высокой механической прочностью, которая незначительно изменяется в диапазоне температур 20 – 700° С, стабильностью электрических характеристик и геометрических параметров, низким водопоглощением и газовыделением при нагреве в вакууме, хрупкостью и высокой стоимостью. Они предназначены для изготовления одно- и многослойных коммутационных плат микросборок, а также для ПП СВЧ-диапазона.

Изготавливают керамические основания для ПП прессованием, а чаще – литьем под давлением или отливкой пленок из тестообразной композиционной массы, включающей мелкодисперсный порошок необходимого неорганического диэлектрика. Для создания мощных быстродействующих устройств изготавливают ПП на основаниях из различных керамик, в частности, оксидных керамик на основе  $Al_2O_3$  (например, в виде поликора),  $BeO$  и др., а также бескислородных керамик на основе  $Si_3N_4$ ,  $AlN$ ,  $BN$ ,  $SiC$  и др.. Перспективно также использование тонких высокотеплопроводящих алмазных пленок с коэффициентом теплопроводности до 900 – 1000 Вт/(м·К). Процесс получения плат из керамических пленок позволяет снизить их шероховатость, разнотолщинность, расширить технологические возможности при изготовлении МПП.

Платы на металлическом основании применяются в изделиях с большой токовой нагрузкой, работающих при повышенных температурах. В качестве основы чаще используются сплавы алюминия или сплавы железа с никелем. Изолирующий слой на поверхности алюминия и его сплавов получают анодным оксидированием. Варьируя состав электролита и режим электролиза, можно формировать оксидные пленки толщиной от нескольких десятков до сотен микрон

с сопротивлением изоляции  $10^9$ – $10^{10}$  Ом. На стальных основаниях слои изоляции получают с помощью специальных эмалей, изготавливаемых в виде пленочных покрытий. В состав эмалей входят оксиды магния, кальция, кремния, бора, бериллия, алюминия или их смеси, связка (поливинилхлорид, поливинилацетат или метилметакрилат) и пластификатор. Пленка соединяется с основанием путем прокатки между вальцами с последующим вжиганием. Таким образом можно создавать многослойные структуры с различными механическими и электрическими характеристиками.

Соответствие электрофизических свойств и других качественных характеристик конструкционных материалов, используемых при изготовлении ПП и МПП, требованиям технических условий устанавливается входным контролем предприятия по стандартным методикам. Одновременно контролируются технологические свойства материалов. Испытание на пробивку отверстий проводится на тестовой плате в нормальных климатических условиях или при нагреве до  $40$  –  $60^\circ\text{C}$ . Пуансоном последовательно пробивают несколько серий отверстий. При переходе от одной серии к другой уменьшают перемычку между отверстиями (от  $3,0$  до  $0,5$  мм) и визуально определяют, при каком значении перемычки появляются трещины. Штампемость  $k=a/h$ , где  $a$  – самая узкая неповрежденная ширина перемычки,  $h$  – толщина материала. Устойчивость к действию растворителей проверяется путем помещения заготовки на  $2$  мин в пары трихлорэтилена. После этого на ней не должно наблюдаться вздутий и расслоения. Содержание смолы в прокладочной стеклоткани контролируется взвешиванием тестовой платы до и после термообработки в течение  $30$  –  $40$  мин при заданной температуре. Проверяется также влияние технологических операций на прочность сцепления фольги с диэлектриком. Для этого на тестовой плате изготавливается несколько проводников с заданной шириной. С применением, например, методики оценки адгезии покрытий определяется прочность сцепления в исходном состоянии и после воздействия технологических факторов (например, времени травления и др.).

#### **4.5. Основные операции изготовления ПП**

**Механическая обработка** включает раскрой листового материала (чаще всего из фольгированного диэлектрика) на полосы, получение из них заголовков, выполнение фиксирующих и других техноло-

гических, переходных и монтажных отверстий, получение чистового контура ПП. Размеры заготовок определяются требованиями чертежа и наличием по всему периметру технологического поля, на котором выполняются фиксирующие (базовые) отверстия для базирования деталей в процессе изготовления и тестовые элементы. Ширина технологического поля не превышает 10 мм для ОПП и ДПП (для МПП 20 – 30 мм). Для малогабаритных плат с размерами до 100 мм изготавливают групповые заготовки в виде листа (фольгированного или нефольгированного диэлектрика) площадью не менее  $0,05 \text{ м}^2$  с учетом расстояний 5 – 10 мм между ними.

Выбор методов и средств получения заготовок определяется типом производства. В крупносерийном и массовом производстве раскрой листового материала осуществляют штамповкой на кривошипных или эксцентриковых прессах с одновременной пробивкой фиксирующих отверстий на технологическом поле. Заготовки ПП в единичном и мелкосерийном производстве получают разрезкой на одной и многоножевых роликовых или гильотинных ножницах. Применяемые ножи должны быть установлены параллельно друг другу с минимальным зазором 0,01 – 0,03 мм по всей длине реза.

Резка заготовок из пластин или рулонов слоистых диэлектриков осуществляется на ударных, дисковых или роликовых ножницах с ручной или автоматической подачей материала. Линия реза направлена так, что не возникает расслоения материала и других повреждений на его поверхности. Внешний контур односторонних печатных плат и слоев МПП при партиях до 5000 шт. формируется с помощью универсальных штампов, а при больших сериях – на скоростных эксцентриковых прессах, оборудованных специальным режущим инструментом. Спрессованные МПП бесстружечными методами по возможности не обрабатываются, так как слишком велика опасность их расслоения.

Механическая обработка и особенно сверление составляют значительную долю проблем в обеспечении экономичности и серийности производства печатных плат и, что самое главное, в обеспечении плотности межсоединений, их качества и надежности.

Наиболее сложный и трудоемкий процесс в механической обработке печатных плат — это формирование отверстий, подлежащих металлизации. От сверления зависит качество металлизации, то есть надежность межслойных соединений. Востребованные в настоящее время конструкции МПП содержат большое количество тонких от-

верстий с глубоким сверлением. Эти отверстия можно выполнять сверлением, но ограниченная производительность механического сверления заставляет переходить к лазерному сверлению.

По величине рабочего диаметра инструмент можно условно разделить на четыре подгруппы:

1) микросверла, диаметр которых лежит в диапазоне от 0,30 мм и меньше;

2) минисверла диаметром от 0,25 до 0,45 мм;

3) сверла среднего диаметра от 0,45 до 3,00 мм;

4) сверла большого диаметра от 3,00 мм и выше.

По технологическому назначению сверл инструмент можно разделить на пять следующих подгрупп:

1) для прецизионного сверления;

2) сверла для создания микропереходов;

3) сверла для сложных МПП;

4) стандартные (обработка двухсторонних и многослойных печатных плат с малым числом слоев);

5) слотовые сверла.

В зависимости от того, в какую группу попадает инструмент, меняется его геометрия заточки, подъем винтовой канавки, а также изменяется состав материала.

Основным компонентом для производства сверл и фрез является карбид вольфрама, в роли связующего вещества выступает кобальт и около 1 % – это фирменные присадки, придающие инструменту своеобразные фирменные свойства. В частности, в качестве связки участвует около 8 % кобальта и 1 % фирменных добавок, включая молибден. Добавление молибдена придает инструменту упругость, так необходимую при глубоком сверлении. Это свойство также позволяет использовать сверла на оборудовании с низкими техническими характеристиками (биение цанги, шпинделя, относительно длительное время переходных процессов позиционирования стола). Такие присадки, как тантал и титан, позволяют материалу работать в самых тяжелых условиях резания – постоянные и переменные ударные нагрузки, повышенная температура на трущихся поверхностях.

Существуют три критерия для оценки процесса сверления: производительность, стойкость сверл и качество отверстий.

Фиксирующие отверстия диаметром 4 – 6 мм выполняют штамповкой или сверлением с высокой точностью (0,01 – 0,05 мм). Для сверления используют универсальные станки, в которых точность

достигается применением кондукторов, или специальное полуавтоматическое оборудование, которое в одном цикле с обработкой пакета заготовок предусматривает пневматическую установку штифтов, фиксирующих пакет. Операцию выполняют спиральными сверлами из быстрорежущей стали или твердых сплавов при скорости 30 – 50 м/мин и подаче 0,03 – 0,07 мм/об. Биение сверла при обработке не должно превышать 0,03 мм. Повышение точности сверления фиксирующих отверстий достигается их развертыванием при скорости 10 – 30 м/мин и ручной подаче инструмента.

Аналогичными способами выполняют и другие технологические отверстия, но к точности их обработки не предъявляются такие жесткие требования, как к точности обработки фиксирующих отверстий. Монтажные и переходные отверстия получают также штамповкой и сверлением. Пробивку отверстий на универсальных или специальных штампах применяют в тех случаях, когда отверстие в дальнейшем не подвергается металлзации и его диаметр составляет не менее 1 мм. Правильный выбор зазоров между рабочими частями штампа, их размеров и геометрии, а также усилий при штамповке позволяет свести к минимуму образование трещин на материале и расслоений. Если плата имеет высокую плотность коммутации, большое количество отверстий и ее топология разрабатывалась с малым шагом координатной сетки, то при получении отверстий используют последовательную их пробивку на нескольких штампах. Применение универсальных штампов, в которых необходимое количество отдельных пуассонов набирается в специальном трафарете, делает процесс штамповки экономичным в условиях мелкосерийного производства.

Подлежащие металлзации монтажные и переходные отверстия обрабатывают с высокой точностью на специализированных одно- и многошпиндельных сверлильных станках с ЧПУ. Эти станки имеют координатный стол с автоматической системой позиционирования, сверлильные шпиндели с бесступенчатым регулированием скорости и систему ЧПУ позиционного типа. Повышение производительности при сверлении достигается увеличением числа оборотов шпинделя и количества синхронно работающих сверлильных шпинделей, групповой обработкой пакета заготовок, автоматической сменой сверл по ходу технологического процесса и при их поломке, выбором оптимальной траектории движения заготовки по отношению к инструменту. Оптимальная частота вращения шпинделя составляет 45000 – 120000 обор./мин, скорость резания 25 – 50 м/мин при числе двойных

ходов до 200 в минуту. Это предъявляет повышенные требования к жесткости конструкции, уровню температурных деформаций и износоустойчивости узлов трения.

Для обработки отверстий, подлежащих металлизации, используются специальные спиральные сверла из металлокерамических твердых сплавов. Номинальное значение диаметра сверла выбирают исходя из соотношения:

$$d_{cs} = d + 0,7(\delta_1 + \delta_2),$$

где  $d$  – номинальный диаметр отверстия, мм;

$\delta_1$  – допуск на этот диаметр, мм;

$\delta_2$  – допустимое уменьшение диаметра обрабатываемого отверстия после охлаждения слоистых пластиков, мм.

Применяемые для обработки твердосплавные спиральные сверла характеризуются оптимальным углом при вершине  $120 - 130^{\circ}$ ; углом подъема спирали  $15 - 30^{\circ}$ ; полированными поверхностями спиральных канавок; радиальным биением рабочей части относительно хвостовика не более 0,01 мм; наличием в рабочей части обратной конусности в пределах 0,02 – 0,03 мм; острыми режущими кромками с радиусом скругления 8 мкм без выкрашивания и завалов; симметричным расположением режущих кромок относительно оси рабочей части.

Повышение температуры в зоне обработки при сверлении слоистых пластиков приводит к наволакиванию размягченной смолы на кромки фольги (или края отверстий), препятствующему последующей металлизации отверстий. Для устранения этого недостатка применяют охлаждающие агенты, не содержащие смазок (воду, водяной туман, очищенный сжатый воздух и др.); двойное сверление; наложение на поверхность платы металлических (алюминиевых) листов; сверла с дополнительными режущими кромками, направленными в сторону, противоположную основной и т.п. Однако все перечисленные способы оказываются малоэффективными в условиях массового производства. Процесс лазерного фрезерования хотя и устраняет наволакивание смолы, но не исключает ее стеклование на поверхности стенок отверстия. Наиболее эффективным средством устранения наволакивания признана последующая гидроабразивная очистка.

Чистовой контур ПП получают штамповкой, отрезкой на гильотинных ножницах или на специальных станках с прецизионными ал-

мазными пилами, фрезерованием. Для исключения повреждения поверхностей заготовок, при групповой их обработке, между отдельными заготовками прокладывают картон, а пакет помещают между прокладками из листового гетинакса.

В последнее время для чистовой обработки все чаще применяют контурно-фрезерные многошпиндельные станки с ЧПУ.

**Подготовительные операции** предназначены для обеспечения качества при выполнении основных процессов формирования электропроводящих элементов ПП и перед формированием различных покрытий. Они включают очистку заготовок (в том числе отверстий в них) от окислов, жировых пятен, смазки, пленок и других загрязнений; активирование поверхностей проводящего рисунка; специальную обработку диэлектриков, а также контроль качества подготовки. В зависимости от характера и степени загрязнений очистку (активирование) проводят механическими, химическими, электрохимическими, плазменными методами и их сочетанием. Выбор технологического оборудования для подготовительных операций определяется серийностью производства.

Механическая подготовка в условиях мелкосерийного производства осуществляется вручную смесью венской извести и шлифпорошка под струей воды. Механизированные и автоматические конвейерные линии применяют в условиях крупносерийного и массового производства. Инструментом на этих линиях служат абразивные круги, капроновые или нейлоновые щетки, на которые подается абразивная суспензия, либо круги из нетканого нейлона, насыщенные мелкодисперсным порошком карборунда или алунда, которые для устранения перегрева обильно смачиваются водой.

Для очистки монтажных отверстий от наволакивания смолы и других загрязнений широко применяются установки гидроабразивной обработки. В них платы со скоростью 0,2 – 0,4 м/мин проходят рабочую промывную камеру (в которую через инжекторные форсунки, под давлением 0,5 – 0,7 МПа подается суспензия из абразивного порошка (24А, 63С) и воды) и сушильную камеру (в которой просушка осуществляется сжатым воздухом).

Ручная химическая и электрохимическая подготовка поверхности проводится в ваннах с различными растворами при покачивании заготовок и последующей их промывкой, а механизированная – на автооператорных линиях модульного типа по заданной программе.

Высокое качество и производительность обеспечивает плазменная очистка объектов производства, которая устраняет использование токсичных кислот, щелочей и их вредное воздействие на обслуживающий персонал, материалы обработки и окружающую среду. Современные установки плазмохимической обработки с программным управлением, предназначенные для удаления диэлектрика с торцевых участков отверстий, обычно состоят из реактора, мощного ВЧ-генератора, устройства контроля и управления параметрами процессов, вакуумного насоса. Давление в камере (реакторе) поддерживается на уровне 20 – 40 Па. Плазмообразующий газ, состоящий из кислорода (70 %) и тетрафторметана (30 %), подается в камеру со скоростью 600 – 900 см<sup>3</sup>/мин. Мощность ВЧ-генератора регулируется в диапазоне 0 – 4000 Вт, а частота составляет 13,56 МГц. На такой установке одновременно обрабатывается до 15 объектов размером 45×60 см, содержащих в каждом из них до 3000 отверстий. Длительность операции очистки пакета – 10 – 16 мин.

Специальная обработка диэлектрического материала (при изготовлении ПП с химически осаждаемой металлизацией) заключается в его подтравливании и придании шероховатости для увеличения прочности сцепления с металлизацией. Подтравливание диэлектрика проводится последовательной обработкой сначала в серной кислоте, а затем в плавиковой или в их смеси (5:1) при температуре 50 – 60°С. Скорость травления составляет 40 – 80 мкм/мин. После обработки заготовки нейтрализуют в растворе щелочей и тщательно промывают.

Увеличение шероховатости диэлектрических поверхностей и клеевых композиций (слоев адгезива, например, в виде акрилбутадиенстирольного каучука) достигается механической (гидроабразивной) или химической обработкой.

Контроль качества подготовки металлических поверхностей заготовок ПП оценивают по полноте смачивания их водой. Состояние диэлектрических поверхностей проверяют микроскопическими исследованиями, измерением высоты микронеровностей, проведением пробной металлизации и оценкой прочности ее сцепления с основанием, а также измерением сопротивления изоляции после пребывания объекта производства в камере влажности.

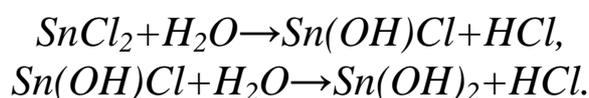
К подготовительным операциям относятся упаковка заготовок (полуфабрикатов) или готовых ПП на автоматическом оборудовании путем размещения их между слоями полиэтиленовой пленки, которая при тепловой обработке заваривается с четырех сторон, образуя герметичную упаковку.

**Металлизация** (то есть создание на диэлектрическом основании слоя металла, чаще всего меди) в производстве ПП является одним из самых важных технологических этапов, так как во многом определяет электрофизические характеристики и надежность ЭУ, обеспечивает требуемую плотность коммутационных элементов и, тем самым, плотность монтажа ячеек ЭС. Самая простая технология металлизации диэлектриков – это **фольгирование** (например, плакированием слоистых пластиков медной фольгой), поэтому большинство исходных материалов для производства ПП представляют собой фольгированные диэлектрики. Однако фольгирование не обеспечивает металлизации отверстий (переходных, монтажных) и необходимую плотность коммутации в соответствии с современными требованиями к ПП, что стимулировало появление других технологий металлизации, причем комбинация химической и гальванической технологий осаждения меди оказалась наиболее пригодной (в смысле технологической совместимости) для изготовления ПП и некоторых МПП на основе фольгированных слоистых пластиков.

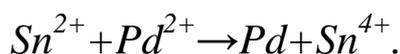
**Химическая металлизация** обеспечивает осаждение пленок металлов с высокой равномерностью по толщине на любые поверхности разных материалов; используется как в качестве основного токопроводящего слоя, в котором формируют элементы коммутации, так и в качестве подслоя при гальваническом осаждении (в том числе с целью доращивания до нужной толщины) металлов (чаще всего селективном).

Для придания диэлектрику способности к металлизации (то есть каталитических свойств) и обеспечения адгезии химически осаждаемого металла на диэлектрик производят сенсбилизацию и активацию его поверхности.

**Сенсбилизация** осуществляется для формирования на поверхности диэлектрика пленки ионов двухвалентного олова  $Sn^{+2}$ , которые при последующей активации обеспечат восстановление ионов активатора (катализатора) металлизации. Заготовки в этом случае обрабатывают в растворе двухлористого олова  $SnCl_2$  и соляной кислоты  $HCl$  в течение 5 – 7 мин и промывают в дистиллированной воде, при этом происходит гидролиз хлористого олова по реакции:



**Активация** заключается в том, что на поверхности диэлектрика, сенсibilизированной двухвалентным оловом, происходит реакция восстановления ионов каталитического металла (преимущественно палладия  $Pd$ ), способствующего последующему осаждению меди. Заготовки активируют путем их обработки в течение 5 – 7 мин в растворе, содержащем двуххлористый палладий  $PdCl_2$  и аммиак (водный). При этом на диэлектрике происходит реакция:



Для улучшения качества металлизации часто применяют совмещенный сенсibilизирующе-активирующий раствор, например, включающий двуххлористый палладий  $PdCl_2$ ; соляную кислоту  $HCl$ ; хлористый калий  $KCl$  и воду. После активирования и промывки заготовки поступают на химическое меднение.

Химическое осаждение меди происходит вследствие восстановления ионов двухвалентной меди на активированных поверхностях из ее комплексных солей. В состав растворов для химического меднения входят соли меди, являющиеся источником катионов  $Cu^{+2}$ , соли никеля для более прочного сцепления меди с диэлектриком; щелочь; комплексообразователь, предотвращающий выпадение гидроксида металла в растворе; формалин в качестве восстановителя; сода как буферная добавка, повышающая скорость меднения; стабилизаторы, и другие добавки, улучшающие качество медного слоя.

Химическое меднение ПП производят в специальных, чаще всего гибко автоматизированных или полуавтоматизированных, линиях с набором ванн необходимого размера, выполняемых из материалов, выдерживающих воздействие технологических сред. Ванны оборудованы устройствами фильтрации и дозирования растворов, системами контроля и поддержания заданной температуры (с точностью  $\pm 1^{\circ}C$ ), состава и других параметров технологических сред и объектов, а также приводом качания заготовок, размещаемых в групповых подвесках. В соответствии с заданной программой подвески с заготовками перемещаются с помощью манипулятора, управляемого ЭВМ. В ваннах должны проводиться операции подготовки поверхности, сенсibilизации, активации, меднения, промежуточные промывки и сушка объектов производства. В линиях для серийного и массового производства устанавливаются также специальные ванны – сборники дорогостоящих растворов.

Схема процесса и установки химической металлизации приведены на рис. 4.9 и 4.10.

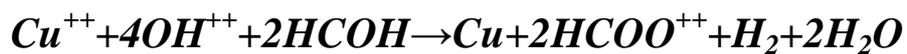


Рис. 4.9. Схема химической металлизации

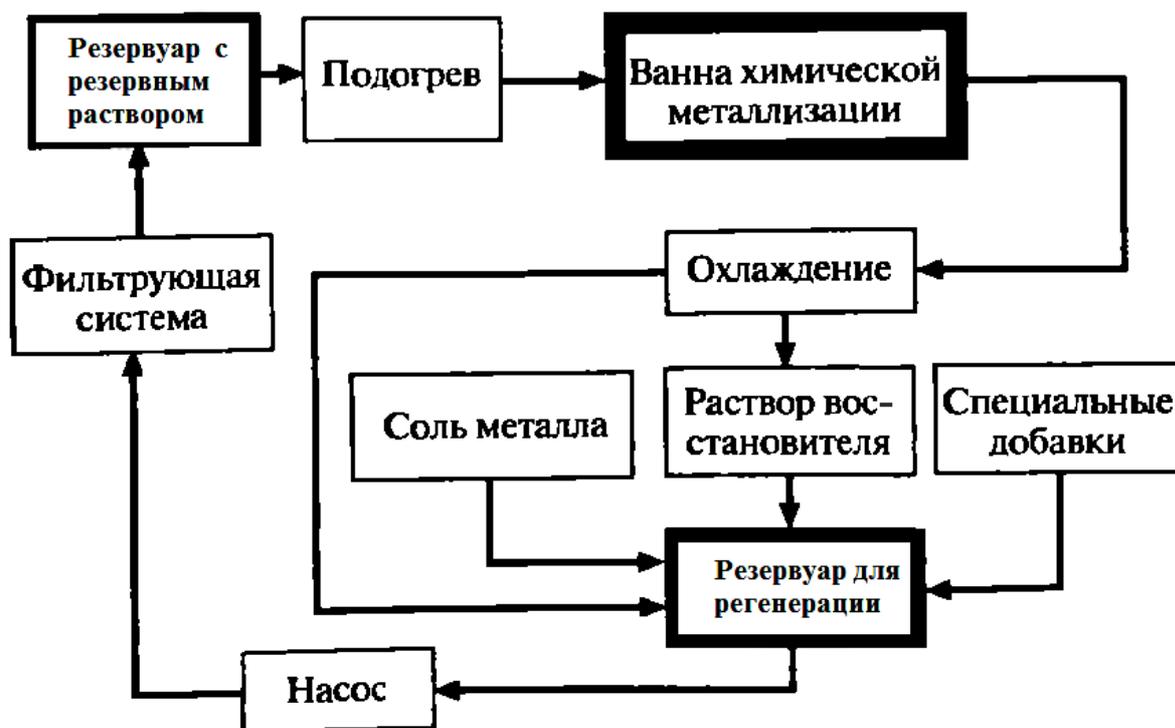


Рис. 4.10. Схема установки химического меднения

Основными проблемами химической металлизации являются низкая производительность, сложность контроля и управления параметрами процесса, использование дорогостоящих материалов и неустойчивость к термоциклам осадков меди толщиной более 3 мкм. Для устранения указанных недостатков совершенствования данной технологии не прекращаются.

**Гальваническая металлизация** (чаще всего селективная) при производстве ПП применяется для усиления слоя химической меди; нанесения различных металлических покрытий (например, металлорезиста типа олово-свинец толщиной 8 – 20 мкм) с целью предохранения проводящего рисунка при травлении заготовок, защиты его от коррозии и обеспечения хорошей паяемости; создания на части проводящего рисунка (например, на концевых печатных контактах, то есть на ламелях) специальных покрытий (из палладия, золота, родия и т.п.) толщиной 2 – 5 мкм. Заготовки, закрепленные на специальных подвесках-токоподводах, помещают в гальваническую ванну с электролитом между анодами, выполненными из металла покрытия. Режим электрохимической металлизации выбирают таким образом, чтобы при высокой производительности были обеспечены равномерность толщины покрытия и его адгезия.

Равномерность толщины осажденных слоев зависит от габаритных размеров металлируемых заготовок (с их увеличением равномерность покрытий снижается, что может быть частично скомпенсировано увеличением расстояния между анодами, а также подбором их положения в пределах гальванической ванны); диаметров металлируемых отверстий (отношение диаметров к толщине заготовок должно быть не менее 1/3); расположения заготовок в ванне (для улучшения равномерности покрытия, заготовки размещают симметрично и параллельно анодам, площадь которых должна в 2–3 раза превышать площадь металлизации при расстоянии между электродами не менее 150 мм); рассеивающей способности электролитов; оптимальной плотности тока (при низких значениях уменьшается толщина покрытия в центре заготовки, при высоких происходит утолщение покрытия на углах и кромках заготовки); наличия специальных экранов между электродами.

Адгезия гальванического покрытия зависит от качества подготовки поверхности под металлизацию, длительности перерыва между подготовкой поверхности и нанесением покрытия, от соблюдения режимов процесса. Более пластичные и равномерные осадки получают в сернокислых электролитах.

Одним из эффективных путей улучшения качества гальванических покрытий является использование нестационарных режимов электролиза (под действием периодических токов – импульсного, реверсивного, произвольной формы различной частоты и скважности), что позволяет сглаживать микрорельеф покрытия, повышать его равномерность по поверхности и в монтажных отверстиях заготовки.

Гальваническая, как и химическая металлизация чаще всего проводится на автооператорных линиях с автоматизированной системой управления по циклограммам, обеспечивающей управление температурными режимами ванн, включением-выключением установок фильтрации растворов, промывочных ванн и т.д. В настоящее время осваиваются гибкие автоматизированные линии, позволяющие быструю перенастройку режимов металлизации при изменении условий функционирования оборудования или показаний датчиков параметров качества процесса осаждения. Благодаря незначительной погрешности (0,5 %) обработки данных, ЭВМ способствует получению в таких линиях покрытий высокого качества.

**Формирование рисунка коммутации** в производстве ПП чаще всего осуществляется после создания слоя металлизации либо во время металлизации и заключается в получении (либо применении) защитной маски и реализации последующего селективного травления слоя металлизации в местах, не защищенных маской (либо селективной металлизации диэлектрического основания). Основными методами, применяемыми в промышленности для создания защитной маски (защищенного рельефа), являются офсетная печать, трафаретная печать и фотопечать. Выбор метода определяется конструкцией ПП, требуемыми точностью и плотностью коммутации, производительностью оборудования и экономичностью процесса.

Но какие бы процессы печати ни использовались, все они начинаются с фотографического изображения будущего рисунка – фотошаблона, в нашем случае – с изображения топологии схемы со всеми элементами печатного монтажа: проводниками, контактными площадками для пайки, для отверстий, экраны, печатные разъемы, элементы электрической схемы и т.д. Используя фотошаблон, получают масочное изображение на сите – сетчатый трафарет для трафаретной печати, рельефное изображение фоторезиста на плоском основании для формирования рисунка субтрактивным или аддитивным методом, рельефные формы для офсетной печати краской или для флексографии.

Из всего разнообразия фотопроцессов в техническом их применении установились определенные традиции, основная направленность которых – получить штриховое (без полутонов) изображение большой плотности и большой контрастности. Материалы для фотошаблонов должны обладать в первую очередь высоким градиентом оптической плотности, высокой износостойчивостью, позволяющей многократно использовать их в процессах фотопечати и, что очень важно, высокой размерной устойчивостью.

Фотоматериалы – светочувствительные материалы, предназначенные для получения фотографических изображений.

Фотоматериалы для фотошаблонов по общей классификации фотоматериалов выделяются следующим образом:

- по назначению – микрофильмирование;
- по воспроизведению цвета объекта съемки – черно-белые монохроматические (с однотонным окрашенным изображением);
- по способу применения – негативные, позитивные, обращаемые;
- по виду подложки – на гибкой полимерной основе, на жесткой основе (фотопластинки, чаще всего из стекла);
- по формату – листовые, рулонные;
- по сенситометрическим характеристикам: общая и эффективная светочувствительность, коэффициент контрастности, фотографическая широта, оптическая плотность вуали, максимальная оптическая плотность изображения и др.;
- по структурнорезкостным характеристикам: разрешающая способность, среднеквадратическая гранулярность;
- по физико-механическим свойствам: размерная устойчивость в условиях изменения температуры и влажности, термостойкость, механическая прочность слоев, влагоемкость, скручиваемость.

*Диазографические пленки* используются главным образом для размножения микроформ и, в частности, для изготовления рабочих фотошаблонов печатных плат. Диазопленки обладают такими свойствами, которые хорошо согласуются с требованиями к фотошаблонам, в частности для визуального совмещения. Фотошаблоны из диазопленки имеют прозрачное желтое изображение, позволяющее легко совмещать его со сверленными отверстиями. Это изображение не прозрачно для ультрафиолетового света, к которому чувствителен фоторезист. Мало того, поскольку изображение находится не в желатине, используемом в серебросодержащих фотопленках, поверхность

фотошаблонов из диазопленки устойчива к истиранию, что очень нужно при многократном использовании фотошаблонов в процессах экспонирования.

Для изготовления фотошаблонов предназначены фототехнические черно-белые пленки и пластинки для репродукционных и копировальных работ в полиграфии. Фотопленки изготавливаются на полиэтилентерефталатной (толщина 65 – 175 мкм) или триацетатцеллюлозной (100–200 мкм) подложках.

Существуют следующие принципы прорисовки фотошаблонов:

*Методы ручной работы.* Конечно, эти методы относятся к истории, но чтобы понять значительность достижений последнего времени, стоит хотя бы перечислить методы ручного изготовления фотооригиналов, из которых потом методом репродукции изготавливались рабочие фотошаблоны.

*Вычерчивание* – большие коллективы работниц, получившие хорошие навыки в картографии, вычерчивали на ватмане гуашью топологию печатных плат. В основном использовались следующие средства работы:

- вручную – с помощью простых чертежных документов и приспособлений, на основе с предварительно нанесенной координатной сеткой, с помощью точных шаблонов;
- вычерчивание на координатографе, управляемом вручную.

Применение координатографов, которые с давних пор использовались в картографии, намного увеличило точность изготовления фотооригиналов.

*Метод аппликации примагничивающимися элементами.* На стальную пластину, выкрашенную в белый цвет, укладывали шаблоны элементов рисунка, изготовленные из магнитной резины. Для точного позиционирования элементов пластина имела отверстия, высверленные с большой точностью на координатно-сверлильном станке. Для упрощения работы оператора на стальную пластину проецировали эскиз печатной платы, предварительно нарисованный на миллиметровке.

*Аппликация липкой лентой.* В этом случае рисунок печатной платы выполняется цветной липкой лентой. Элементы рисунка наклеиваются непосредственно на безусадочную основу с нанесенной координатной сеткой. Наклеиванием липкой лентой получали рисунок с хорошей резкостью контуров. При изготовлении фотошаблонов двусторонних печатных плат для одной стороны платы использовали

один цвет (например, красный), для обратной – другой (например, синий). При репродукции через соответствующие светофильтры получали комплект из двух фотошаблонов. Этот же метод использовали для нанесения рисунка непосредственно на фольгу диэлектрика для защиты от травления.

Целый ряд фирм специализировался на производстве и поставках наборов для аппликации. В последующие времена они пользовались большим успехом в лабораторной практике.

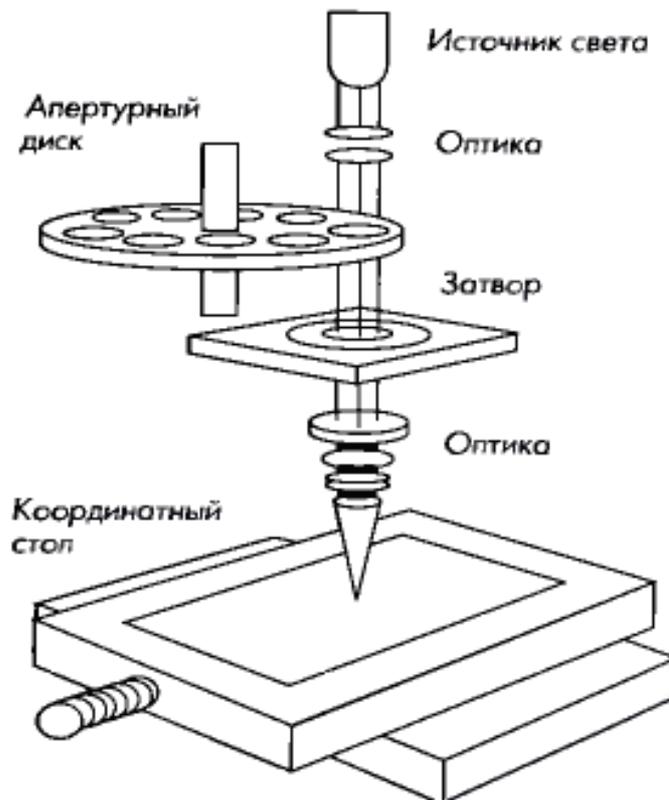
*Метод скрайбирования двухслойной пленки.* Основу этого метода создает двухслойная пленка. Базовый слой – безугадочная синтетическая пленка или стекло. Покровный слой – полупрозрачная пленка красного цвета, которая при репродукции воспроизводится в черном цвете. Для изготовления оригинала специальным резцом вырезается по контуру и отделяется от основания пленка покровного материала. Этот метод чаще использовался в изготовлении фотооригиналов для изготовления микросхем и отсюда временно перешел в производство печатных плат. Метод отличался высокой точностью воспроизведения рисунка.

*Резание по эмали.* Полированное стекло покрывается непрозрачным слоем эмали. Вырезание рисунка производится на точном координатографе с ручным приводом головки. Расстановка контактных площадок производится оператором по таблице координат с точностью  $\pm(0,2-0,5)$  мм. При репродукции с уменьшением обеспечивается точность позиционирования не хуже  $\pm 10$  мкм.

*Автоматические методы изготовления фотошаблонов.* Установились два принципа прорисовки рисунка печатной платы: векторный и растровый. И хотя в последнее время предпочтение отдается растровому методу, используемому в фотоплоттерах, необходимо хотя бы упомянуть и векторный метод, занявший значительный период развития технологий печатных плат.

*Векторный метод вычерчивания изображений.* Машины, в которых используются векторные принципы прочерчивания рисунка на координатных столах, принято называть координатографами (рис. 4.11). На одних из них работы могут выполняться вручную, на других – в автоматических режимах. В автоматических координатографах в большинстве случаев для прорисовки фотошаблонов используется световой луч, экспонирующий фотоматериал. Для формирования светового пятна заданной формы используются соответствующие апертуры, которые размещаются на стеклянной планке или

диске. При прорисовке программно управляемый механизм выставляет необходимую в данном случае апертуру: контактную площадку той или другой формы, круговое или квадратное пятно определенного диаметра для прорисовки проводников и т.д.



*Рис. 4.11.* Принцип работы фотокоординатографа

Погрешности прорисовки фотошаблонов на координатографах складываются из погрешностей позиционирования координатного стола и погрешностей позиционирования световых пятен от апертур на планках или дисках.

*Растровый принцип.*

По способу печати растровые графопостроители подразделяются на следующие:

- электростатические графопостроители (electrostatic plotter) с электростатическим принципом воспроизведения изображения на специальных носителях;

- струйные графопостроители (ink-jet plotter), основанными на принципе струйной печати (выдавливании красящего вещества через сопла форсунок за счет термоудара или динамического удара пьезоэлементом);

- лазерные графопостроители (laser plotter), воспроизводящие изображение с использованием луча лазера на промежуточном носителе с последующим переносом на бумагу;

- светодиодные графопостроители (LED-plotter), отличающиеся от лазерных способом формирования изображения для переноса его с барабана на бумагу;

- термические графопостроители (thermal plotter);

- фотоплоттеры (photo plotter) с фиксацией изображения на светочувствительном материале.

Растровый принцип формирования изображений полностью подобен воспроизведению рисунка на экранах мониторов: телевизоров, компьютеров и т.д. Построчно бегающий луч модулируется по яркости, поэтому на изображении появляются светлые и темные элементы.

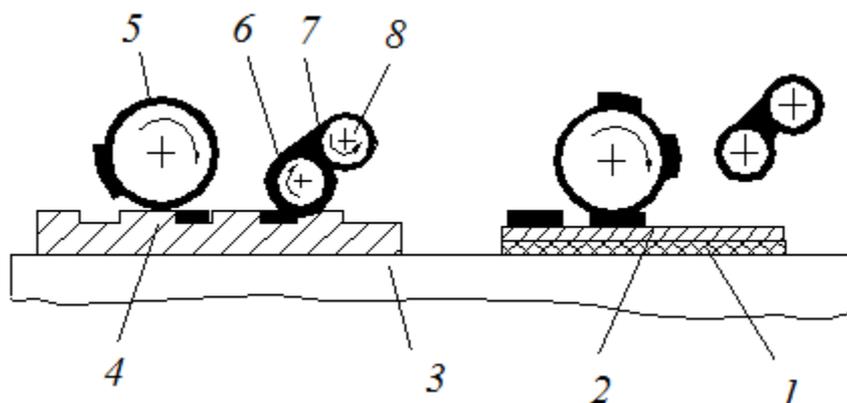
Растровый метод записи изображений одинаково легко воспроизводит любые элементы рисунка: позитивные и негативные, прямые и зеркальные. Возможности проектирования печатных плат расширяются за счет простоты воспроизведения любых форм проводников и контактных площадок.

Технологии печатных плат заимствовали процессы печати из полиграфического производства, в котором их великое множество, но устоялись в них лишь фотолитография, трафаретная печать и очень редко (в массовом производстве простых плат) офсетная печать. Но какими бы ни были процессы печати, все они начинаются с процессов фотолитографии, когда-то или иное изображение формируется с фотошаблона в слое светочувствительного полимера. Поскольку назначение рельефа, образуемого фотополимерами, быть устойчивым к растворам травления и электролитам, их называют фоторезистами.

**Офсетная печать** состоит в изготовлении печатной формы, на поверхности которой формируется рисунок слоя (рис. 4.12).

Форма закатывается трафаретной краской с помощью валика, а затем офсетный цилиндр переносит краску с формы на подготовленную поверхность металлизированной заготовки (обычно фольгированного диэлектрика). Метод применим в условиях массового и крупносерийного производства с минимальной шириной проводников и зазоров между ними 0,3 – 0,5 мм (для ПП 1 и 2 классов плотности коммутации) и с точностью воспроизведения изображения  $\pm 0,2$  мм. Его недостатками являются высокая стоимость оборудова-

дования, необходимость использования квалифицированного обслуживающего персонала, невысокая плотность рисунка элементов коммутации и трудность изменения этого рисунка.



**Рис. 4.12.** Схема установки офсетной печати:

- 1 – диэлектрик; 2 – медная фольга; 3 – основание установки;  
4 – печатная форма; 5 – офсетный цилиндр;  
6 – валик для нанесения краски; 7 – краска; 8 – прижимной валик

Офсетная печать в производстве печатных плат и толсто пленочных изделий микроэлектроники используется для создания на металлизированных подложках тонких лаковых слоев, выполняющих роль резистов при травлении и гальванических процессах. В клише, несущее изображение схемы (проводники, контактные площадки), закатывается краска. Затем краска снимается с помощью офсетного валика, покрытого резиной, переносится на подложку и подвергается сушке при высокой температуре.

Для изготовления клише маскируют методом фотопечати многослойную фольгу, биметаллическую фольгу или цинковые пластины, которые затем травят.

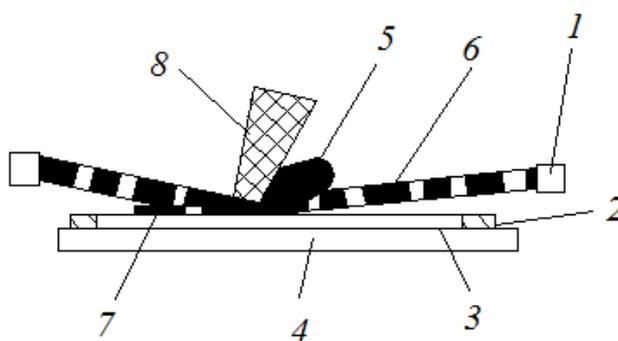
Офсетной печатью создаются слои толщиной не более 1 мкм, которые вследствие малой толщины часто содержат поры.

Точность печати и резкость контуров определяются параллельностью валиков, качеством покрытия валиков и особенно типом и консистенцией краски. Кроме того, на качество печати влияют и субъективные факторы, например, установка прижимного усилия машины.

С помощью одного клише часто можно выполнить неограниченное число оттисков. Производительность метода ограничена скоростью перемещения валов (несколькими сотнями оттисков в час). Недостатками, из-за которых офсетная печать редко используется

в производстве печатных плат и толсто пленочных изделий микроэлектроники, являются трудности получения беспористых слоев, высокая стоимость оборудования и необходимость использования квалифицированного обслуживающего персонала.

**Трафаретная (сеткографическая) печать** основана на нанесении специальной краски на металлизированную заготовку путем продавливания резиновой лопаткой (ракелем) этой краски через сетчатый трафарет, на котором необходимый рисунок образован ячейками сетки, открытыми для продавливания (рис. 4.13). Метод обеспечивает высокую производительность и экономичен в условиях массового производства. Точность и плотность получения элементов коммутации несколько выше по сравнению с предыдущим методом (возможно изготовление ПП 1 – 3 классов).



**Рис. 4.13.** Принцип трафаретной печати:  
1 – рама; 2 – фиксатор подложки; 3 – фольгированный диэлектрик; 4 – основание; 5 – трафаретная краска; 6 – трафарет; 7 – напечатанный рисунок; 8 – ракель

В производстве печатных плат и толсто пленочных интегральных микросхем трафаретная печать является важнейшим процессом для создания рисунков на основе химически стойких красок, эмалей и паст. В качестве основы используют плоские фольгированные или нефольгированные подложки, синтетические и керамические материалы. В технологиях печатных плат трафаретной печатью наносят следующее:

- резисты – синтетические краски для травления рисунка печатных плат субтрактивным методом;
- паяльные маски – электроизоляционные покрытия, как правило, на эпоксидной основе;
- маркировки – композиции, состоящие из связующего, растворителей и мелкодисперсной основы (наполнитель и пигмент);

- специальные пасты для формирования пассивных компонентов – резисторы, слои, формирующие конденсаторы;
- паяльные пасты.

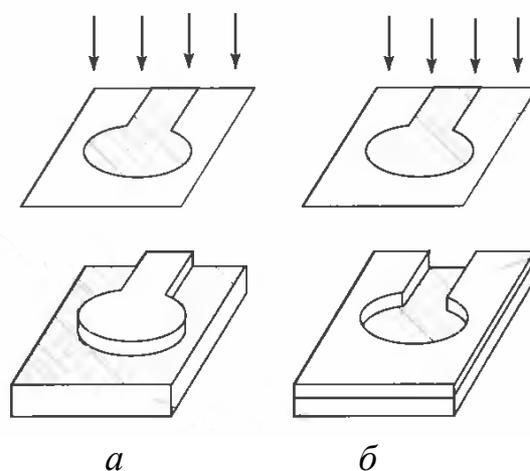
Качество защитного рельефа в значительной степени определяется реологическими (вязкотекучими) свойствами красок и зависит от следующего:

- конструкции и материалов трафарета и ракеля;
- технологического зазора трафарет-заготовка;
- технологических режимов трафаретной печати и возможностей их контроля и управления;
- разновидностей способов и технологических режимов закрепления краски на заготовках.

Нанесение защитной краски через сетчатый трафарет осуществляется вручную или на автоматическом оборудовании, которое включает загрузочное устройство, модуль для рихтовки заготовок, сеткографический модуль, сушильную печь, накопитель готовых объектов. Загрузка заготовок в автоматических линиях происходит посредством ленточного конвейера. Подведенная им заготовка фиксируется в рабочей зоне на штифтах с точностью  $\pm 25$  мкм и закрепляется при помощи вакуумной системы. Синхронно краскодозирующим устройством краска подается в зону обработки, а ракель автоматически продавливает ее через ячейки трафарета. В системе управления ракелем регулируется угол наклона, скорость движения, давление и диапазон хода. Время, затрачиваемое на один цикл печатания, составляет 5 – 7 с. Смена трафарета и настройка модулей на новый тип заготовок производится по контрольному шаблону. Для этого печатный стол перемещается с точностью  $\pm 0,05$  мм по двум координатам с помощью микрометрических винтов и поворачивается вокруг вертикальной оси на угол  $7 - 10^{\circ}$ . Время смены и настройка не превышают 15 мин. Имеются также модели оборудования для одновременного нанесения защитного рельефа на две стороны заготовки. Проблема сушки (с целью закрепления краски на заготовке) в трафаретной печати решается путем создания быстрозакрепляющихся красок и высокопроизводительного оборудования. Краски с органическими растворителями сушат в туннельных конвейерных печах горячим воздухом при температуре  $150 - 180^{\circ}\text{C}$  или под действием ИК-излучения. Появившиеся в последнее время краски мгновенной сушки, содержащие мономернополимерные компоненты и фотоинициатор, закрепляются под воздействием ультрафиолетовых (УФ) лучей. Однако они имеют

небольшой срок хранения в герметичной таре и высокую стоимость. При хранении заготовок с защитным рельефом более пяти суток удаление краски становится затруднительным. Снимают трафаретную краску 3 – 5 %-ным раствором горячей (40 – 60°С) щелочи в течение 10 – 20 с. Раствор подается на заготовки устройствами струйного типа. Аналогично промываются сетчатые трафареты после работы.

**Фотопечать** (ее называют фотолитографией или фотолитографическим методом получения рисунка в требуемых слоях из различных материалов) характеризуется самой высокой точностью рисунка ( $\pm 0,05$  мм при простейшей ее реализации) и позволяет изготавливать платы с плотностью коммуникации, соответствующей 3 – 5 классу ПП. Формирование защитного рельефа фотопечатью обычно состоит в контактном копировании рисунка коммутации с фотошаблона на металлизированную заготовку, покрытую светочувствительным слоем. Таким образом, фотолитография предусматривает нанесение на подготовленные поверхности металлизированных заготовок специальных светочувствительных материалов – фоторезистов, которые разделяются на негативные и позитивные (рис. 4.14).

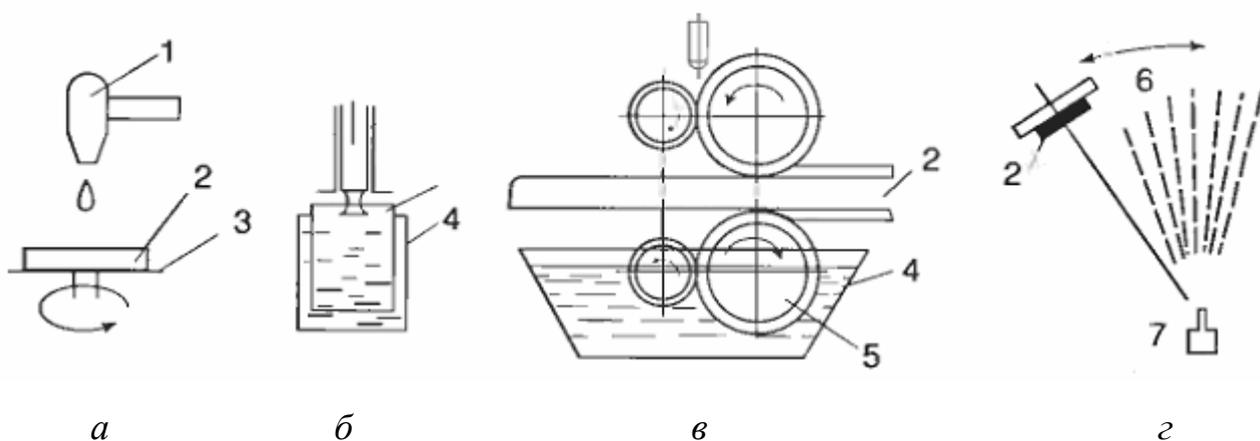


**Рис. 4.14.** Формирование рисунка:  
*а* – из позитивного фоторезиста,  
*б* – из негативного фоторезиста

Фоточувствительность полимеров проявляется или в фотополимеризации или в фотодеструкции. Первые называются негативными фоторезистами, вторые – позитивными. Негативные фоторезисты образуют при воздействии света (обычно УФ-излучения) защитные маски вследствие реакции фотополимеризации, при этом облученные участки остаются на поверхности заготовки, а необлученные удаля-

ются при проявлении (то есть в этом случае требуется фотошаблон с негативным изображением элементов коммуникации). В позитивных фоторезистах под действием света происходит фотодеструкция органических молекул, вследствие чего облученные участки удаляются при проявлении (в этом случае используют фотошаблон с позитивным изображением элементов коммутации).

Фоторезисты могут быть жидкими и сухими (пленочными). Жидкие фоторезисты значительно дешевле пленочных, и для работы с ними требуется несложное оборудование. Их наносят окунанием, центрифугированием или пульверизацией (рис. 4.15).



**Рис. 4.15.** Способы нанесения жидких фоторезистов:  
*а* – центрифугированием, *б* – медленным вытягиванием,  
*в* – валками, *г* – пульверизацией;  
 1 – полив эмульсии, 2 – подложка, 3 – стол центрифуги,  
 4 – ванна с эмульсией, 5 – вал для переноса эмульсии,  
 б – подвижный стол, 7 – пульверизатор

Применение сухих пленочных фоторезистов (СПФ) значительно упрощает процесс фотопечати (исключаются операции сушки, дублирования, ретуширования). Нанесение СПФ легко поддается автоматизации, при этом обеспечивается равномерность защитных слоев по толщине даже при наличии отверстий, так как СПФ не затекает в отверстия заготовки; он более устойчив в химически агрессивных средах, меньше подвержен загрязнению и повреждению, так как содержит защитную пленку; его вязкость не изменяется во времени.

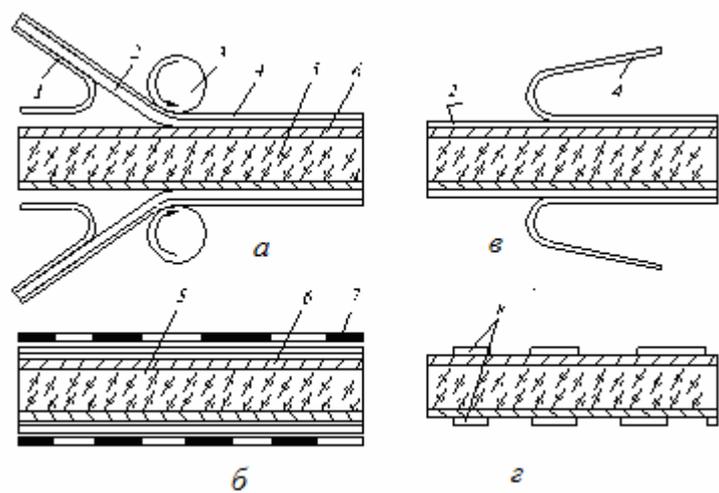
Среди жидких негативных фоторезистов наибольшее распространение получил светочувствительный материал на основе поливинилового спирта (ПВС), кроме того, используются также фоторезисты на основе поливинилцинномата (ФН-5ТК) и синтетического циклокаучука (ФН-П).

Позитивные фоторезисты на основе диазосоединений (например, ФП-383 и др.) имеют повышенную разрешающую способность, большую химическую стойкость (особенно в кислотных средах) по сравнению с негативными фоторезистами (более устойчивыми в щелочных средах). При нанесении жидких фоторезистов окунанием заготовки погружаются в кювету с фоторезистом и вытягиваются с постоянной скоростью (10 – 50 см/мин). Толщина слоя определяется вязкостью, скоростью вытягивания и колеблется от 4 до 8 мкм. Способ не требует дорогостоящего оборудования и обеспечивает двустороннее нанесение фоторезиста при невысокой равномерности наносимого слоя. Применение центрифугирования приводит к повышению равномерности наносимых слоев, но при этом заметно уменьшается их толщина. Конвейерные установки нанесения фоторезиста имеют секции ИК-сушки фоторезиста после его нанесения.

**Сухие пленочные фоторезисты** (СПФ) более технологичны и могут быть использованы на всех операциях получения рисунка коммутации. Они представляют собой структуру, состоящую из светочувствительного слоя, который помещается между предохранительной полиэтиленовой и защитной светопроницаемой лавсановой (противоокислительной) пленками. Тонкие слои СПФ применяют в качестве маски при травлении меди с пробельных мест, средние – для создания рисунка при доращивании слоя металлизации, а толстые – для защиты отверстий с металлизацией при травлении. СПФ наносят на заготовки валковым способом (рис. 4.16) при нагреве до 105 – 120°С и плотно прикатывают к поверхности заготовки для удаления воздушных включений.

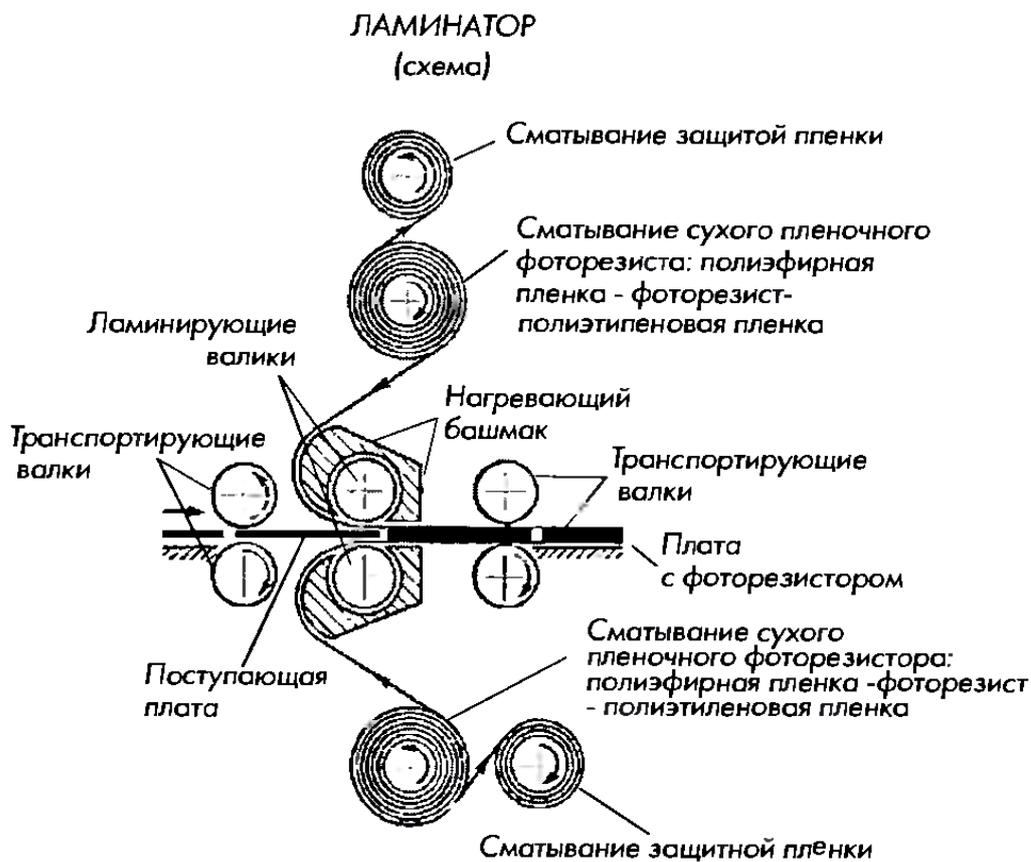
Реализующие этот способ установки называются ламинаторами (рис. 4.17). Они снабжены терморегуляторами, тарированными устройствами прижима подающих валков, устройствами для обеспечения заданного зазора, давления на заготовку и обрезания фоторезиста после нанесения требуемой длины.

Полная автоматическая сборка – разборка фотошаблонов с заготовками и их экспонирование проводятся на робототехнологическом комплексе, который состоит из установки двустороннего экспонирования, робота и системы управления на базе компьютера.



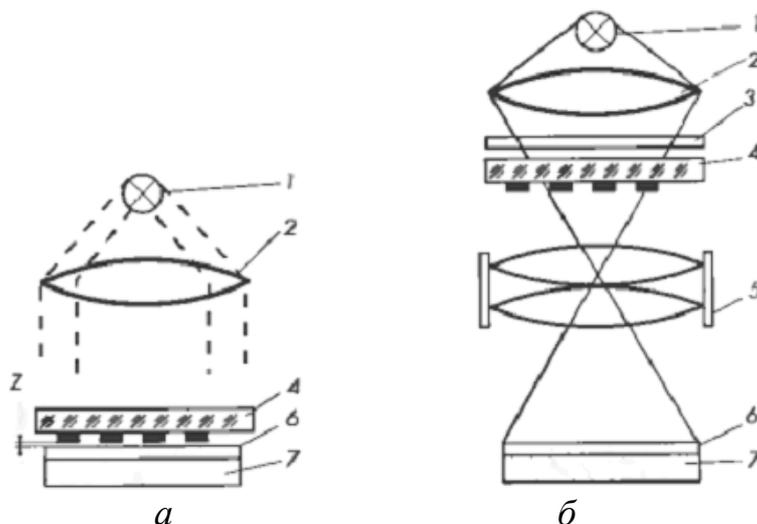
**Рис. 4.16.** Последовательность основных операций получения маскирующих участков с применением позитивного СПФ:

*а* – накатка СПФ; *б* – экспонирование СПФ через защитную пленку; *в* – удаление защитной пленки; *г* – проявление СПФ;  
 1 – предохранительная полиэтиленовая пленка, 2 – СПФ;  
 3 – накатывающий валик; 4 – защитная лавсановая прозрачная пленка; 5 – диэлектрик; 6 – слой медной фольги;  
 7 – фотошаблон; 8 – маскирующие участки из СПФ (защитный рельеф)



**Рис. 4.17.** Схема нанесения пленочного фоторезиста с помощью ламинатора

Экспонирование фоторезиста производится через фотошаблон. Различают контактную и проекционную фотолитографию (рис. 4.18).



**Рис. 4.18.** Методы экспонирования фоторезиста:  
*а* – контактный (зазор  $Z=0$ ) и на микрозазоре ( $Z \approx 10 \mu\text{м}$ );  
*б* – проекционный; 1 – источник актиночного излучения,  
 2 – конденсатор, 3 – фильтр, 4 – фотошаблон,  
 5 – объектив, 6 – фоторезист, 7 – подложка

В первом случае фотошаблон плотно прижат к слою фоторезиста, во втором – изображение фотошаблона проецируется на поверхность фоторезиста. Простота контактного способа обеспечила ему широкое распространение в технологии микроэлектроники. Его существенные недостатки – ограничение разрешающей способности из-за явлений дифракции – подсветки и возможность повреждения при контакте фотошаблона с прижимом и плёнкой фоторезиста. Проекционный способ имеет более высокую разрешающую способность, но требует достаточно сложного оборудования. При этом срок службы фотошаблона возрастает в несколько десятков раз.

Для проявления СПФ используют два вида установок: камерные для мелкосерийного производства и конвейерные для серийного производства. В последних проявитель подается на заготовки встречными потоками, что обеспечивает высокую скорость и равномерность проявления. Камерные установки имеют отсеки проявления, промывки, насос для подачи проявителя под давлением, систему струйной промывки, змеевики охлаждения проявителя проточной водой, таймеры, систему терморегулирования и устройства фильтрации проявителя.

Проявление, окрашивание и задубливание жидких фоторезистов проводят в конвейерных струйных установках модульного типа, оснащенных устройствами подачи растворов с их фильтрацией и регулировкой давления; роликовым конвейером, соединяющим все модули.

**Травление** представляет собой сложный окислительно-восстановительный процесс, который применяют для формирования проводящего рисунка коммутации путем удаления меди с непроводящих (пробельных или нерабочих) участков. Травление выполняют химическим или электрохимическим способом. Для химического процесса разработаны и используются в промышленности многочисленные составы на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, хромовой кислоты, перекиси водорода, хлорита натрия и др. Выбор травильного раствора определяется следующими факторами: типом применяемого резиста (фоторезиста или металлорезиста), скоростью травления, величиной бокового подтравливания, сложностью оборудования, возможностью регенерации травителей и экономичностью всех стадий процесса.

Скорость травления меди зависит от состава травителя, концентрации в нем окислителя и условий его доставки в зону обработки, температуры раствора и количества меди, перешедшей в раствор. Ее максимальное значение достигается при поддержании в заданных пределах режима обработки и обеспечении постоянной регенерации травителя. Величина бокового подтравливания оценивается фактором травления  $K=h/a$ , представляющего собой отношение толщины фольги (или основного слоя металлизации)  $h$  к величине изменения ширины печатного проводника  $a$ , которую уменьшают путем введения в используемые растворы специальных добавок в виде ионов металла с более низким потенциалом, чем у меди (например,  $Ag$ ,  $Hg$ ,  $Pt$ ,  $Pd$  или  $Au$ ) и органического соединения (например, мочевины, аминотриазола, амидов и др.). Технологический процесс травления состоит из операций предварительной очистки меди, повышающей равномерность ее удаления, непосредственно удаления меди с пробельных участков заготовки, очистки поверхности диэлектрика, осветления (при необходимости) поверхности металлорезиста и сушки.

Наибольшее распространение в технологии производства ПП получили травильные растворы (табл. 4.3) на основе хлорного железа (плотность 1,36 – 1,42 г/см<sup>3</sup>) при скорости травления 40 мкм/ мин. Такие травители отличаются высокой и равномерной скоростью травле-

ния, малой величиной бокового подтравливания, высокой четкостью получаемых контуров, незначительным содержанием токсичных веществ, экономичностью. Суммарная реакция, протекающая в растворе, описывается уравнением:

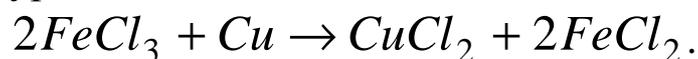


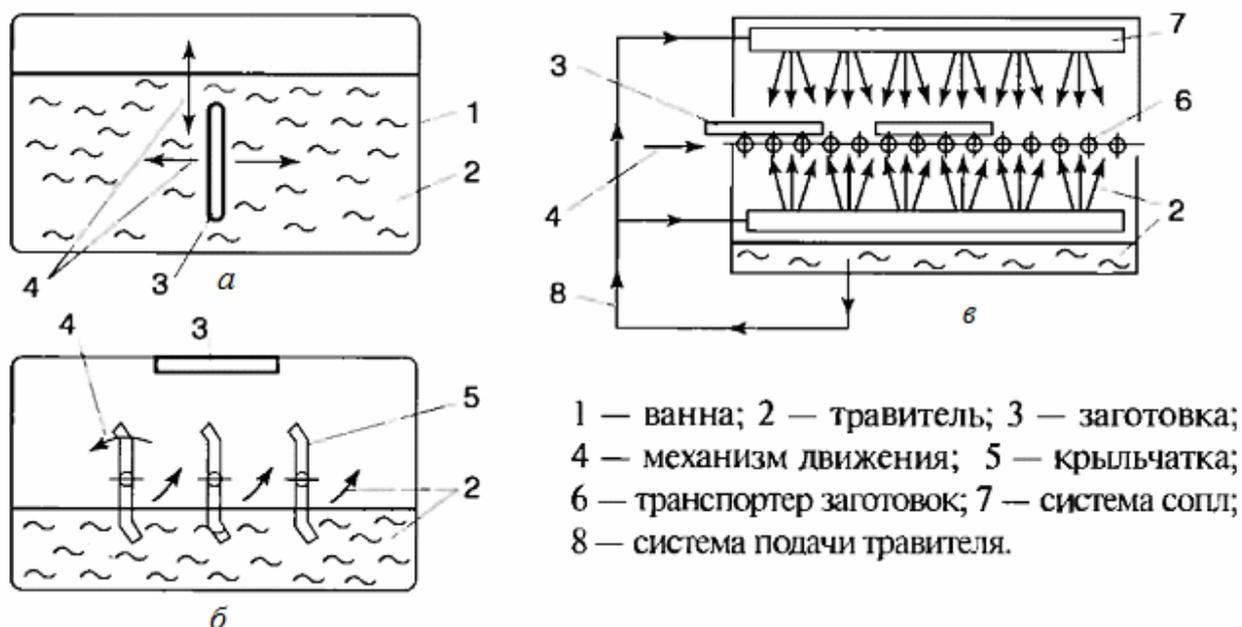
Таблица 4.3

*Травители для различных материалов*

Травитель	Материал														
	Алюминий (Al) и его сплавы	Свинец (Pb)	Германий (Ge)	Золото (Au)	Железа (Fe) и его сплавы	Медь (Cu) и ее сплавы	Хром (Cr)	Молибден (Mo)	Никель (Ni) и его сплавы	Серебро (Ag)	Кремний (Si)	Цинк (Zn)	Олово (Sn)	Стекло	Эпоксидная смола
Хлорное железо	X	X			X	X			X				X		
Серная кислота															X
Соляная кислота	X						X	X			X	X			
Азотная кислота					X		X		X		X				
Соляная и азотная кислоты	X			X				X							
Плавиковая кислота														X	
Плавиковая и азотная кислоты			X							X				X	
Хромовая кислота							X								
Хромовая и серная кислоты						X		X			X				
Хлорная медь						X									
Персульфат аммония						X		X							
Едкий натрий	X														
Соляная кислота и перекись водорода						X									

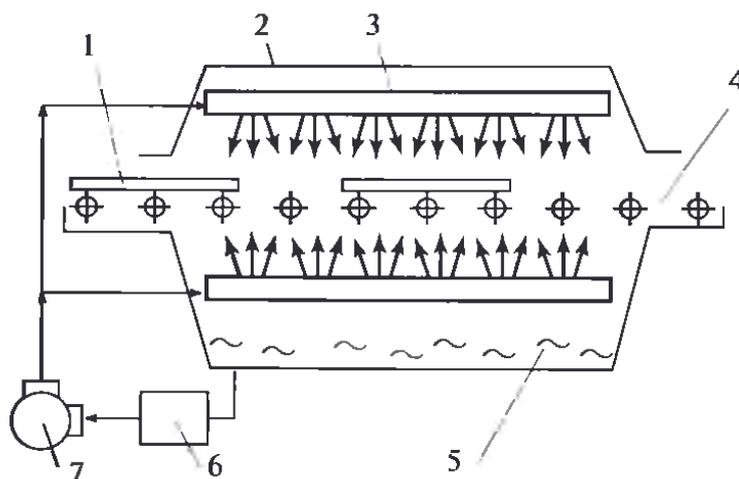
Химическое удаление меди проводится (рис. 4.19) погружением заготовок в травитель, наплескиванием травителя на их поверхность либо подачей травильного раствора на заготовки в виде струи (с помощью форсунки). Последний способ обеспечивает лучшее качество процесса травления. В этом случае давление раствора в форсунках колеблется в пределах 0,1 – 0,5 МПа, а струя подается перпендикулярно поверхности заготовки или при небольшом отклонении от перпендикуляра. Постоянное обновление травителя в зоне обработки

и удаление продуктов реакции обеспечивают высокую производительность струйного травления, а траектория струи – незначительное боковое подтравливание.



**Рис.4.19.** Принцип различных способов травления:  
 а – травление погружением, б – травление наплескиванием,  
 в – струйное травление

Наиболее эффективными являются струйные установки травления (рис. 4.20), в которых заготовка на роликовом транспортере перемещается в камере травления, после прохождения которой она попадает в камеры для нейтрализации и промывки.



**Рис. 4.20.** Схема установки струйного травления:  
 1 – заготовка, 2 – корпус, 3 – разбрызгивающее устройство,  
 4 – конвейер, 5 – травильный раствор, 6 – регенератор  
 отработанного раствора, 7 – система трубопроводов с насосом

Такие линии могут продолжаться устройствами для удаления фоторезиста, отмывки и сушки заготовок.

Производительное технологическое оборудование комплектуется по модульному принципу и содержит модули травления, регенерации, промывки, осветления и сушки, которые объединяются транспортной системой и системой трубопроводов. Автоматические модульные линии конвейерного типа оснащаются устройствами для контроля кислотности раствора, его температуры и давления в форсунках.

Электрохимическое травление в производстве ПП используется крайне редко и основано на анодном растворении меди с последующим восстановлением ионов травленного металла на катоде. Эта технология более экономична, так как проще в реализации, чем химическое травление, но подлежит доработке из-за неравномерности удаления металла по плоскости заготовки.

**Заключительные (финишные)** операции при изготовлении ПП включают формирование дополнительных технологических отверстий и (или) углублений (при необходимости, например для посадки кристаллов и др.); формирование конформных или влагозащитных покрытий (при необходимости); оплавление припоя (или облуживание); подготовку (очистку и осветление (при необходимости)) поверхностей (например, перед нанесением покрытий); контроль качества изготовленных плат и, при необходимости, различные испытания; формирование консервирующих покрытий (для межоперационного или длительного хранения плат); упаковку.

Изготовитель ПП должен гарантировать сохранение паяемости печатных плат в течение длительного срока их хранения (шесть месяцев). С этой целью производится оплавление металлорезиста (обычно гальванически осажденного сплава олово-свинец) на платах или их горячее лужение. При оплавлении структура сплава уплотняется в 1,3 – 1,5 раза и из него удаляются остатки электролита и других загрязнений. В промышленности применяют оплавление с помощью ИК-излучения или в жидком теплоносителе.

Если при изготовлении плат не предусматривается покрытие их проводящих дорожек металлорезистом (например, для ОПП или плат, изготавливаемых с применением химической металлизации), то для улучшения паяемости применяют горячее лужение их проводящего рисунка с помощью припоя типа ПОС-61. Нанесение припоя производят способом погружения или волной расплава (первый способ).

Толщина припоя на платах составляет 6 – 10 мкм, а его излишки удаляются непосредственно после нанесения (пока он не успел затвердеть) с помощью центрифуг, ракелей, струй горячего воздуха и т.д. Второй способ лужения заключается в нанесении на плату строго дозированного количества припоя в зону пайки. Для этого применяют специальные припойные пасты и, чаще всего, трафаретную печать с последующим оплавлением пасты.

Удаление с плат загрязнений и осветление металлического покрытия для сохранения его паяемости производится специальными растворами с последующей сушкой (например, конвекционной при 40 – 60°С в течение шести часов).

Контроль качества изготовленной ПП осуществляют визуально и с помощью специальных контрольно-измерительных средств, при этом определяют следующее:

- соответствие рисунка коммутации платы ее топологии (при высокой плотности коммутации используют для этого инструментальный микроскоп с проектором);

- наличие возможных дефектов (подтравов, нестравленных участков, отслаиваний проводящих элементов и покрытий, затеканий припоя и др.) в соответствии и классификатором дефектов в технологической документации (ТД) (с помощью микроскопа с проектором);

- геометрические размеры в соответствии с ТД (с помощью часового проектора или инструментального микроскопа);

- величину адгезионной прочности проводников к диэлектрическому основанию печатной платы методом отрыва (на контрольных образцах, с помощью адгезиометра);

- целостность электрических цепей, отсутствие коротких замыканий и требуемые по ТД электрические параметры (с помощью специальных электроизмерительных приборов или стендов).

Оценку надежности ПП осуществляется по результатам требуемого вида испытаний (в том числе ускоренных) тест-плат, например, на устойчивость к термоциклам или другим воздействиям. По результатам испытаний можно судить не только об эксплуатационной надежности плат, но и о степени совершенства технологии их изготовления.

Печатные платы консервируют с применением, например, ацетоноканифольного или спиртоканифольного флюса, распыляемого по

поверхности и в отверстия плат в специальных камерах. После просушки их упаковывают в полиэтиленовые пакеты каждую отдельно или последовательно по несколько штук (в пакеты на ленте).

#### **4.6. Технология изготовления многослойных печатных плат**

Методы изготовления многослойных печатных плат (МПП) постоянно эволюционируют, при этом явно наблюдается гегелевская диалектика развития по спирали: возврат к старому в новом качестве. Так метод послойного наращивания, уступивший в свое время первенство методу металлизации сквозных отверстий, вернулся как способ наращивания слоев с глухими отверстиями. А метод попарного прессования можно увидеть как фрагмент изготовления МПП со скрытыми межслойными переходами. Поэтому описание прежних методов изготовления МПП – это не просто дань уважения истории техники, а возможность возврата к ним в новых комбинациях. Мало того, в ряде успешно функционирующих электронных систем эти методы до сих пор присутствуют, и никто не собирается их менять, – нет повода.

Что касается новых методов, то они неизбежно будут продвигаться вслед за интеграцией элементной базы, увеличением функциональности аппаратуры, уменьшением ее габаритов и массы. Если рассматривать эту проблему с позиций российской действительности, то вслед за потерей темпов развития российской микроэлектроники можно потерять всю отечественную электронную индустрию, если допустить отставание в высоких технологиях печатных плат. Поэтому в этот раздел включены и перспективные методы, и схемы изготовления МПП, уже обсуждающиеся мировой общественностью технологов печатных плат.

**Метод попарного прессования.** Этот метод изготовления многослойных печатных плат основан на выполнении межслойных соединений посредством металлизации отверстий по типу обычных двусторонних печатных плат. Структура МПП, реализуемая этим методом, показана на рис. 4.21. Для изготовления МПП используются две заготовки из двустороннего фольгированного диэлектрика. На одной стороне каждой заготовки фотохимическим способом изготавливаются схемы внутренних слоев — второго и третьего. Затем сверлятся и металлизуются отверстия межслойных переходов, со второго на

первый и с третьего на четвертый слой. При электрохимической металлизации переходных отверстий для электрического соединения с катодом ванны используется целиковая фольга будущих наружных слоев.



**Рис. 4.21.** Структура МПП попарного прессования:

1 – переходное металлизированное отверстие между наружным и внутренним слоем; 2 – сквозное металлизированное отверстие; 3 – проводник наружного слоя; 4 – проводник внутреннего слоя

Заготовки с готовыми внутренними слоями платы спрессовываются. Выдавленная при прессовании смола заполняет переходные отверстия, защищая, тем самым, их медное гальванопокрытие от химического воздействия последующих технологических операций, в том числе от травления. После прессования заготовка МПП обрабатывается так же, как двусторонняя печатная плата, – позитивным комбинированным методом с получением металлизированных отверстий и печатных проводников на наружных слоях. Нужно отметить, что наружный слой МПП попарного прессования дважды подвергается металлизации: при осаждении меди в переходные отверстия и при металлизации сквозных отверстий, соединяющих наружные слои. Поэтому толщина меди наружных слоев, считая и медную фольгу, достигает 130 – 160 мкм. Это резко снижает разрешающую способность печатного рисунка наружных слоев, так как травление меди значительной и неравномерной толщины не обеспечивает необходимого качества и плотности печатного рисунка. Кроме того, при защите печатных узлов покровными лаками создаются значительные затруднения в получении плотного защитного покрытия: лак стекает с высоких проводников, обнажая их острые кромки.

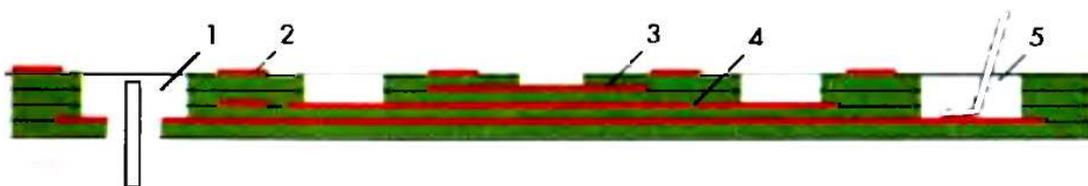
Методом попарного прессования можно изготовить МПП с числом слоев не более четырех, что не всегда позволяет получить необходимую плотность монтажа.

Преимуществами метода является относительная простота реализации, поскольку он основан на обычной технологии металлизации отверстий двусторонних печатных плат, хорошо освоенной в про-

мышленности. Однако прессование заготовок при недостаточной жесткости исходного материала может приводить к разрушению металлизации переходных отверстий, следовательно, к отказам соединений.

**Метод открытых контактных площадок и выступающих выводов.** Сущность обоих методов заключается в прессовании тонких печатных слоев с перфорированными окнами для доступа к внутренним слоям. Межслойные соединения, как таковые, в этих методах изготовления отсутствуют. Поэтому проводники, принадлежащие одной цепи, должны лежать в одном слое.

При изготовлении МПП методом открытых контактных площадок используются полученные травлением отдельные печатные слои. Соединения выводов навесных элементов с контактными площадками внутренних слоев осуществляются через перфорированные окна вышележащих слоев, как показано на рис. 4.22.



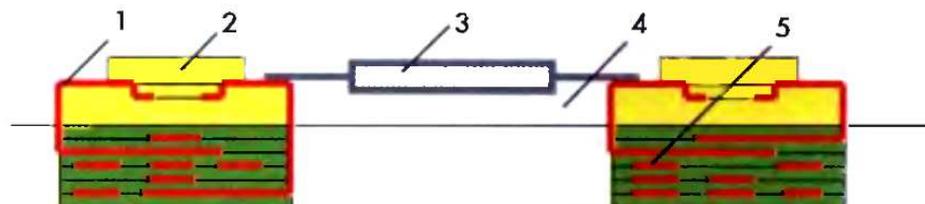
**Рис. 4.22.** Структура МПП, изготовленной методом открытых контактных площадок:

1 – окно для пайки штыревого вывода компонента; 2 – проводник внешнего слоя; 3 – проводник внутреннего слоя; 4 – соединение монтажных площадок в одном слое; 5 – окно для монтажа планарного вывода компонента

В результате этого верхний слой имеет перфорации, обеспечивающие доступ ко всем нижним слоям. Очевидно, нижний внутренний слой имеет наибольшую площадь для трассировки печатных цепей, поскольку не имеет перфораций, а верхний наружный слой имеет наименьшую площадь для трассировки и наибольшее количество перфорации. Таким образом, при использовании метода открытых контактных площадок плотность печатного рисунка внутренних слоев имеет ограничения, связанные с необходимостью перфораций для осуществления соединений. Поэтому увеличение слойности МПП, изготавливаемых методом открытых контактных площадок, более пяти становится нецелесообразным. Такие ограничения отсутствуют для метода выступающих выводов.

Фольгирование перфорированной стеклоткани внутренних слоев при изготовлении МПП методом выступающих выводов производится самим изготовителем платы, так как выступающие выводы яв-

ляются продолжением печатных проводников и выходят из внутренних слоев в перфорированные окна. После склеивания пакета внутренних слоев выступающие в окна выводы отгибают на наружную поверхность платы и формируют под крепящую колодку, как показано на рис. 4.23, либо подпаивают к контактным площадкам наружного печатного слоя. Окна в плате предназначены для размещения микросхем. Из каждого окна должны выходить концы проводников в количестве, равном числу выводов микросхем.



**Рис. 4.23.** Структура МПП, изготовленной методом выступающих выводов:

- 1 – переход печатного проводника внутреннего слоя в монтажную площадку; 2 – крепящая колодка;
- 3 – компонент с планарными выводами; 4 – окно платы;
- 5 – проводник внутреннего слоя

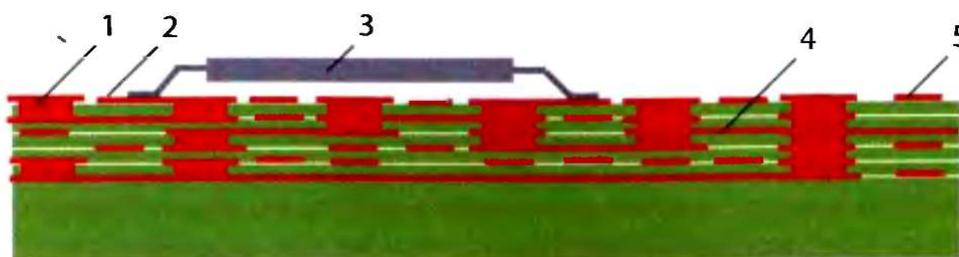
Оба этих метода отличаются простотой и сравнительно коротким технологическим циклом. Однако необходимость формовки выводов радиоэлементов на различную глубину и пайка в перфорированные окна повышают трудоемкость монтажных операций для метода открытых контактных площадок. Кроме того, при этом методе существует ограничение на число слоев (не более 5–7), так как большее их число увеличивает глубину перфорации, что делает пайку открытых контактных площадок ненадежной.

В отличие от других методов, метод выступающих выводов не имеет каких-либо ограничений по максимальному количеству слоев. Но сосредоточение печатных проводников в узких переплетах перфорированных окон создает большие перекрестные помехи и, тем самым, ограничивает трассировочные возможности печатных узлов. Наряду с этим недостатком, следует принять во внимание затруднения в формовке и закреплении выступающих выводов на поверхности платы в пределах периметра окна.

**Метод послойного наращивания.** Изготовление МПП этим методом заключается в последовательном чередовании слоя изоляции и металлизированного слоя печатного рисунка. Соединения между

проводящими элементами печатных слоев производится гальваническим наращиванием меди в отверстиях слоя изоляции. Типичная структура МПП, реализуемая этим методом, показана на рис. 4.24.

Изготовление платы начинается с приклейки к медной фольге изоляционной прокладки с перфорациями в местах будущих межслойных переходов. На всех операциях изготовления МПП методом послойного наращивания эта фольга осуществляет соединение металлируемых поверхностей с катодом гальванической ванны. На конечном этапе на ней вытравливают рисунок наружного слоя.



**Рис. 4.24.** Структура МПП послойного наращивания:  
1 – межслойный переход – металлизированный столбик;  
2 – монтажная контактная площадка; 3 – компонент с планарными выводами; 4 – проводник внутреннего слоя;  
5 – проводник внешнего слоя

После изготовления металлизированных переходов и их планаризации в плоскость с диэлектриком на поверхность межслойной изоляции полуаддитивным методом формируют печатный рисунок слоя. На изготовленный слой проводящего рисунка напрессовывают следующий слой перфорированной изоляции и через перфорации наращивают очередные металлизированные переходы. Таким образом последовательно создаются слои проводящего рисунка и изоляции с межслойными переходами.

В качестве межслойной изоляции могут быть использованы стеклотекстолитовые прокладки с перфорациями в местах межслойных переходов или полимерные пленки, отверстия в которых химически вытравливают в назначенных местах.

Количество слоев МПП при послойном наращивании ограничивают обычно пятью, так как изготовление каждого последующего слоя связано с многократными термическими (при прессовании) и химическими воздействиями на уже изготовленные слои.

Преимуществом данного метода изготовления МПП является исключительно высокая плотность монтажа, так как он дает возмож-

ность выполнения межслойных переходов в любой точке платы, независимо от трассировки и местоположения межслойных соединений смежных слоев. Таким образом, межслойные переходы могут выполняться независимо друг от друга, между любыми слоями в любой назначенной точке.

Ввиду необходимости строгой последовательности выполнения операций, процесс изготовления МПП методом послойного наращивания имеет длительный технологический цикл. Кроме того, этот процесс требует исключительной тщательности и качества изготовления, так как любой производственный дефект, допущенный на последних слоях, приводит к браку всей печатной платы. Использование этого метода для изготовления МПП создает дополнительные технологические трудности при очистке отверстий под межслойные переходы от затеков клея, последующего тщательного визуального контроля каждого отверстия на отсутствие загрязнений, сошлифовывания вручную выступающих над поверхностью заготовки столбиков меди межслойных соединений до уровня поверхности изоляции и др. Попытки в какой-то мере механизировать эти операции, как правило, не приводят к положительному эффекту. Особенности гальванических осадений в толстых слоях и длительный контакт электролитов с открытой поверхностью диэлектриков приводят к необходимости постоянной тщательной очистки электролитов и предотвращения попадания в ванну даже незначительных загрязнений, которые потом могут вызвать отказ соединений по межслойному переходу. Для обеспечения постоянных условий металлизации необходимо более часто, чем для других случаев, производить химический анализ, корректировку и очистку растворов ванн.

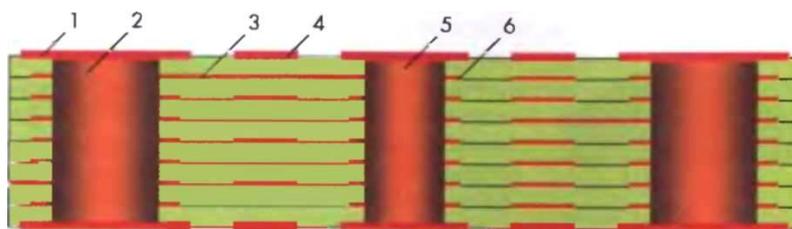
Трудности послойного наращивания в сочетании с высокой реализуемой плотностью монтажа и надежностью выделили этот метод для изготовления уникальных МПП в лабораторном производстве с высокой технологической культурой. Внедрение этого метода в серийное и даже в мелкосерийное производство затруднено.

Применение этого метода оправдано для создания аппаратуры с высокой надежностью. Например, печатные платы в аппаратуре космического транспорта и космического базирования, изготовленные этим методом, не имели ни одного отказа за все время использования с 80-х годов прошлого столетия.

**Метод металлизации сквозных отверстий.** Процесс изготовления МПП методом электрохимической металлизации сквозных от-

верстий состоит в изготовлении отдельных внутренних слоев химическим методом, прессовании слоев в монолитный пакет, сверлении сквозных отверстий и их металлизации. При сверлении на стенках отверстий вскрывают торцы контактных площадок внутренних слоев. Соединения их друг с другом и с контактными площадками наружных слоев получаются за счет металлизации отверстий.

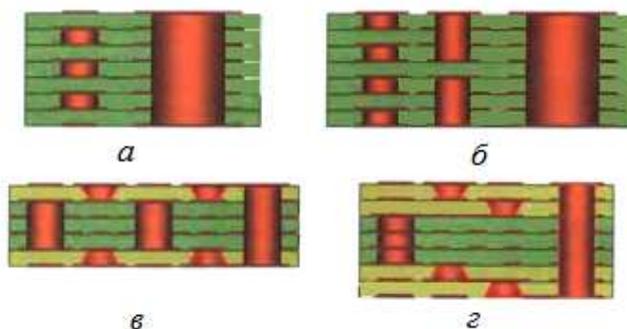
Типичная структура МПП, изготовленной методом металлизации сквозных отверстий, показана на рис. 4.25.



**Рис. 4.25.** Структура МПП, изготовленной классическим методом металлизации сквозных отверстий:

- 1 – контактная площадка внешнего слоя; 2 – сквозное монтажное металлизированное отверстие; 3 – проводник внутреннего слоя; 4 – проводник внешнего слоя; 5 – сквозное переходное металлизированное отверстие; 6 – контактная площадка внутреннего слоя

Поскольку все отверстия в плате являются сквозными, плотность межсоединений несколько ограничена, так как каждое отверстие используется для внутреннего соединения только один раз и в то же время занимает определенную площадь на каждом слое, ограничивая свободу трассировки печатных цепей. Вводя промежуточные внутренние соединения или сквозные отверстия для групп слоев, как это схематически показано на рис. 4.26, межслойные соединения можно располагать друг над другом или только между теми слоями, где они нужны, не ограничивая трассировку печатных цепей на других слоях.



**Рис. 4.26.** Многоуровневые межсоединения в МПП:

- а – двухуровневые; б – трехуровневые;  
в – трехуровневые с глухими отверстиями;  
г – четырехуровневые с глухими отверстиями

Изготовление МПП по схемам, представленным на рис. 4.27, обеспечивает наибольшую свободу в выборе месторасположения внутренних соединений и путей трассировки печатных проводников, следовательно, позволяет получить максимальную плотность межсоединений.

#### ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ

Это заготовка внутреннего слоя многослойной печатной платы, вырезанная из листа тонкого фольгированного диэлектрика. Диэлектрическое основание – стеклоэпоксидная композиция: стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой. Медная фольга имеет толщину 18 мкм – для внешних слоев, 35 мкм – для внутренних слоев, 70 мкм – для внутренних слоев земли и питания.



#### НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Нанесение фоточувствительного материала (фоторезиста) на заготовку. Как правило, это пленочный фоторезист, наслаиваемый на заготовку специальным валковым устройством – ламинатором. Поверхность заготовки очищается для обеспечения адгезии фоторезиста. Этот этап проходит в чистой комнате с неактивным (желтым) освещением. Фоторезист светочувствителен к ультрафиолетовому спектру.



#### СОВМЕЩЕНИЕ ФОТОШАБЛОНА-НЕГАТИВА

С заготовкой совмещается фотошаблон. Круг, часть которого изображен, – контактная площадка, в которой впоследствии будет сверление. Изображение на фотошаблоне негативное по отношению к будущей схеме. Под прозрачными участками фотошаблона медь не будет удалена.



#### ЭКСПОНИРОВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Участки поверхности, прозрачные на фотошаблоне, засвечиваются. Засвеченные участки фотополимеризуются и теряют способность к растворению. Фотошаблон снимается.



#### ПРОЯВЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Изображение на фоторезисте проявляется: не засвеченные участки растворяются, засвеченные фотополимеризуются и остаются на плате, потеряв способность к растворению. В результате фоторезист остается только в тех областях, где будут проходить проводники платы. Таким образом, на плате остается позитивное изображение топологии схемы. Назначение фоторезиста – избирательно защитить медь от травления.



**Рис. 4.27.** Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий

### ТРАВЛЕНИЕ РИСУНКА СХЕМЫ



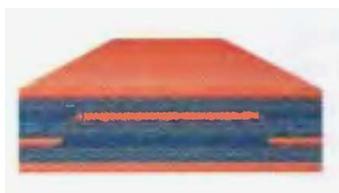
Заготовка травится для удаления меди из пробельных мест (зазоров). Фоторезист, оставшийся на поверхности, предохраняет медь от травления. Вся незащищенная медь удаляется, вскрывая диэлектрическую подложку. После травления на слое остаются печатные проводники.

### УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА



Фоторезист удаляется с поверхности проводников. Теперь заготовка представляет собой полностью готовый внутренний слой. В нашем примере она будет вторым или третьим слоями будущей платы.

### ПРЕССОВАНИЕ СЛОЕВ В МНОГОСЛОЙНУЮ СТРУКТУРУ



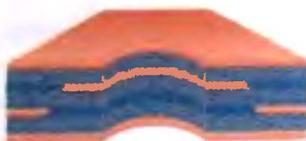
На этом этапе слои многослойной платы совмещаются по базам и прокладываются склеивающими листами (pre-preg). Склеивающие листы – стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой в полуотвержденном состоянии. Пакет слоев укладывается в пресс, где подвергается воздействию высокой температуры и давления. Смола склеивающих прокладок плавится и отверждается, происходит склеивание слоев МПП в монолит.

### СВЕРЛЕНИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ



В плате высверливаются отверстия на специализированных станках с ЧПУ. Совмещение просверленных отверстий с контактными площадками рисунка слоев существенно. Оно обеспечивается точностью позиционирования на всех этапах изготовления МПП. При сверлении в зоне резания развиваются высокие температуры (до 350°C), смола плавится и загрязняет торцы контактных площадок внутренних слоев (нанос смолы).

### ОЧИСТКА ОТВЕРСТИЙ ОТ НАНОСА СМОЛЫ



Отверстия платы очищаются от наноса смолы на медные торцы контактных площадок внутренних слоев. Без этой очистки соединение металлизации отверстия

с внутренними слоями будет ненадежным. Варианты способов очистки: травление в серной кислоте, в растворе перманганата, плазмохимическая очистка, гидроабразивная обработка.

*Продолжение рис. 4.27.* Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий

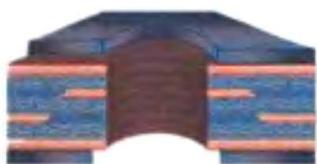
## ХИМИЧЕСКОЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОГО СЛОЯ МЕДИ

Этот этап нужен для придания проводимости стенкам отверстий, необходимой для последующей гальванической металлизации. Рыхлый слой химически осажденной меди быстро разрушается, поэтому его усиливают тонким слоем гальванической меди. Для химической металлизации появилась альтернатива – прямая металлизация, при которой стенки отверстий покрываются очень тонким слоем палладия. Тогда химическая и предварительная гальваническая металлоизоляция не требуются.



### НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Плата покрывается фоторезистом. Фоторезист засвечивается через фотошаблон-позитив, засвеченные участки удаляются. Этот процесс позитивный, то есть фоторезист удаляется с участков, где будут проводники и отверстия, на стенки которых будет наноситься медь. Поэтому изображение на фотошаблоне – позитивное. Остающийся на плате рельеф фоторезиста – негатив.



### ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ (ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ) ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ

Медь наносится на поверхность стенок отверстий до толщины 25 мкм. Только при такой толщине металлизация обеспечивает необходимую прочность при термодинамических нагрузках, свойственных последующим пайкам. При металлизации отверстий неизбежно металлизуются поверхности проводников внешних слоев.



### ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЗИСТА

Металлорезист служит защитой проводников и металлизированных отверстий от травления. Он защищает медь от окисления. Также он необходим для длительного сохранения способности платы к пайке, если он остается как финишное покрытие. Если в качестве металлорезиста используется гальванический сплав олова-свинца, он может быть оплавлен для получения металлургического сплава, длительно сохраняющего способность к пайке.



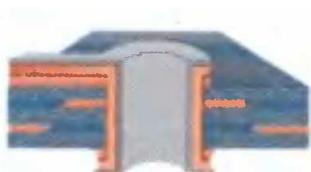
*Продолжение рис. 4.27.* Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий

## УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА



Фоторезист удаляется, оставляя металлорезист на проводниках и в отверстиях, и обнажает медь в пробельных местах (зазорах). Медь, покрытая металлорезистом, останется не вытравленной и формирует топологию внешних слоев платы (МПП).

## ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ НА ВНЕШНИХ СЛОЯХ



На этом этапе металлорезист защищает медь от травления. Незащищенная медь растворяется в травящем растворе, оставляя на плате рисунок будущей схемы. Если в качестве металлорезиста используется олово-свинец и на плату в последующем наносится паяльная маска, его приходится удалять (стравливать). Иначе он расплавится под маской при групповом нагреве в процессах пайки и создаст под маской опасные пазухи. Если паяльная маска в дальнейшем не предусматривается, на этом этапе плата – законченный продукт производства. Тогда гальванический сплав олово-свинец или осветляют и/или оплавливают, поскольку травящие растворы окисляют его поверхность.

## УДАЛЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЗИСТА ОЛОВО-СВИНЕЦ



Если конструкцией предусматривается нанесение паяльной маски и в качестве металлорезиста используется олово-свинец, припой удаляется с поверхности меди в соответствующих травителях.

## НАНЕСЕНИЕ ПАЯЛЬНОЙ МАСКИ



Для защиты поверхности платы наносится паяльная маска – электроизоляционное нагревостойкое покрытие. Существует несколько типов масок и методов ее нанесения. Фоточувствительные композиции могут быть жидкими и пленочными. Тогда маска наносится и обрабатывается методами фотолитографии, то есть теми же способами, что и фоторезист. Этот процесс обеспечивает высокую точность совмещения. Способ трафаретной печати не обладает такой точностью, но этот процесс более производителен в массовом производстве.

*Продолжение рис. 4.27.* Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий

## ОБЛУЖИВАНИЕ МОНТАЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ – HAL-процесс (Hot Air Leveling - выравнивание горячим воздухом)



Открытые маской участки меди (монтажные отверстия, контактные площадки) облуживаются горячим припоем методом погружения. Чтобы не оставлять на плате натеков припоя и освободить отверстия от припоя, плата при изъятии из ванны облуживания обдувается горячими воздушными ножами. Кроме сдувания излишков воздушные ножи выравнивают припой на поверхностях контактных площадок и монтажных отверстий. Теперь плата готова для заключительных этапов: нанесения надписей (трафаретная печать или фотолитография), обрезки по контуру, тестирования и упаковки.

*Продолжение рис. 4.27.* Последовательность изготовления МПП классическим методом металлизации сквозных отверстий

Метод металлизации сквозных отверстий – по-существу единственный метод создания конструкций с наиболее оптимальной электрической структурой, обеспечивающей надежную передачу наносекундных импульсов и распределение питания между активными элементами. Такие конструкции МПП позволяют выполнить печатные цепи как полосковые линии передач и создают эффективное экранирование одной группы цепей от другой. Цепи сигнальных слоев имеют ортогональное расположение печатных проводников, то есть преимущественное направление вдоль одной из осей координат:  $X$  или  $Y$ . Слои питания представляют собой целиковую фольгу или металлическую сетку с освобождениями в местах сквозных металлизированных отверстий. В точках соединения металлизированного отверстия с цепью внутреннего слоя выполняют контактную площадку. Слои питания одновременно выполняют роль электрических экранов.

Таким образом, наряду с высокой технологичностью МПП, изготовленные методом металлизации сквозных отверстий, имеют высокую плотность монтажа, большое количество вариантов трассировки печатных цепей, более короткие линии связей, возможность электрического экранирования, улучшение характеристик, связанное с устойчивостью к воздействию окружающей среды за счет расположения всех печатных проводников в массе монолитного диэлектрика, возможность увеличения числа слоев без существенного увеличения стоимости и длительности процесса.

Недостатком метода является относительно механически слабая связь металлизации отверстий с торцами контактных площадок внутренних слоев. Изготовление МПП этим методом осложнено проблемой точного совмещения печатных слоев из-за погрешностей фотошаблонов и деформаций базовых материалов в процессе изготовления внутренних слоев и прессования. Особой тщательности требует подбор режимов прессования для обеспечения прочной адгезии пакета слоев, устойчивой к воздействию групповой пайки. И, наконец, в процессе использования МПП возникают трудности при внесении изменений в трассировку при ремонте плат.

Необходимость в дальнейшей миниатюризации электронной аппаратуры (мобильные телефоны, цифровые фотоаппараты и видеокамеры, портативные охранные системы и т.п.) привела к созданию конструкций печатных плат с высокой плотностью межсоединений, что в международной документации называют HDI -High Density Interconnections. Схема этого метода представляет собой последовательность, состоящую из изготовления МПП, напрессовывания на нее последовательности слоев с микропереходами. Структуру таких плат обозначают количеством слоев МПП, изготавливаемых по классической технологии, и количеством послойно наращиваемых слоев с межслойными переходами. Например, структура «2 + 4 + 2» означает, что в качестве основы используется 4-слойная МПП, и на нее с двух сторон наращиваются по два слоя с микропереходами.

**Формирование многослойной структуры МПП** осуществляется по пакетной, подложечной либо пакетно-подложечной технологии. **Пакетная технология** реализуется путем набора (сборки) в пакет единичных заготовок с коммутирующими элементами (изготовленными аналогично ОПП и (или) ДПП) с последующим их спрессовыванием (групповым или попарным), либо склеиванием, либо вакуумной пропайкой в монолитную конструкцию (так называемым замоноличиванием пакета). Особенности пакетных МПП являются хорошая освоенность технологий прессования пакета и возможность получения наибольшего числа слоев коммутации по сравнению с другими группами вариантов МПП. Максимальное количество слоев коммутации в пакетных МПП ограничивается погрешностью совмещения между слоями, которая возрастает с увеличением числа слоев.

**Подложечная технология** (или технология *послойного наращивания*) получила свое название в связи с использованием только од-

ной основы (то есть подложки) для изготовления МПП путем поочередного создания коммутирующих и диэлектрических слоев преимущественно с применением тонко- или толстопленочной технологии. В этом случае формирование многослойной структуры и межслойной коммутации осуществляется одновременно с помощью фотопечати либо трафаретной печати или других методов, то есть происходит постепенное замоноличивание структуры коммутации на одной подложке при ее послойном наращивании. Характерными особенностями подложечных МПП являются потребность (для большинства вариантов) в планаризации (выравнивании) рельефа поверхности после формирования каждого слоя коммутации; высокая плотность коммутации; возможность использования при сборке и монтаже ячеек на таких МПП только поверхностно-монтируемых компонентов. Максимальное количество слоев коммутации в подложечных МПП ограничивается рельефностью элементов коммутации и величиной остаточных внутренних напряжений, возникающих при формировании структуры МПП.

**Пакетно-подложечная технология** создания монолитной структуры сочетает достоинства и недостатки этих двух технологий и расширяет их возможности с точки зрения увеличения количества слоев коммутации, уменьшения погрешности совмещения слоев и повышения плотности коммутации. Однако конструкторско-технологические варианты МПП этой группы реализованы только в лабораторных условиях и преимущественно на керамических основаниях (подложках).

При использовании тонкопленочной технологии диэлектрические и токопроводящие слои наносят с помощью одного из способов вакуумного напыления, характеризующихся разнообразием применяемых материалов и возможностью создания многослойных структур в одном технологическом цикле. Недостатками тонкопленочной технологии являются низкая производительность, сложность технологического оборудования, необходимость вакуума.

При использовании толстопленочной технологии с помощью трафаретной печати создают изоляционные и проводящие слои, которые затем вжигают в керамическое основание. Так как керамика в неотожженном состоянии допускает механическую обработку для получения переходных отверстий, то появляется возможность послойным наращиванием формировать многослойные структуры с двух сторон подложки с межслойной коммутацией. Подложечная техноло-

гия обеспечивает высокую надежность коммутации и производительность процесса без применения дорогостоящего оборудования. Однако при изготовлении многослойных проводящих структур требуются материалы со ступенчатыми температурами вжигания.

Технологический процесс изготовления МПП на полиимидных пленках начинается чаще всего с изготовления ДПП. С помощью двухстороннего селективного травления за один цикл формируются переходные отверстия диаметром 30 – 70 мкм на пленке толщиной 25 – 50 мкм. При травлении образуется конусообразная форма отверстий, удобная для последующей вакуумной металлизации (например, магнетронным напылением структуры *Cr-Cu-Cr* толщиной 1 – 2 мкм). После избирательного усиления металлизации слоем гальванической меди и технологическим покрытием (*Sn-Ni*, *Sn-Bi* или *Sn-Pb*), а также селективного стравливания металлизации с нерабочих участков, заготовки (ДПП) поступают на сборку пакета. Многослойная монокристаллическая структура получается вакуумной пропайкой пакета (из ДПП, чередуемых с перфорированными прокладками), что обеспечивает надежную межслойную коммутацию. Далее следует приклеивание замоноличенного пакета через фигурные изоляционные прокладки из полиимида к жесткому основанию, на котором предварительно сформированы контактные площадки. В качестве основания, придающего жесткость и обеспечивающего необходимый теплоотвод полиимидной МПП, используются металлические пластины с изолирующим слоем (анодированный алюминий, эмалированная сталь и др.). Таким образом можно формировать МПП с 15 – 20 и более слоями коммутации.

На заготовках для внутренних слоев МПП рисунок коммутации получают чаще всего с двух сторон по субтрактивной технологии либо по комбинированной позитивной технологии, если в заготовках нужны металлизированные отверстия. Далее заготовки после специальной их обработки, обеспечивающей требуемую прочность сцепления, совмещают друг с другом по базовым отверстиям, чередуя с прокладками, и спрессовывают в монокристаллическую структуру. После этого в замоноличенном пакете изготавливают сквозные отверстия. Далее с использованием комбинированной позитивной технологии формируют коммутирующие элементы наружных слоев с металлизацией сквозных отверстий в замоноличенном пакете. Отличительной особенностью следующих после прессования операций является более сложная подготовка сквозных отверстий к металлизации. Метод

гидроабразивной обработки отверстий не гарантирует полного обнаружения медных торцевых поверхностей контактных площадок внутренних слоев коммутации, особенно из тонкой фольги. Для увеличения сцепления химико-гальванической металлизации с внутренними контактными площадками проводят химическое травление диэлектрика на величину не более половины толщины фольги в серной и плавиковой кислотах. В производстве применяют комплексную подготовку отверстий, подлежащих металлизации, которая включает гидроабразивную очистку, подтравливание диэлектрика и ультразвуковую промывку для удаления продуктов химических реакций и остатков кислот. Такую подготовку проводят на автоматизированной автооператорной линии, обеспечивающей высокое качество и безопасные условия труда. Контроль качества подтравливания производится с помощью микроскопа. Однако использование для травления стенок отверстий (перед их металлизацией) горячих концентрированных кислот требует некоторого их запаса, постоянного контроля, многочисленных промывок заготовок, нейтрализации растворов и т.д., что способствует освоению сухих способов травления, в частности, плазмохимического травления (ПХТ). Низкотемпературная плазма из смеси газов, например, кислорода и фреона при температуре 50 – 70<sup>0</sup>С превращает эпоксидную смолу в летучее вещество, легко удаляемое из отверстий, что не требует промывок и сушек заготовок. Кроме того, процесс ПХТ полностью автоматизируем, не требует запаса агрессивных реактивов, реализуется в чистых условиях (в вакуумной камере), а реактивная природа плазмы проявляется только после ее генерации, но при снятии напряжения возбуждающего плазму, технологическая среда превращается в смесь нейтральных газов. Технология ПХТ продолжает совершенствоваться в направлениях замены фреона, разработки универсальной оснастки оборудования ПХТ для селективного травления стенок отверстий разной формы.

Заготовки с внутренними слоями коммутации, выполненной на тонком односторонне фольгированном диэлектрике, после стравливания меди с нерабочих участков склонны к линейной деформации. Поэтому базовые отверстия на технологическом поле заготовок пробивают после операции травления меди, ориентируясь на специальные реперные знаки.

**Процесс прессования** является одним из важнейших в производстве МПП, так как от качества его выполнения зависят электрические и механические характеристики готовых МПП. На качество прессо-

вания существенно влияют подготовка поверхностей прессуемых заготовок перед прессованием, текучесть смолы и время ее полимеризации, а также прочность сцепления медной фольги с диэлектрическим основанием. Монолитность структуры и точность совмещения ее элементов обеспечиваются качеством прокладочной стеклоткани, тщательностью подготовки слоев, совершенством технологической оснастки (например, параллельностью плит пресса) и строгим поддержанием режимов прессования (например, удельного давления, температуры и времени прессования). Прокладочная стеклоткань, которая поступает на сборку пакетов МПП, должна содержать 45 – 52% терморезактивной эпоксидной смолы (с отвердителем), находящейся в состоянии не полной полимеризации. При поступлении нового материала проводятся опытные запрессовки на технологических платах и контроль их качества при термических испытаниях (с нагревом до 120<sup>0</sup>С и выдерживанием в течение 1 ч.; затем следует термоудар при температуре 260<sup>0</sup>С в течение 10 с).

Прессование МПП проводят в специальной пресс-форме (с плоскопараллельными плитами), обеспечивающий точное совмещение и фиксацию слоев с помощью направляющих штырей, расположенных по углам, и через каждые 100 – 150 мм по периметру плиты. Для равномерного прогрева прессуемого пакета и выравнивания его по толщине с двух сторон пресс-формы закладываются выравнивающие подушки (рис. 4.28).



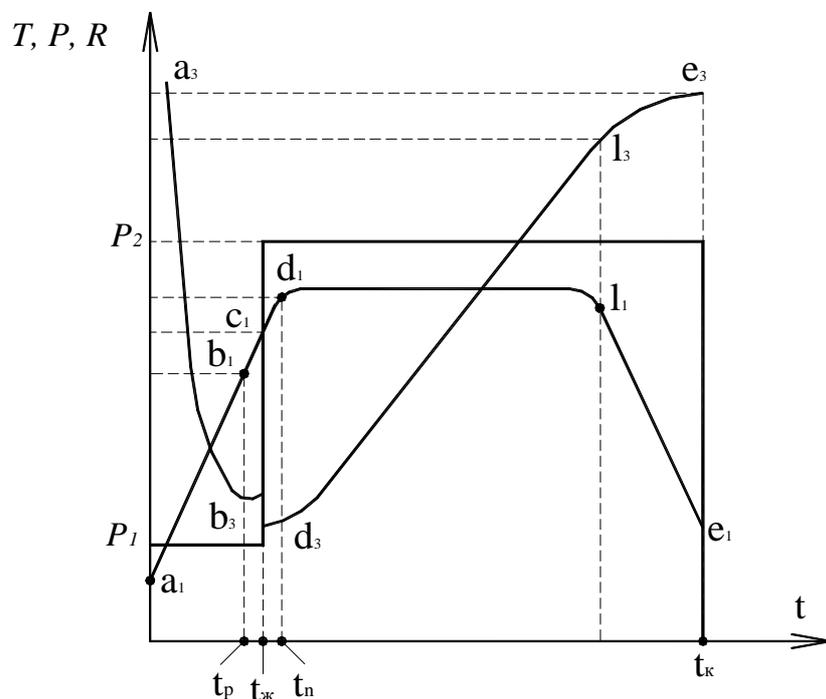
**Рис. 4.28.** Порядок укладки пакетов препрега с фольгой и прокладочных листов между плитами пресса:

- 1 – верхний прокладочный стальной лист,
- 2 – прокладочный материал, 3 – слои пропитанной связующим стеклоткани с фольгой, 4 – прокладочные листы,
- 5 – прокладочный материал, 6 – нижний прокладочный стальной лист, 7 – шток (поршень)

Процесс прессования заключается в одновременном воздействии на материал высокого давления и температуры. Температурный режим прессования платы (кривая 1 на рис. 4.29) предусматривает нагрев пакета до температуры  $150 - 180^{\circ}\text{C}$ , удаление летучих компонентов смолы по мере ее расплавления и смачивания слоев пакета (участок  $a_1-b_1$ ), переход смолы в состояние желатинизации ( $b_1-d_1$ ), полимеризацию и затвердевание смолы (участок  $d_1-l_1$ ), охлаждение пакета до  $30 - 40^{\circ}\text{C}$  (участок  $l_1-e_1$ ). С температурой тесно взаимосвязано давление. При нагреве пакета для обеспечения теплопередачи необходимо предварительное его сжатие и плотное прилегание прессформы к плитам пресса. Для этого устанавливают первоначальное давление  $P_1$  ( $100 - 300$  кПа), которое также препятствует удалению летучих компонентов смолы из прокладочной стеклоткани. Высокое давление  $P_2$  прессования должно быть создано до начала затвердевания смолы в момент желатинизации (точка  $c_1$  на участке  $d_1-b_1$  (см. рис. 4.28.)), когда смола перестает течь и вязкость ее возрастает. Приложение высокого давления ( $1 - 4$  МПа) до момента желатинизации (точка  $t_p$  на рис. 4.29) приводит к выдавливанию большого количества жидкой смолы и ухудшению сцепления слоев. Приложение давления после момента желатинизации (точка  $t_n$  на рис. 4.29) вызывает дробление смолы, перешедшей в твердое состояние, и образование пустот, также ухудшающих связь между слоями. Для объективного контроля момента желатинизации измеряют объемное сопротивление изоляции склеивающих прокладок. Анализ показывает, что под воздействием температуры, по мере разжижения связующего вещества, объемное сопротивление резко падает (кривая 3 на рис. 4.29), достигая минимального значения в момент начала желатинизации, а затем по мере отверждения связующего вещества увеличивается.

Регистрация объемного сопротивления проводится датчиками, которые изготавливаются на технологических полях заготовок (селективным травлением фольги). При сборке пакета заготовки располагают таким образом, чтобы электроды датчиков были обращены друг к другу, а между ними помещалась склеивающая прокладка. Использование датчиков контроля объемного сопротивления изоляции склеивающих прокладок создает возможности для автоматизации процесса прессования. Определение требуемого давления  $P$  производится по специально разрабатываемым номограммам в зависимости от содержания смолы и других исходных характеристик прокладоч-

ной стеклоткани. Время прессования при повышенном давлении  $P_2$  обычно устанавливают в интервале 10 – 12 мин на 1 мм толщины пакета, но не менее 40 мин.



**Рис. 4.29.** Характер временного изменения температуры (1), давления (2) и объемного электрического сопротивления смолы (3) при прессовании МПП

Для прессования пакета применяют специализированные многоярусные гидравлические прессы, оборудованные системами нагрева и охлаждения плит, устройствами для регулирования и поддержания технологических режимов. Прессы обеспечивают плоскостность и параллельность плит в пределах 0,1 мм время нагрева плит до рабочей температуры 20 мин, точность поддержания на их плоскости температуры  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  и давления  $\pm 3\%$ .

Для повышения производительности прессования в настоящее время выпускаются автоматические линии. При автоматическом прессовании по заданной программе пресс-формы с обрабатываемыми пакетами перемещаются из позиции загрузки в нагретые плиты гидравлического прессы с помощью пневматического автооператора. Плиты сжимают пакеты в пресс-формах при низком давлении в течение заданного времени и затем автоматически переключаются на высокое давление. В позицию загрузки автоматически устанавливается

следующая партия пресс-форм. После выдержки заданного времени полимеризации связующей смолы в пакетах, горячие и холодные плиты размыкаются и автооператор перемещает прошедшие стадию полимеризации пакеты из горячих плит пресса в холодные для их остывания при заданном давлении. Одновременно на позицию прессования подается следующая пресс-форма из позиции загрузки и цикл повторяется.

Широкое использование систем автоматизированного проектирования, разработка и освоение новых технологий и оборудования для производства МПП, накопленный опыт по механизации и автоматизации отдельных технологических операций позволяют перейти к созданию компьютерно-интегрированных производств на базе гибких автоматизированных систем (ГПС), способных автоматически, без участия человека, определять и поддерживать оптимальный режим изготовления ПП и МПП.

#### **4.7. Контроль и испытания печатных плат**

**Испытания и приемочный контроль** завершают процесс изготовления МПП (и ПП) и позволяют в условиях климатических, электрических и других воздействий оценить соответствие плат техническим требованиям, предъявляемым к аппаратуре, и установить скрытые дефекты. В условиях производства осуществляют обычно приемосдаточные, периодические и типовые испытания плат.

**Приемосдаточные испытания** проводятся партиями не более 1000 – 1200 шт., изготовленными по одной конструкторской и технологической документации, и включают стопроцентный контроль габаритных и установочных размеров, внешнего вида диэлектрического основания и проводящего рисунка на соответствие конструкторской документации, величины изгиба и скручивания, правильности разводки коммутации по отсутствию обрывов и коротких замыканий; выборочную проверку (3% от партии, но не менее 3 шт.) сопротивления изоляции в нормальных климатических условиях при ручном контроле и стопроцентную проверку при автоматизированном; выборочный контроль (1 – 2 платы от ежедневной выработки) толщины металлизации в отверстиях; выборочную проверку (3% от партии, но не менее 3 шт.) паяемости контактных площадок и металлизированных отверстий, а также их устойчивости к перепайкам.

**Периодические испытания** ПП и МПП проводятся с целью подтверждения их эксплуатационных характеристик, правильности выполнения технологического процесса и соответствия конструкторской документации не реже одного раза в шесть месяцев. Для контроля случайным образом выбираются платы, прошедшие приемосдаточные испытания в количестве 5 плат при опытном мелкосерийном производстве и 10 плат при серийном производстве. В объем испытаний входят многократные изгибы ГПП и ГПК (ГПП должны выдерживать 5-кратный цикл изгибов радиусом  $10 \pm 0,5$  мм, а ГПК 150-кратный цикл изгибов радиусом  $3 \pm 0,5$  мм на  $90^\circ$  в обе стороны от исходного положения); перепайки в (5 – 10) отверстиях и на (5 – 10) контактных площадках; проверка паяемости (на 1 – 2 платах); проверка омического сопротивления металлизированных отверстий (3 шт.) и их устойчивости к кратковременной токовой перегрузке; проверка в нормальных климатических условиях целостности электрических цепей и сопротивления изоляции (не менее чем на 5 парах проводников, в том числе цепей питания); контроль внешнего вида, целостности межслойных соединений и сопротивления изоляции после воздействия климатических факторов, устанавливаемых в зависимости от группы жесткости испытаний по соответствующему стандарту.

**Типовые испытания** проводятся для определения эффективности внесенных изменений в конструкцию и технологию ПП и МПП. Программы испытаний составляются предприятием, изготавливающим платы, и согласовываются с их разработчиком.

#### **4.8. Тест для проверки знаний**

1. Указать технологические операции этапа механической обработки печатных плат:

- а) входной контроль материала;
- б) сенсibilизация;
- в) сверление монтажных отверстий;
- г) нанесение жидкого фоторезиста;
- д) получение чистового контура заготовки.

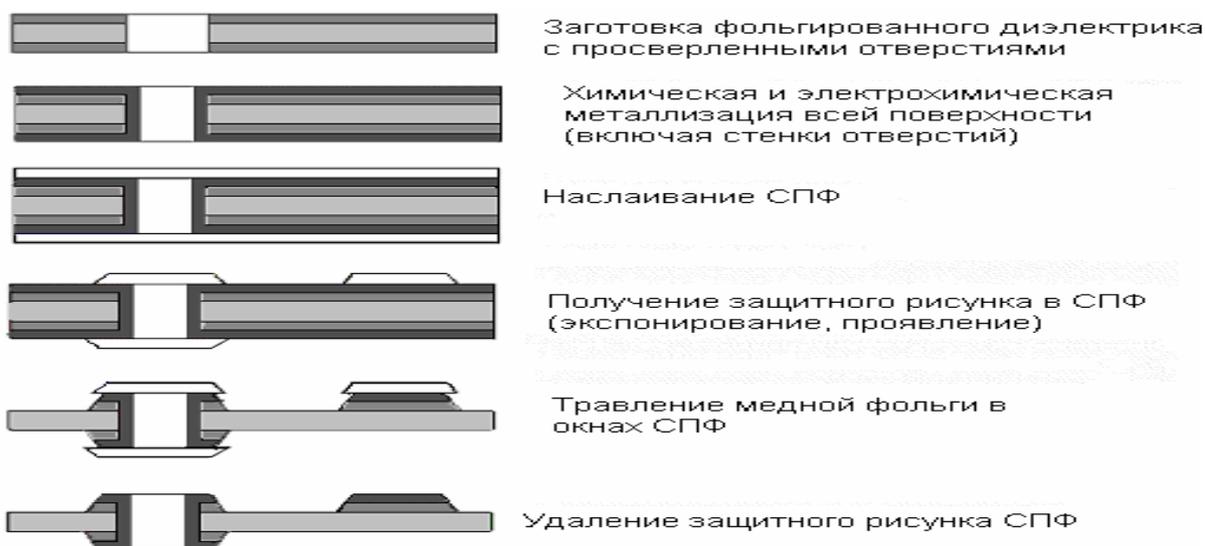
2. Получение рисунка печатных проводников на поверхности медной фольги путем продавливания защитной краски через сетчатый трафарет лежит в основе следующего метода:

- а) фотопечати;
- б) трафаретной печати;
- в) офсетной печати.

3. Контактное копирование рисунка печатного монтажа с фотошаблона на основание, покрытое светочувствительным слоем, лежит в основе следующего метода:

- а) фотопечати;
- б) трафаретной печати;
- в) офсетной печати.

4. Для какого метода изготовления печатных плат в заготовке фольгированного диэлектрика сверлятся отверстия и после химической металлизации стенок отверстий производят электролитическое доращивание меди в отверстиях и на поверхности фольги до требуемой толщины:



- а) полуаддитивный;
- б) аддитивный метод;
- в) тентинг-процесс.

5. Для какого метода изготовления печатных плат характерна следующая последовательность технологических операций:



- а) субтрактивного;
- б) аддитивного;
- в) комбинированного.

6. Для какой технологии в качестве базового материала используются фольгированные медью листы диэлектрика:

- а) аддитивной;
- б) субтрактивной;
- в) комбинированной.

7. Для какой технологии в качестве базового материала используются нефольгированные материалы основания:

- а) аддитивной;
- б) субтрактивной;
- в) комбинированной.

8. Какой процесс изготовления печатных плат предусматривает предварительное нанесение вспомогательного проводящего покрытия, впоследствии удаляемого с пробельных мест:

- а) аддитивный;
- б) субтрактивный;
- в) полуаддитивный.

9. Какой процесс изготовления печатных плат заключается в избирательном удалении участков проводящей фольги путем травления:

- а) аддитивный;
- б) субтрактивный;
- в) полуаддитивный.

10. Какой процесс изготовления печатных плат заключается в избирательном осаждении проводящего материала на нефольгированный материал основания:

- а) аддитивный;
- б) субтрактивный;
- в) полуаддитивный.

11. Одной из важнейших операций при изготовлении многослойной печатной платы, обеспечивающей соединение отдельных слоев платы является:

- а) прессование;
- б) получение рисунка печатных проводников;
- в) образование базовых отверстий.

12. В какой момент в процессе прессования необходимо приложить максимальное давление:

- а) когда смола находится в жидком состоянии;
- б) когда смола переходит в состояние геля;
- в) когда смола из состояния геля перейдет в твердое состояние.

13. Как совмещают изготовленные слои при изготовлении многослойных печатных плат:

- а) по переходным отверстиям;
- б) по базовым отверстиям;
- в) совмещением рисунка.

14. Какие дефекты при изготовлении печатных плат можно устранить:

- а) незначительное расслоение платы по углам;
- б) выход отверстий за пределы контактных площадок;
- в) вздутие;

- г) отслоение элементов печатного монтажа;
- д) коробление плат.

15. К какому типу характеристик двухслойных печатных плат относятся размер рабочего поля платы, толщина платы, шаг и размер сквозных переходных отверстий, размеры проводников и зазоров, толщина проводников:

- а) монтажные;
- б) конструкционные;
- в) трассировочные.

16. К какому типу характеристик односторонних печатных плат относятся количество сигнальных проводников, плотность проводников, топология посадочных мест микросхем:

- а) монтажные;
- б) конструкционные;
- в) трассировочные.

17. К какому типу характеристик многослойных печатных плат относятся количество монтируемых микросхем, площадь посадочного места микросхем, шаг контактных площадок для присоединения выводов микросхем, вид монтажа выводов компонентов:

- а) монтажные;
- б) конструкционные;
- в) трассировочные.

## 5. МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 5.1. Методы выполнения электрических соединений

По результатам экспериментальных исследований 50 – 80 % всех отказов в аппаратуре происходит из-за некачественных электрических соединений. Качественные характеристики соединений определяются многими факторами, но во всех случаях должно быть обеспечено следующее:

- 1) высокая надежность и долговечность;
- 2) минимальное омическое сопротивление в зоне контакта и его стабильность при различных климатических воздействиях;
- 3) максимально достижимая механическая прочность;
- 4) минимальное значение основных параметров процесса контактирования (температуры, давления, длительности выдержки);
- 5) возможность соединения разнообразных сочетаний материалов и типоразмеров;
- 6) стойкость к термоциклированию;
- 7) в зоне контактирования не должно образовываться материалов, вызывающих деградацию соединения;
- 8) качество соединения должно контролироваться простыми и надежными средствами;
- 9) экономическая эффективность и производительность процесса.

Основные методы выполнения электрических соединений, которые применяются в производстве ЭА, приведены на рис. 5.1.

**Пайкой** называется процесс соединения металлов в твердом состоянии путем введения в зазор расплавленного припоя, взаимодействующего с основным металлом и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва.

Паяные электрические соединения очень широко применяют при монтаже электронной аппаратуры из-за низкого и стабильного электрического сопротивления, универсальности, простоты автоматизации, контроля и ремонта. Однако этому методу присущи и существенные недостатки: высокая стоимость используемых цветных ме-

таллов и флюсов, длительное воздействие высоких температур, коррозионная активность остатков флюсов, выделение вредных веществ.

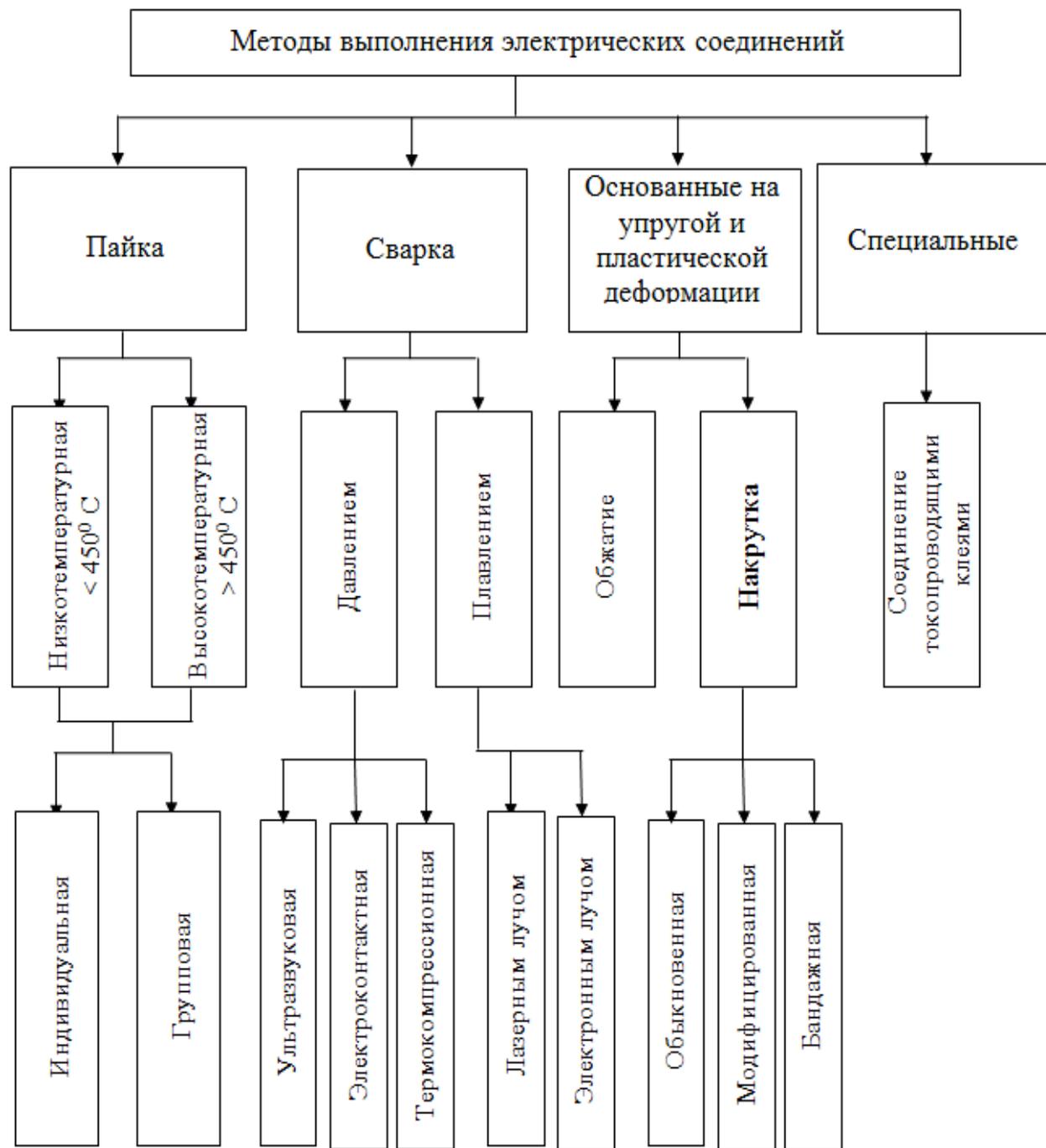


Рис. 5.1. Основные методы выполнения электрических соединений

**Сварка** – это процесс получения неразъемного соединения материалов под действием активирующей энергии теплового поля, деформации, ультразвуковых колебаний или их сочетаний. По сравнению с пайкой она характеризуется следующими преимуществами: более высокой механической прочностью получаемых соединений,

отсутствием присадочного материала, незначительной дозированной тепловой нагрузкой ЭРЭ, возможностью уменьшения расстояний между контактами. К недостаткам метода следует отнести критичность при выборе сочетаний материалов, увеличение переходного сопротивления из-за образования интерметаллидов, невозможность группового контактирования соединения, сложность ремонта.

**Соединения, основанные на деформации контактируемых деталей**, проводов или выводов, выполняются в холодном состоянии. Под действием значительных механических усилий, приложенных к этим элементам, происходит разрушение оксидных пленок и образование надежного вакуум-плотного соединения. Оно характеризуется высокой механической прочностью, низкой стоимостью, легко поддается механизации, не создает помех в цепях низкого напряжения.

**Соединение токопроводящими клеями и пастами** в отличие от пайки и сварки не вызывает изменения структуры соединяемых материалов, так как проводится при низких температурах, упрощает конструкцию соединений и применяется в тех случаях, когда другие способы невозможны: в труднодоступных местах, при ремонтных работах и т. д. Однако широкого распространения в серийном производстве метод не получил из-за невысокой проводимости, низкой термостойкости и надежности соединений.

Сравнительная характеристика параметров электрических соединений приведена в табл. 5.1, где  $P$  – механическая прочность,  $\lambda$  – интенсивность отказов,  $R_T$  – тепловое сопротивление контакта.

Таблица 5.1

*Сравнительная характеристика параметров электрических соединений*

Вид соединения	$R_{\text{перех}} * 10^{-3}$ , Ом	$P$ , МПа	$\lambda * 10^{-9}$ , Ом	$R_T$ , град/Вт
Сварка	0,01 – 1	100 – 500	0,1 – 2,0	0,001
Накрутка	1 – 2	60 – 80	0,2 – 0,5	0,0005
Пайка	2 – 3	10 – 40	1 – 10	0,002
Обжимка	1 – 10	20 – 50	2 – 5	0,0008 – 0,001
Соединение токопроводящими клеями	1 – 10 Ом*м	5 – 10	10 – 50	5

Выбор метода получения электрических соединений определяется конструкцией контактного узла, материалом деталей, требованиями к качеству, а также условиями экономичности и производительности.

## 5.2. Методы монтажной пайки

Монтажная (электромонтажная) пайка представляет собой процесс механического и электрического соединения металлических деталей с нагревом ниже температуры их расплавления путем смачивания и заполнения зазора между ними расплавленным припоем и сцепления за счет отверждения паяного шва.

Технологические процессы образования межсоединений так или иначе стимулируются нагревом (примерно выше 100 °С). Они протекают при плавлении или диффузии в твердой фазе и могут сопровождаться химическими реакциями. Монтажные соединения образуются в процессах пайки и сварки.

По способу воздействия на объект производства технологические процессы образования монтажных соединений разделяют на изотропные и локальные.

Изотропные – процессы с температурным воздействием на все изделие или поверхность. Локальные – процессы с избирательным воздействием на ограниченной площади (в «точке»).

К изотропным относят процессы, выполняемые в однородной среде, например, в печах с заданной газовой средой, в ваннах для пайки.

К локальным – точечную сварку и пайку, лазерную обработку.

В процессе пайки развиваются реакции на границах жидкого, а потом и затвердевшего припоя и поверхностей спаиваемых деталей. Течение твердофазных реакций определяется двумя механизмами: диффузией и процессами на границе фаз: жидкой (расплавленный припой) и твердой (соединяемые детали).

Различают *селективный* нагрев монтажных точек и *групповой*.

При *селективной* пайке нагрев ведется от точки к точке, так что все монтажное изделие и монтируемые элементы при этом остаются холодными. К селективной пайке относятся пайки нагретым инструментом: паяльником, нагретым электродом, инфракрасным, световым или лазерным лучами.

Процесс пайки состоит из флюсования места пайки, нагрева до расплавления и смачивания его припоем, фиксации вывода элемента относительно контактной площадки и остывании в фиксированном состоянии. Только ручной паяльник совмещает в себе одним эти функции. Но паяльник – ручной инструмент, управляемый челове-

ком, поэтому процесс пайки паяльником с трудом поддается управлению. В связи с этим характеристика паек, выполненных вручную, по всем стандартам оценивается на два-три порядка хуже максимально достижимой. Остальные виды селективной пайки поддаются разделению операций: нанесение флюса, припоя, придавливание для соприкосновения соединяемых поверхностей, нагрев соединяемых элементов до полного смачивания, остывание.

Флюсование, как правило, ведут любым групповым или селективным (с помощью дозатора) способом.

Если для качественной пайки необходимо дозированное нанесение припоя, его осуществляют либо «жирным» лужением соединяемых поверхностей, либо селективным нанесением паст припоя. Пасту припоя – вязкую смесь флюса с тонко диспергированным припоем – наносят на монтажные элементы печатных плат либо методом трафаретной печати, либо селективно манипулятором с дозатором – диспенсером. Точное дозирование нанесения пасты необходимо для образования галтели припоя правильной формы, соответствующей размеру (объему) паяного узла с образованием скелетной пайки. Передозировка пасты приводит к образованию заливной (неразрешенной) пайки. Недостаточная доза не позволяет полностью сформировать качественный паяный узел.

При *импульсной* пайке (одной из разновидностей селективной пайки) тепловая энергия поступает в зону пайки путем кондуктивной теплопередачи от поверхности специального электрода, нагреваемого импульсом тока. Цикл пайки состоит из следующего:

- придавливания холодным электродом группы выводов к монтажным элементам печатной платы;
- включения импульса тока для нагрева электрода до расплавления заранее нанесенного припоя;
- выдержки для образования сплавного соединения;
- выключения тока и остывания электрода и пайки;
- подъема электрода (снятия давления электрода на выводы компонента);
- перехода инструмента в новую позицию.

Такая последовательность манипуляций при импульсной пайке позволяет жестко регламентировать режимы пайки при недостаточной определенности положения выводов компонентов над поверхностью монтажных площадок.

При лучевых методах селективной пайки прижим выводов к монтажным элементам должен обеспечиваться точной формовкой выводов и строгой дозировкой нанесения припоя перед пайкой. Фиксация прижима выводов осуществляется приклеиванием корпуса компонента к плате.

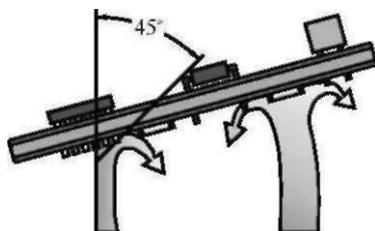
**Групповые** методы нагрева при пайке предполагают общий нагрев всего электронного узла до температур пайки или односторонний нагрев поверхности, на которой расплавляют припой для образования паяных галтелей: пайка волной припоя, ИК-нагрев, конвекционный нагрев в печи в среде инертного газа, конденсационный нагрев подготовленного узла в парах высоко кипящей жидкости, погружение в горячую жидкость.

Чтобы предотвратить термоудар, перед основной зоной пайки или перед вводом изделия в нагретую среду его предварительно и постепенно подогревают. Этим существенно снимаются температурные градиенты и вызываемые ими значительные термомеханические напряжения, что существенно поднимает надежность электронных узлов.

Использование групповых методов пайки сопровождается интенсивным нагревом монтажной подложки. В качестве материалов подложек в подавляющем большинстве случаев используют композиционные материалы: стеклоэпоксидные композиты, гетинаксы, полиэфирные композиты. Все они имеют макрокапиллярность и уже только за счет этого гигроскопичны. Гетинаксы, например, поглощают до равновесного состояния 3 % влаги. При быстром нагреве до температур паяк влага интенсивно (за несколько секунд) испаряется, пары за короткое время пайки не успевают выйти из объема нагрева и создают внутреннее давление, способное разорвать или расслоить изделие. Для предотвращения «термического взрыва» перед групповой пайкой необходимо предусматривать глубокую сушку плат и последующее хранение высушенного задела в сухом боксе или вакуумной упаковке.

**Пайка волной припоя.** Пайка волной припоя в наибольшей степени пригодна для пайки штыревых компонентов. Подавляющее большинство печатных плат с металлизированными монтажными отверстиями монтируются посредством волновой пайки (рис. 5.2).

Принцип метода состоит в том, что плата прямолинейно проводится через гребень волны припоя. Волна припоя остается свободной от окислов и шлаков благодаря постоянному обновлению поверхности.



*Рис.5.2. Пайка волной припоя*

***Технологические этапы процесса волновой пайки:***

- входной контроль собранного печатного узла;
- вставление платы в технологическую рамку, выпрямляющую ее в плоскость и удерживающую ее в этом состоянии до остывания;
- фиксация технологической рамки с платой на конвейере;
- флюсование в блоке флюсования установки;
- первая зона предварительного подогрева – сушка флюса;
- вторая зона предварительного подогрева – подготовка платы к термо-удару расплавленным припоем;
- пайка волной припоя;
- съем платы в технологической рамке с транспортера конвейера;
- охлаждение платы в технологической рамке;
- изъятие платы из технологической рамки;
- передача платы на отмывку от технологических загрязнений.

В процессе пайки ПП устанавливаются на конвейер и последовательно проходят несколько рабочих зон паяльной установки: зону флюсования, предварительного нагрева, пайки.

Особое влияние на процесс пайки оказывают следующие параметры:

- угол наклона конвейера;
- скорость движения конвейера;
- тип применяемого флюса и его плотность;
- толщина слоя флюса и равномерность его нанесения;
- температура и скорость предварительного нагрева;
- тип применяемого припоя и степень его чистоты (отсутствие примесей);
- температура припоя;

- форма, высота и стабильность волны припоя;
- атмосфера при пайке и степень ее чистоты.

Флюс удаляет оксидные пленки с паяемых поверхностей, улучшает смачивающую способность припоя и предотвращает окисление до начала пайки. Применяются флюсы на водной и канифольной основе, в том числе не требующие отмывки, а также водосмываемые флюсы. Флюсование осуществляется одним из двух основных способов: распылением и с помощью пенообразователя. Многие установки пайки волной имеют возможность оснащения флюсователями обоих типов.

Распыление флюса осуществляется, например, при помощи вращающегося сетчатого барабана, где поток сжатого воздуха, пропущенный через его сетку, создает мелкодисперсную струю жидкого флюса. Существуют конструкции флюсователей, где флюс предварительно переходит в мелкодисперсное состояние на рабочей поверхности ультразвуковой форсунки, а затем распыляется потоком сжатого воздуха. Слой наносимого флюса должен быть равномерным и иметь толщину 1–10 мкм в сухом состоянии. Производится подбор оптимального давления при распылении, а также контроль плотности флюса. Метод распыления обладает рядом преимуществ по сравнению с пенообразованием, в частности, он более экономичен, а также позволяет точнее контролировать толщину флюса.

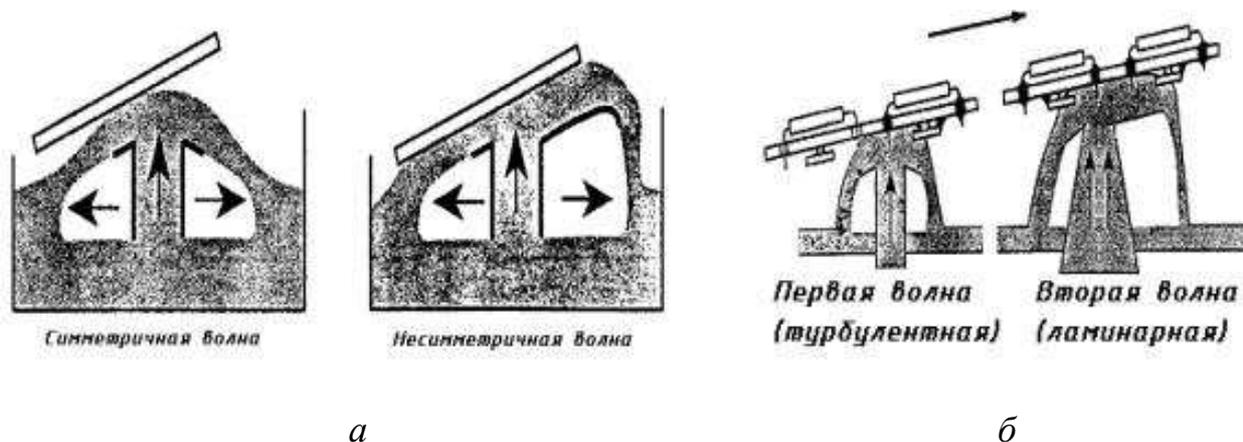
Пенное флюсование осуществляется с помощью фильтрующих элементов (трубчатых фильтров либо пористых камней (например, пемзы) с размером пор  $\approx 3 - 35$  мкм), которые образуют однородную пену, состоящую из пузырьков малого диаметра. Пена направляется на плату с помощью сопла. Пузырьки, лопаясь, разбрызгивают флюс по нижней поверхности ПП. Чем меньше размер пузырьков пены, тем лучшее смачивание обеспечивает флюсование, поэтому применение трубчатых фильтров по сравнению с пористыми камнями предпочтительно. Высота подъема пены регулируется (обычно не более 2 см).

Зона флюсования оканчивается устройством «воздушного ножа», служащим для удаления избытка флюса с поверхности ПП.

Предварительный нагрев служит для предотвращения теплового удара ПП и ЭК в результате контакта с волной горячего припоя, сушки (удаления растворителя) и активации флюса. Нагрев осуществляется ИК-модулями с различной длиной волны, кварцевыми нагрева-

телями и конвекционными системами (последние особенно эффективны в случае наличия на ППЭК, обладающих большой теплоемкостью).

Далее конвейер с ПП проходит непосредственно зону пайки, где в ванне с помощью помпы формируется волна расплавленного припоя. Платы устанавливаются либо на пальчики (лепестки) конвейера, как правило, выполненные из титана, либо крепятся в паллетах. Конвейер обладает возможностью регулировки скорости движения (0–2 м/мин) и угла наклона ПП по отношению к волне (5–9°), что важно для обеспечения стекания избыточного количества припоя. Форма волны припоя может быть различной, в зависимости от применяемой модели оборудования. Изначально использовалась симметричная волна, но впоследствии произошел переход к несимметричным (Т-образная, Z-образная, Ω-волна и пр.), обеспечивающим лучшие результаты с точки зрения качества паяных соединений (рис. 5.3, а). Производители ЭК в своих рекомендациях указывают параметры профиля пайки волной, которые включают в себя температуру и скорость предварительного нагрева, скорость подъема температуры при воздействии волны, максимальную температуру, которой подвергается ЭК во время пайки и время выдержки при ней, а также максимально допустимую скорость охлаждения ПП.

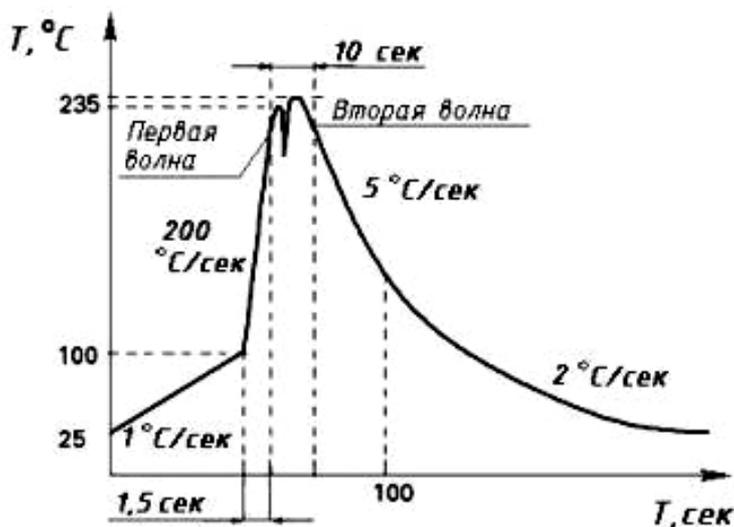


**Рис. 5.3.** Волна припоя:

*а* – симметричной и несимметричной формы; *б* – первая (турбулентная) и вторая (ламинарная) для пайки двойной волной

Для изделий на базе смешанного монтажа применяются так называемая «двойная» волна припоя (рис. 5.3, б). Первая волна является узкой, подается из сопла под большим давлением и имеет турбулентный характер. Ее задача – обеспечить смачивание выводов ЭК и ис-

ключить формирование полостей с газообразными включениями, оставшимися от разложения флюса. Вторая волна – ламинарная, ее скорость истечения ниже; она разрушает перемычки, образованные первой волной, и завершает формирование паяных соединений. Пример температурного профиля пайки ПП двойной волной представлен на рис. 5.4.



**Рис. 5.4.** Пример температурного профиля для бессинцовой пайки ПП двойной волной

Подобно зоне предварительного нагрева, зона пайки также оканчивается «воздушным ножом», удаляющим излишки припоя и разрушающим перемычки.

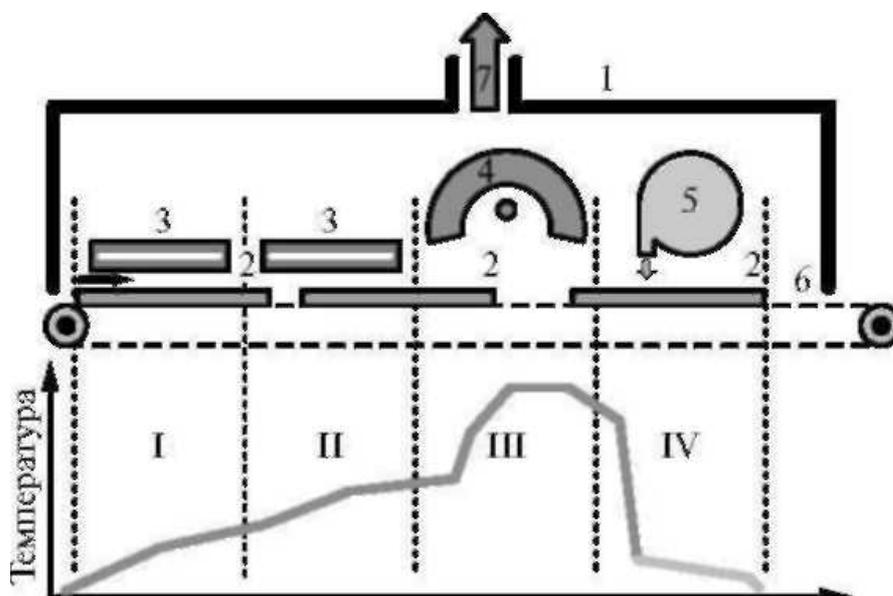
Ряд моделей оборудования обеспечивает возможность пайки волной в среде инертного газа (азота). Применяется подача азота непосредственно к месту пайки либо создание азотного «туннеля» над всеми зонами. Цель применения азота – уменьшить окисление припоя и флюса, получить более блестящие и яркие паяные соединения, снизить уровень образования шлама и, как следствие, исключить засорение форсунок.

В итоге можно сформулировать *ограничения при использовании пайки волной припоя*, обусловленные ее недостатками:

- мощный термоудар для платы и поверхностно-монтируемых компонентов;
- наличие «теневого» эффекта при пайке поверхностно-монтируемых компонентов (непропай);
- большое количество дефектов паек при малом расстоянии между монтажными элементами.

**Инфракрасная пайка.** Для ИК-нагрева используются специальные лампы накаливания и рефлекторы, как правило, эллиптические. Количество тепла регулируется мощностью излучения (напряжением питания ламп) и скоростью движения транспортера.

Схема типичной конструкции установки ИК-оплавления приведена на рис. 5.5.



**Рис. 5.5.** Схема установки для ИК-пайки

Установка состоит из колпака 1, внутри которого расположено несколько зон нагрева, в каждой из которых поддерживается заданный тепловой режим. В первой и второй зонах производят постепенный предварительный нагрев изделия 2 с помощью плоских нагревателей 3. Пайку производят в третьей зоне быстрым нагревом объекта выше температуры плавления припоя с помощью кварцевых ИК-ламп 4, затем объект охлаждают с помощью устройства 5. Платы транспортируются ленточным (обычно сетка из нержавеющей стали) конвейером 6. Вытяжка паров испарений производится через окно 7. Оно же используется для регулировки температуры в подколпачном пространстве. Режимы работы нагревателя и скорость конвейера регулируются с помощью микропроцессорной системы, температурный профиль вдоль установки отображается в графической и цифровой форме на экране дисплея. Характеристики температурного профиля, то есть значения температур в каждой зоне, возможно изменять в ши-

роких пределах, также возможно иметь библиотеку типовых режимов оплавления для печатных плат различных типоразмеров.

Недостатки ИК-пайки:

- поглощение энергии излучения компонентами и платой зависит от поглощающей способности материалов, из которых они изготовлены. Поэтому нагрев элементов неравномерен в пределах монтируемого изделия из-за их различающейся спектральной чувствительности;

- не все производители компонентов разрешают нагрев компонентов до температур пайки. Но доля таких производителей постоянно уменьшается, поскольку использование их компонентов увеличивает трудоемкость сборочно-монтажных работ. При переходе к бессвинцовым технологиям предстоит заново решать эту проблему;

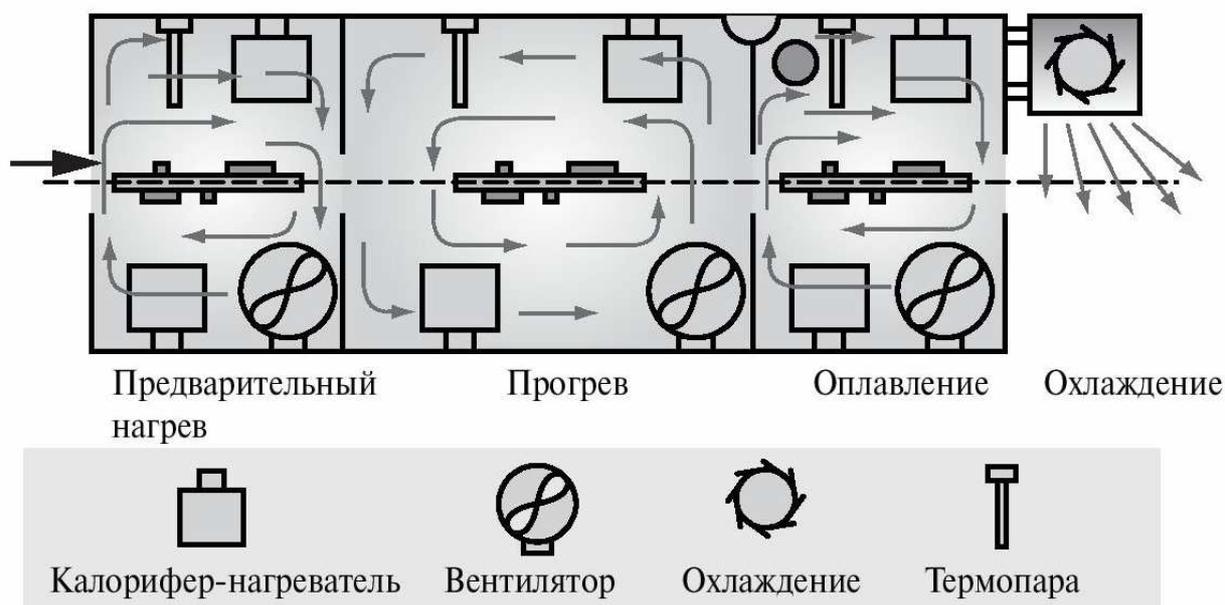
- не все поверхностно-монтируемые компоненты поддаются ИК-пайке. Например, компоненты с  $J$ -выводами недоступны для ИК-нагрева, чтобы нагреть пайки под корпусом компонента;

- ИК-пайка пригодна только для поверхностного монтажа. Компоненты с выводами для пайки в отверстия приходится монтировать отдельно;

- неравномерное спектральное поглощение ИК-энергии различными поверхностями и, как следствие, неравномерный нагрев.

**Конвекционный нагрев.** В печах конвекционной пайки или оплавления в качестве нагревателей используют мощные калориферы, но могут использовать и ИК-излучатели. Тепло в этих печах переносится преимущественно за счет принудительного движения газовой среды встроенными вентиляционными системами. Потoki горячего газа (чаще азота, возможно воздуха) более равномерно прогревают изделия, снимают температурные перепады и, что самое главное, позволяют более эффективно управлять температурным профилем в печи. В серийном производстве используют конвейерные печи типа показанной на рис. 5.6. В них температурный профиль распределяется в пространстве печи от одной зоны к другой, и изделия последовательно проходят эту череду зон, принимая соответствующие температуры, как показано на рис. 5.6. Эти печи занимают большие производственные площади, потребляют значительную энергию для нагрева рабочей среды. Поэтому в прототипном производстве используют

камерные печи, в которые загружаются изделия, и температурный профиль в них устанавливается управляемым во времени нагревом и охлаждением.



**Рис. 5.6.** Конвейерная печь с конвекционным нагревом

В конвекционной печи плата поочередно проходит как минимум четыре температурные зоны:

**Зона предварительного нагрева (25 – 150°C).** Удаление летучих компонентов из флюса. Плавный нагрев платы и компонентов. Температурный градиент не должен превышать 2,5 °C/с.

**Зона прогрева (150 – 180°C).** Начало активизации флюса, смачивание выводов компонентов и контактных площадок платы и удаление окислов.

Температура платы и компонентов достигает температуры плавления припоя.

Уравновешивается температура компонентов разной массы и размеров. Активированный флюс защищает паяемые поверхности от окисления.

**Зона расплавления припоя – пайки (200 – 210°C).** Оплавление паяльной пасты.

Активированный флюс снижает поверхностное натяжение паяльной пасты и повышает смачиваемость паяемых поверхностей.

**Зона охлаждения (30 – 50 °C).** Плавное снижение температуры для равномерного охлаждения компонентов и платы.

К недостаткам конвекционных печей можно отнести большой цикл установления устойчивых температурных профилей. При перерывах в работе (односменный или двухсменный режим) приходится считаться с необходимостью ожидания выхода печи на режим и технологического тестирования качества пайки до первого запуска изделия на пайку.

Поэтому достаточно часто встречается комбинация конвекционного и ИК-нагрева, как это показано на рис. 5.7.

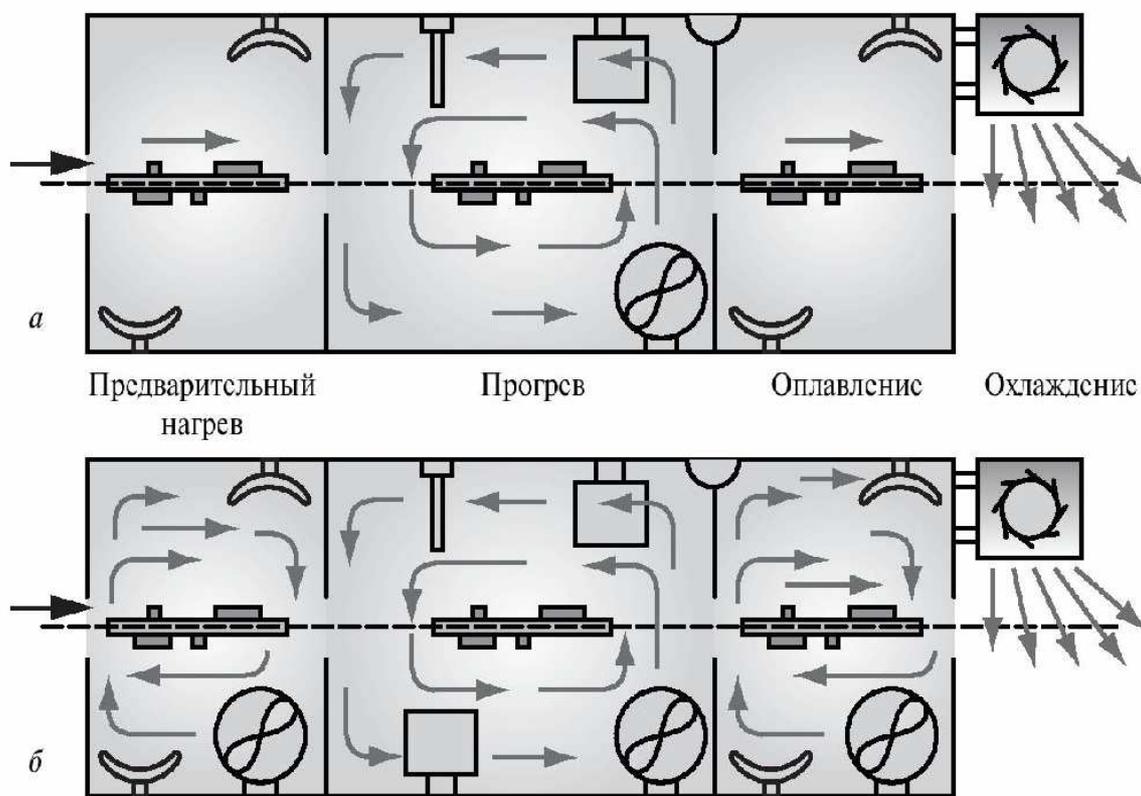


Рис. 5.7. Печь инфракрасного нагрева – а и смешанного – б: ИК и конвекционного нагрева

**Конденсационная пайка.** Технология конденсационной пайки (пайки в парогазовой фазе) основана на нагреве монтируемых узлов в парофазной среде за счет конденсации пара рабочей жидкости на холодной поверхности монтируемого изделия. Жидкости конденсируются на плате, отдавая скрытую теплоту парообразования. В качестве жидкости, пары которой конденсируются при температурах пайки, используют нагревостойкие низкомолекулярные полимеры класса фторуглеродов или галогенуглеродов с температурой кипения 210 – 260 °С. Для пайки используются припойные пасты.

Этот метод пайки обеспечивает самый «мягкий» нагрев в сопоставлении со всеми другими методами нагрева. В данном случае «мягкая» пайка означает почти полное отсутствие температурных градиентов по поверхности монтируемого изделия и компонентов и полную невозможность перегрева, поскольку температура нагрева не может быть выше температуры кипения (конденсации) рабочей жидкости. Для нее не требуется подбор температурного профиля: все компоненты и плата прогреваются равномерно. Так как воздух из зоны пайки вытесняется инертным фторуглеродным паром, пайка производится практически в бескислородной среде. Поэтому можно использовать слабо активированные флюсы. После пайки не требуется операция отмывки, так как конденсирующиеся на поверхности плат пары рабочей жидкости смывают все остатки флюса и загрязнения.

Все это обусловило ее преимущественное применение в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства. Недостатком пайки в паровой фазе является большой расход рабочей жидкости, что сказывается на себестоимости изделий.

Повышение температуры платы от ее начальной температуры (например, окружающей среды перед пайкой) до температуры расплавления припоя осуществляется очень быстро и не поддается регулированию. Поэтому целесообразен предварительный подогрев платы с компонентами для уменьшения термических напряжений в компонентах и местах их контактов с платой. Температура нагрева припоя также не регулируется и равна температуре кипения, используемой при пайке жидкости. Ванна с парофазным нагревом встраивается в конвейерную линию, как правило, с модулем предварительного ИК-нагрева. В качестве конденсационной среды используют инертный фторуглерод, например, РС-70.

Существует два типа установок для пайки в парогазовой фазе: с применением одной либо двух рабочих жидкостей. В первых установках для пайки применялись две рабочие жидкости, при этом использовалось обычно несколько установок пайки в составе производственной линии. С целью предотвращения утечки паров дорогого фторуглерода поверх основной технологической среды из инертного фторуглерода создавалась дополнительная технологическая среда из более дешевого фреона. Основным недостатком этих установок состоял в том, что на границе двух технологических сред происходило образование различных кислот. Поэтому необходимо было обеспечивать защиту плат управления от разрушающего действия кислот на мате-

риал платы. Кроме того, рабочая часть контейнера установки пайки должна изготавливаться из коррозионно-стойкого материала, что отражается на стоимости такого оборудования. Требовались системы нейтрализации кислот. Поэтому установки для пайки с двумя рабочими жидкостями оказались малопригодны для линий сборки электронной аппаратуры.

Позже стали выпускаться установки для конденсационной пайки, встраиваемые в технологические сборочно-монтажные линии. Такие установки имеют относительно небольшие входные и выходные шлюзы, позволяющие уменьшить утечку среды и реализовать систему с одной технологической средой. Показанная схематично на рис. 5.8 конструкция обеспечивает возможность включения установки в состав технологической линии.

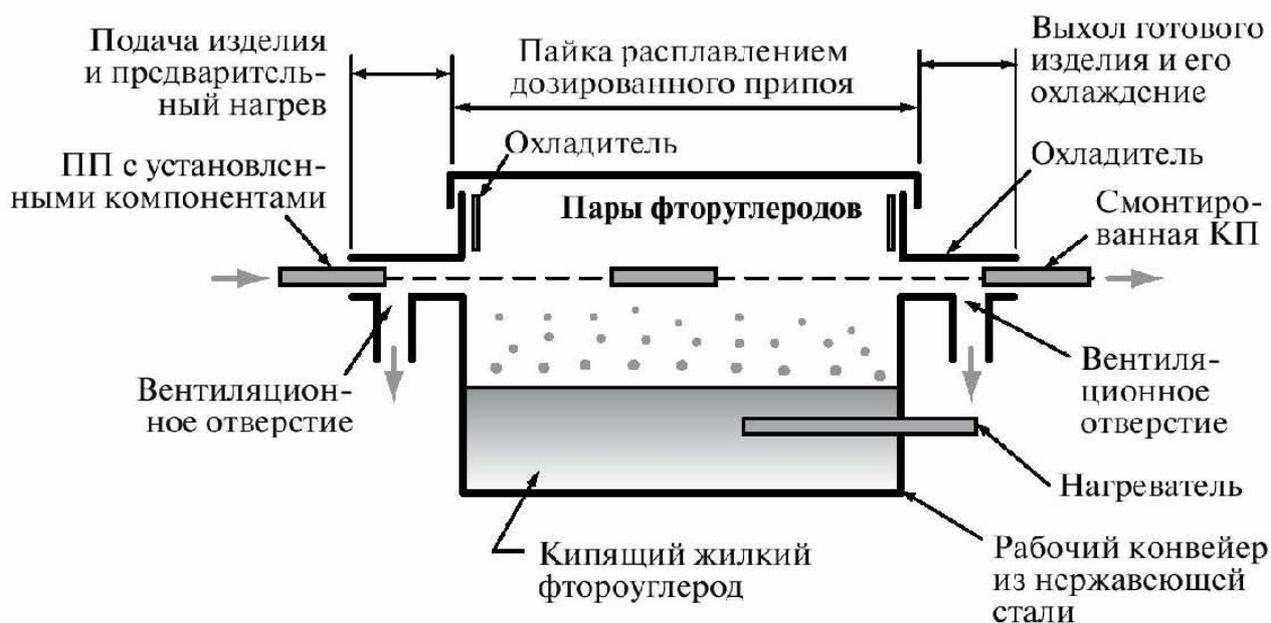


Рис. 5.8. Схема конденсационного нагрева

**Локальная пайка.** Локальный нагрев при пайке имеет определенное преимущество по сравнению с общим, так как является щадящим для участков изделия, не подвергающихся пайке. В случае применения элементной базы с планарными выводами, требующими прижима каждого вывода в момент пайки, предпочтительнее локальный нагрев паяных швов. Пайка сводится к повторному расплавлению в присутствии флюса дозы припоя, предварительно нанесенной на вывод и контактную площадку во время лужения. Механическую фиксацию

навесных элементов осуществляют приклеиванием тела элемента к подложке. Локальность нагрева не исключает возможности проведения группового процесса пайки.

Локальный нагрев осуществляют тремя способами: контактным, струйным, лучевым.

**Пайка паяльниками.** Контактный способ основан на нагреве электрическим током жала паяльника и передаче тепла в локальное место пайки путем прижима жала. Для уменьшения постоянной времени нагрева и охлаждения применяют электрический нагрев жала паяльника. Температуру жала паяльника стандартно устанавливают на 30 – 40 °С выше температуры плавления припоя. Но также успешно практикуется перегрев жала паяльника на 70 – 90 °С. Перегрев повышает уровень активации поверхностей взаимодействующих металлов. Кратковременность перегрева позволяет пренебречь окислительными процессами на поверхности припоя и металла, тем более что они защищены флюсом.

Недостатком метода является зависимость температуры, развиваемой в зоне пайки, от теплоемкости и теплопроводности паяемого узла, от плотности прижатия жала. Эту проблему решают, следующими способами:

- увеличение мощности паяльника;
- приближение нагревателя к точке нагрева;
- приближение датчика температуры к точке пайки.

**Пайка горячим газом.** Локальный струйный нагрев горячим газом или пламенем основан на подаче в зону паяного шва остро направленного потока диаметром менее 0,5 мм, вызывающий повторное расплавление нанесенной при лужении дозы припоя. Припаиваемые выводы элементов должны быть прижаты к контактной площадке на все время пайки вплоть до затвердевания припоя. В качестве газотеплоносителя применяют аргон, гелий, азот при температуре струи 300 °С. Скорость пайки шва составляет 2 мм/с.

Более высокую производительность дает применение остро направленного факела пламени, в конусе которого температура может достигать 3400 °С (горение водорода в кислороде). Конец факела пламени удерживают на расстоянии 2 – 6 мм от поверхности контактной площадки, покрытой припоем и флюсом. Стабильность температуры зависит от точности поддержания расстояния между кон-

цом сопла и поверхностью пайки (обычно 17 – 18 мм при длине пламени 14 мм) и от точности поддержания длины пламени. Длина пламени зависит от состава смеси водород – кислород.

Высокой стабильности соотношения газов легко и безопасно можно достичь, используя в качестве общего источника газов дистиллированную воду, подвергаемую электролитическому разложению в газообразователе, входящем в состав установки для пайки.

Производительность паяльной головки непрерывного действия по длине паяного шва при использовании добавок этанола достигает 10 мм/с. Расход воды 14 г/ч.

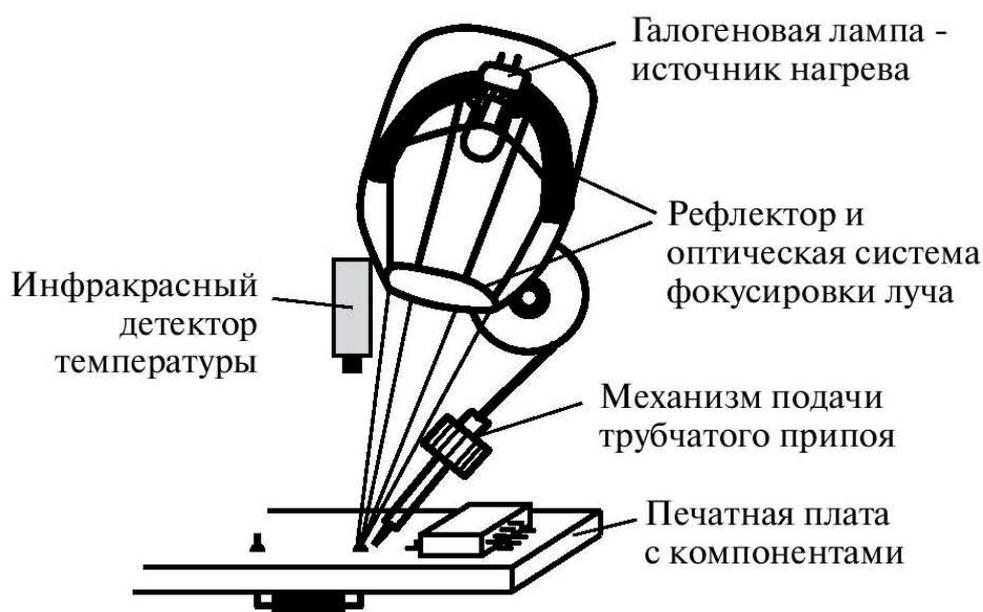
Установки для струйной локальной пайки просты в изготовлении и обслуживании. Особенно велико их преимущество перед другими в случае пайки массивных проводов или контактов с повышенной теплоемкостью либо при пайке относительно высокотемпературными припоям и при требовании кратковременности пайки из-за ограниченной жаростойкости изоляции. Например, пайку пламенем жгутов к низкочастотным разъемам производят припоем П Ср 40 при  $670 \pm 20^{\circ}\text{C}$ , пайку пламенем кабелей с фторопластовой изоляцией – припоем ПСр2,5 при  $360 \pm 10^{\circ}\text{C}$  в течение 2 с. Пайку кабелей с полиэтиленовой или полистирольной изоляцией производят припоем ПОСК 50-18 при  $200 \pm 20^{\circ}\text{C}$  в течение 1 с.

***Пайка сопротивлением.*** В этом случае тепло выделяется в U-образном электроде. Большое преимущество этого метода в том, что нагрев сопровождается придавливанием выводов компонента к монтажному элементу (к контактной площадке) на плате. Давление инструмента снимается только после остывания паяного узла до затвердевания припоя. Таким образом, выводы компонента принудительно фиксируются в пайке, независимо от их исходного положения над платой. Эти виды паяк хорошо управляются формированием импульса тока нагрузки.

Недостатки: неспособность пайки разнородных компонентов с одной настройки режимов; загрязнения электродов флюсом и окислами припоев искажают режимы пайки.

***Лучевая пайка.*** Локальная лучевая пайка основана на нагреве с помощью некогерентного ИК-потока (рис. 5.9). При использовании в качестве источника ксеноновой газоразрядной лампы высокого давления в фокусе достигается температура 1000 – 1500 $^{\circ}\text{C}$ . Наибольший

интерес представляет такое конструктивное решение оптической фокусирующей системы, при котором малый диаметр локальной области в плоскости сочетается с вытянутостью вдоль оптической оси. Для этого малую апертуру эллиптического рефлектора, необходимую для удобства работы, совмещают с большой апертурой системы в целом, что позволяет получать фокальное пятно малого диаметра. Световые лучи, отраженные от рефлектора, поступают на линзу одновременно с прямым световым потоком от лампы. В результате фокальная область оказывается вытянутой вдоль оптической оси системы нагрева. Такая форма фокальной области позволяет снизить требования к точности расположения нагреваемых деталей.



*Рис. 5.9.* Схема процесса лучевой пайки

Одним из главных преимуществ светолучевой локальной пайки является возможность точного дозирования световой ИК-энергии по продолжительности воздействия с помощью стандартных фото затворов. Пайка светолучевым способом требует специального оборудования, но значительно менее сложного и громоздкого, чем лазер и установки электронно-лучевой сварки. Для электронно-лучевого способа необходим вакуум, что существенно удлинняет и усложняет процесс.

Диаметр фокальной области при светолучевом способе значительно больше (1 – 15 мм), что в ряде случаев для целей пайки является важным преимуществом.

**Лазерная пайка.** Свеголучевая пайка сегодня начинает уступать лазерной. Световое пятно, формируемое лазерным лучом, гораздо меньше светового. Монохромное излучение лазера позволяет использовать спектральную избирательность поглощения энергии. При правильном подборе лазера с коротковолновым излучением (например, эксимерные лазеры) можно сканировать монтажные поля на плате, не модулируя выключая луч. Луч, проходя по диэлектрику, не нагревает его (не поглощается диэлектриком), но интенсивно поглощается металлом и плавит припой на выводах компонентов.

Лазерная пайка может быть совмещена с системой контроля качества паяных соединений. Система лазерного ИК-контроля может использоваться и самостоятельно для тестирования паяных соединений, полученных другими методами. В случае самостоятельного использования система лазерного ИК-контроля подает на тестируемую пайку управляемый импульс лазерного излучения для незначительного нагрева поверхности соединения. Отдельный ИК-детектор наблюдает за ростом и спадом температуры поверхности тестируемой пайки. Динамика роста и спада температуры становится «характеристикой» соединения. Система сравнивает характеристику тестируемого соединения со стандартной и сообщает степень ее отклонения от нормы. Скорость тестирования составляет 10 паяных соединений в секунду с временем воздействия 30 мс. Система ИК-контроля использует два типа лазеров. Один – для нагрева тестируемых паяк – лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом, генерирующий в непрерывном режиме – 15 Вт на объекте. Другой – указательный – гелий-неоновый лазер видимого диапазона – 1 мВт на объекте. Детектор инфракрасного излучения – антимонид индия InSb с криогенным охлаждением.

При лазерной пайке, совмещенной с ИК-контролем, непропай может быть идентифицирован по ненормальному темпу остывания места пайки, и установка может вернуться к этой точке, чтобы повторить операцию или пометить ее для детального просмотра оператором.

Лазерная пайка, совмещенная с ИК-контролем, требует для эксплуатации хорошо обученного и ответственного персонала, чтобы достоверно идентифицировать качество объектов контроля. Ее использование оправданно для пайки и тестирования особо ответственных изделий. В условиях промышленного производства ее не применяют главным образом из-за дороговизны и сложности в работе.

### ***Выбор методов нагрева для монтажной пайки***

Желая достичь максимальной производительности процесса монтажа, производители выбирают групповые методы пайки, тогда технологический цикл пайки не превышает двух минут. При этом оплаиваются все соединения за один цикл. Однако при групповом нагреве нагреваются и компоненты, что бывает крайне нежелательно для аппаратуры с высоким уровнем надежности. Тогда используют локальную пайку, при которой нагреваются только выводы компонентов. Современные производства, формируя сборочно-монтажные линии, комплектуют их полным набором средств нагрева, встроенных в линию или выделенных из линии: печь конвекционного нагрева (или комбинированная с ИК-нагревом), установка пайки волной припоя с модулями флюсования, предварительного нагрева и собственно пайки, установка конденсационной пайки, рабочие места для ручной пайки с использованием паяльных станций, отдельная установка монтажа-демонтажа BGA-компонентов, печь для отверждения клеев.

При ограниченности средств довольствуются туннельной или камерной печью конвекционного нагрева с управляемым термопрофилем и паяльными станциями. Но для монтажа BGA-компонентов нужна отдельная специализированная станция.

В процессе пайки происходит смачивание расплавленным припоем спаиваемых поверхностей, растворение спаиваемых металлов и химическое взаимодействие между припоем и основными металлами. Результатом растворения является образование интерметаллического соединения. Его толщина находится в зависимости от времени, температуры, типа припоя и типа металлизации контактных площадок и выводов. Хотя образование интерметаллического соединения желательно для достижения необходимой прочности паяных соединений, его наличие снижает паяемость при последующих пайках. Более тонкий слой интерметаллического соединения предпочтительнее для большей механической прочности и лучших усталостных характеристик паяных соединений, и достигается это снижением температуры и времени пайки.

Деформация твердеющего припоя при остывании вызывает скольжение уже образовавшихся зерен по границе раздела кристаллов, образование крупнокристаллической структуры пайки с характерной матовой поверхностью. Пайки с крупнокристаллической структурой галтели быстро корродируют по межкристаллитным прослойкам и изначально имеют низкую прочность.

Образование мелкокристаллического паяного соединения предпочтительнее для лучшего сопротивления ползучести и усталостным разрушениям и может быть достигнуто быстрым охлаждением строго эвтектических сплавов и использованием добавок, уменьшающих размер зерна.

Загрязнения и примеси в припоях могут ухудшать поверхностное натяжение, смачивание, стойкость к окислению и внешний вид паяных соединений.

В целом пайка — это операция, обеспечивающая низкую стоимость, высокую производительность и высокое качество соединений. Однако это возможно только при строгом соблюдении режимов формирования паяных соединений во время и после пайки и использовании высококачественных материалов, компонентов и печатных плат.

**Низкотемпературные припои.** Припоями являются металлы, которые расплавляются ниже температуры плавления контактируемых (спаиваемых) металлов. Так как сплавы металлов всегда имеют температуру плавления меньше, чем у любого из компонентов сплава, в качестве припоев используют сплавы. Из всех сплавов в качестве припоев используют те, которые являются хорошо смачивающими жидкостями и способны образовывать металлическую связь с соединяемыми металлами.

Дополнительно оцениваются такие факторы, как температурный интервал кристаллизации сплава (припоя), стоимость и дефицитность компонентов, интенсивность их испарения (угара) и растворения в основном металле, способность припоя растворять соединяемые металлы (загрязняться растворяемыми металлами), когезионная прочность, свойства химических соединений металлов с припоями (интерметаллоидов).

Из всех систем сплавов в качестве припоев традиционно много лет используют эвтектические. Именно в этих сплавах отверждение (кристаллизация) происходит сразу во всем объеме при самой низкой для данной системы температуре.

Неэвтектические сплавы кристаллизуются в широком температурном диапазоне, что увеличивает время, необходимое для охлаждения паяного узла, в течение которого соединяемые детали должны оставаться строго неподвижными, чтобы не сдвинуть остывающий полуотвердевший припой. Если твердеющий припой из неэвтектического сплава потревожить даже незначительным сдвигом (микросдвигом), мгновенно наступает общая кристаллизация с выделением

крупных кристаллов с непрочными межкристаллическими связями. Практически трудно в групповых процессах пайки жестко зафиксировать спаиваемые детали относительно друг друга, чтобы при остывании припоя предотвратить какой-либо сдвиг.

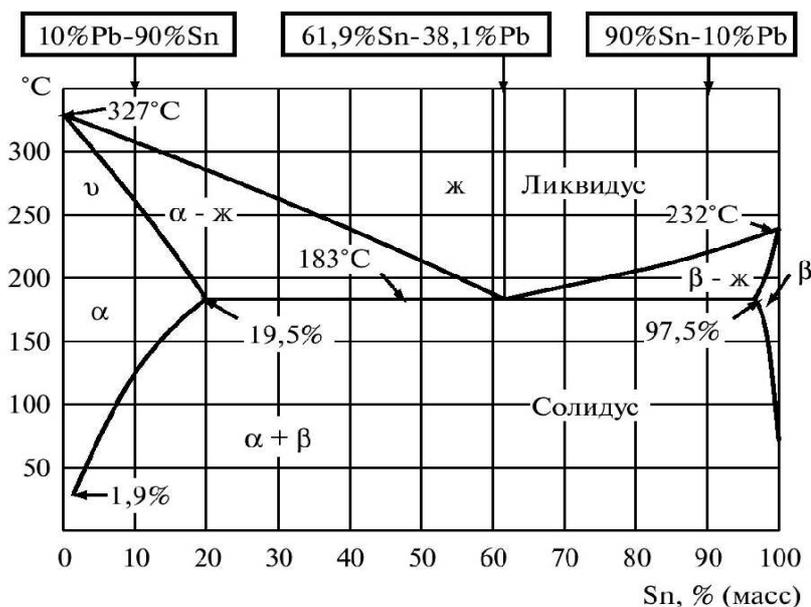
Неэвтектическим сплавам свойственно явление зональной ликвации – образования структурной неоднородности. Получается сплав со слоистой структурой, что создает в паяном узле локальные напряжения, способные при определенных условиях привести к разрушению паяного соединения. В припое эвтектического состава ликвации не наблюдается.

Поэтому надежность паек неэвтектическими сплавами значительно хуже. Сравните  $X$  – характеристики:

- пайка эвтектическим сплавом ПОС-61  $10^{-13} \text{ ч}^{-1}$ ;
- пайка неэвтектическим сплавом ПОС-40  $10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ .

Наилучшим образом зарекомендовал себя для монтажной пайки эвтектический сплав олово-свинец с содержанием олова 61% (ПОС-61). Он имеет наименьшую температуру плавления, наименьшую межкристаллитную пористость, наилучшие капиллярные свойства. Единственный его недостаток – дороговизна олова.

**Диаграмма сплавов олово-свинец.** Возможные фазы ряда сплавов олово-свинец и их соотношения показывает диаграмма состояния на рис. 5.10.



**Рис. 5.10.** Диаграмма сплава олово-свинец

В зависимости от соотношения олова и свинца в сплаве могут существовать два вида твердых растворов: богатый свинцом

$\alpha$ -твердый раствор и богатый оловом  $\beta$ -твердый раствор. При эвтектической температуре 183 °С и эвтектическом составе 61,9 % Sn и 38,1 % Pb образуется эвтектика, то есть из сплава выделяются одновременно  $\alpha$ -раствор и  $\beta$ -раствор, минуя область двух фаз. Так как  $\alpha$ - и  $\beta$ -раствор растут одновременно, то они распределяются очень тонко, из-за чего эвтектическая структура получает мелкокристаллический вид.

В сплаве из 90% Pb и 10 % Sn при охлаждении происходит следующее: при переходе линии ликвидуса, которая ограничивает жидкую фазу, выпадает  $\alpha$ -раствор. При достижении линии солидуса, ниже которой существует только твердая фаза, структура  $\alpha$ -раствора при 183 °С имеет максимальную растворимость около 19 % для олова. С понижением температуры уменьшается растворимость соответственно линии растворимости 19,5 – 1,9 %. Олово выпадает из твердого  $\alpha$ -раствора в форме  $\beta$ -раствора.

В сплавах с 90 % Sn и 10 % Pb при переходе линии ликвидуса образуются первые, богатые оловом  $\beta$ -растворы. Остаточный сплав обогащается свинцом. При эвтектической температуре около 183 °С затвердевает приблизительно две трети общего количества  $\beta$ -раствора. Остаточный сплав благодаря обогащению свинцом достигает эвтектического состава (61,9 % Sn и 38,1 % Pb) и эвтектически затвердевает. Процесс расслоения в твердом состоянии, который может длиться еще продолжительное время при комнатной температуре, типичен для системы Pb-Sn и имеет свои причины непрерывного снижения растворимости Pb в Sn от 19 % при 183 °С до 1,9 % при 20 °С.

Жидкий припой растворяет соединяемые металлы, за счет чего его свойства могут ухудшаться. Растворяя основной металл, он может уменьшать толщину и без того тонких покрытий, например, микронных покрытий серебра на керамике. Скорость растворения основного металла или металлопокрытия при пайке (температура 270 °С) волной припоя (мкм/с): для никеля – 0,43; для меди – 1,56; для серебра – 2,8; для золота – 0,4.

Для предотвращения насыщения припоя посторонними для него компонентами применяют защитные (паяльные) маски, закрывающие металлические поверхности, не подлежащие пайке, используют малорастворимые в припое барьерные покрытия, например, никель на меди. Легирование припоя предотвращает растворение металлов и улучшает свойства припоев. Примеры легирования:

- *ПОС61Су* – припой, легированный сурьмой, обладает повышенной механической прочностью;

- *НОС61М* – припой, легированный медью (до 2%), не растворяет медь, предназначен для пайки микропроводов;
- *ПСр* – припой, легированный серебром;
- *ПСрОСИ<sub>n</sub>* – сплав олова, свинца, сурьмы, серебра, индия. Предназначен для пайки и лужения тонких проводов из золота и серебра или покрытых ими деталей. Присадки индия значительно увеличивают способность припоя к смачиванию поверхностей.

В групповых процессах пайки, когда неизбежно образуются большие поверхности испарения расплавленного припоя (например, при пайке волной припоя), олово быстрее угорает, чем свинец, и сплав постепенно перестает быть эвтектическим. Для таких случаев загрузку ванны производят сплавом с избыточным содержанием олова (63 – 64 %), а при корректировке ванны содержание олова доводят до 65 %.

На качестве паек сильно сказывается температура: при низкой температуре не происходит полноценного смачивания припоем спаиваемых поверхностей – образуются «холодные» пайки. В свою очередь, при перегреве пайки горит флюс (загрязняется паяный шов), и образуются тройные сплавы: медь-олово-свинец (оловянистая бронза), никель-олово-свинец, температура плавления которых – порядка 700<sup>0</sup>С, то есть они приобретают свойства твердой пайки – не поддаются демонтажу. Однако самое опасное при перегреве – разрушение электронных компонентов и печатных плат.

Основные параметры монтажных легкоплавких припоев приведены в табл. 5.2

***Висмутовые припои*** обладают низкой температурой плавления, при кристаллизации увеличиваются в объеме, что бывает нужно для предотвращения усадочных явлений, однако недостаточно хорошо смачивают поверхности пайки. Пример: сплав Розе с температурой плавления 93,7° С.

***Кадмиевые припои*** обладают самой низкой температурой плавления (сплав Вуда – 66 °С), более высокой прочностью и пластичностью, чем оловянно-свинцовые, однако недостаточно хорошо смачивают поверхности пайки.

***Индиевые припои*** обладают исключительно хорошей смачиваемостью ко всем поверхностям, даже к стеклу, керамике, кремнию. Добавление индия к любому припою существенно улучшает его смачиваемость. Однако индий как редкоземельный элемент крайне дефицитен.

Таблица 5.2

## Монтажные легкоплавкие припои

Марка припоя	Состав припоя, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С		Область применения
			Солидус	Ликвидус	
ПОС-40	Олово – 39...41, свинец – 61...59	Медь, никель и их сплавы, товар, 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	Медь, никель и их сплавы, товар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183	192	Пайка и лужение выводов и ПП, микропроводов, пленочных покрытий, работающих при температуре не выше 100 °С
ПОСК 50-18	Олово – 49...51, кадмий – 17...19, свинец – остальное	То же, что и ПОС-61	142	145	Пайка и лужение печатных узлов, керамических изоляторов, конденсаторов, проводов и т. д., не допускающих нагрев выше 180 °С
ПОССу 61-0,5	Олово – 60...62; сурьма – 0,2...0,5; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы, товар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183	189	Пайка, лужение выводов, элементов печатных плат, узлов и блоков, электрического монтажа, работающих при температуре не выше 100 °С. Групповая пайка оплавление припойных паст
ПСр 2,5	Олово – 5...6; серебро – 2,2...2,8; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы	295	305	Пайка, лужение моточных изделий, штепсельных разъемов, работающих при температуре от 150 до 250 °С
ПСр 2	Олово – 29...31; кадмий – 4,5...5,5; серебро – 1,7...2,3; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы	225	235	
ПСрОС 3-58	Олово – 57,7...57,8; сурьма – 0,2...0,8; серебро – 2,8...3,4; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы	183	190	Пайка, лужение керамики в производстве микромодулей, конденсаторов, проходных изоляторов

Марка припоя	Состав припоя, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С		Область применения
			Солидус	Ликвидус	
ПОСВ 33	Олово – 32,4...34,4; свинец – 32,3...34,4; висмут – 32,8...34,3	Медь, пайка металлизации по неметаллам серебром, оловом-свинцом, оловом-висмутом	120	130	Пайка коаксиальных кабелей
Сплав Розе	Олово – 17,5...18,5; свинец – 31,5...32,5; висмут – 49,5...50,5		93	96	Лужение элементов печатных плат
Сплав Вуда	Олово – 12...13; свинец – 24,5...25,5; кадмий – 12...13; висмут – 49...51		66	70	Пайка вставок плавких термопредохранителей
ПСрОСИН 3-56	Олово – 55,3...57,3; серебро – 2,6...3,4; индий – 2,8...3,2; свинец – остальное	Золото, серебро, металлизация золотом, серебром	175	175	Пайка, лужение деталей аппаратуры в микроминиатюрном исполнении
ПСр 3И	Серебро – 2,5...3,5; индий – 96,5...97,5		141	141	
ПОИ 50	Олово – 49...51; индий – остальное		117	117	Пайка, лужение изделий из феррита и керамики с применением ультразвука
ИН 2	Индий – 99,75		156	156	Пайка полупроводниковых диодов СВЧ
ПОСВ И36-4	Свинец – 36; висмут – 4, олово – остальное	Медь, покрытие серебром, оловом-свинцом, оловом-висмутом	168	168	Лужение элементов печатных плат
П200Г	Германий – 0,5...1,0, цинк – 9...10, олово – остальное	Алюминий и его сплавы	200	200	Пайка, лужение с применением ультразвука деталей и узлов настроечных элементов, работающих при температуре до 250 °С

**Галлиевые припои** способны формировать паяный шов при температурах пайки 40 – 50°C. При этих температурах в жидкий галлий вводят тонкие металлические порошки: меди, или никеля, или серебра и т.д. Галлий растворяет введенный в него металл, образуя твердый раствор с температурой плавления более 300<sup>0</sup>С (до 800 °С). Технологическое время жизни (время, в течение которого его можно еще использовать): при комнатной температуре – 40 минут, в холодильнике — месяц.

В качестве порошка в галлий вводят, как правило, тот же металл, что и спаиваемые поверхности. Например, для пайки меди используют припой *ПГМ65*, где галлия 65 %, остальное – медь, для пайки никеля – *ПГН54*, где галлия 54 %, остальное – никель. Главное назначение галлиевых припоев – электромонтажная пайка деталей, нагрев которых противопоказан.

### **Бессвинцовые припои**

При переводе изделий на бессвинцовую пайку приходится учитывать целый ряд факторов. Припои подбирают, исходя из особенностей конструкции устройства, топологии печатной платы, механических и электрических характеристик блока, условий его эксплуатации. При выборе учитывают также температуру плавления припоя, смачиваемость спаиваемых поверхностей, надежность, устойчивость монтируемых компонентов и монтажных подложек к температуре пайки, различия режимов при пайке оплавлением и волной припоя. Составы припоев приведены в табл. 5.3.

Основной критерий при выборе припоя – это температура плавления. Все припои по этому признаку можно разделить на четыре группы: низкотемпературные (температура плавления ниже 180°C), с температурой плавления, равной эвтектике *Sn63/Pb37* (180 – 200°C), со средней температурой плавления (200 – 230°C) и высокотемпературные (230 – 350°C).

Низкотемпературные припои имеют ограниченное применение. В их состав входят кроме олова еще дорогие висмут и индий. Самые распространенные эвтектические сплавы – олово-висмут и олово-индий. Трудно ожидать, что сплавы с низкой температурой плавления обеспечат надежные паяные соединения при высоких температурах эксплуатации. Существуют также ограничения по поставкам индия и висмута, высока стоимость припоев на их основе.

Большинство среднетемпературных припоев для замены свинца – это сложные по составу сплавы на основе олова с добавлением меди,

серебра, висмута и сурьмы. К сожалению, ни один из них не может полностью заменить  $Sn63/Pb37$ , у всех сплавов выше температура плавления и хуже смачиваемость. Наиболее близкий по своим свойствам припой  $Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7$  сегодня используется для пайки оплавлением при поверхностном монтаже.

Таблица 5.3

*Составы бессвинцовых припоев*

Тип	Состав (по массе), %	Температура плавления, °С
<b>Низкотемпературные бессвинцовые припои</b>		
Sn/Bi (Олово/Висмут)	Sn42/Bi58	135...140 (эвтектика)
Sn/In (Олово/Индий)	Sn48/In52	115...120 (эвтектика)
Bi/In (Висмут/Индий)	Bi67/In33	107...112
<b>Низкотемпературные бессвинцовые припои для замены эвтектики Sn/Pb</b>		
Sn/Zn (Олово/Цинк)	Sn91/In9	195...200
Sn/Bi/Zn (Олово/Висмут/Цинк)	Sn89/Zn8/Bi3	189...199
Sn/Bi/In (Олово/Висмут/Индий)	Sn70/Bi20/In10	183...193
<b>Среднетемпературные бессвинцовые припои</b>		
Sn/Ag (Олово/Серебро)	Sn96,5/Ag3,5	221 (эвтектика)
Sn/Ag (Олово/Серебро)	Sn98/Ag2	221...225
Sn/Cu (Олово/Медь)	Sn99,3/Cu0,7	227 (эвтектика)
Sn/Ag/Bi (Олово/Серебро/Висмут)	Sn93,5/Ag3,5/Bi3	206...213
Sn/Ag/Bi (Олово/Серебро/Висмут)	Sn90,5/Ag2/Bi7,5	207...212
Sn/Ag/Cu (Олово/Серебро/Медь)	Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7	217 (эвтектика)
Sn/Ag/Cu/Sb (Олово/Серебро/Медь/Сурьма)	Sn96,7/Ag2/Cu0,8/Sb0,5	216...222
<b>Высокотемпературные бессвинцовые припои</b>		
Sn/Sb (Олово/Сурьма)	Sn95/Sb5	232...240
Sn/Au (Олово/Золото)	Au80/Sn20	280

Сплавы с большим содержанием олова имеют температуру плавления около 230°С. В меньшем температурном диапазоне практически отсутствуют бессвинцовые припои для замены эвтектических сплавов на основе олова-свинца. Самый дешевый заменитель – это припой  $Sn99,3/Cu0,7$ .

**Проблемы бессвинцовой пайки.** Бессвинцовая пайка практически ничем, кроме более высокой рабочей температуры пайки, не отличается от традиционной Sn/Pb-технологии. Однако могут потребоваться

некоторые изменения режима для ряда операций техпроцесса. Так, например, новые типы припоев и флюсов могут повлиять на характеристики припойной пасты. Могут измениться такие свойства паст, как срок службы и хранения, текучесть, температур пайки, что требует обновления оборудования для реализации новых технологий.

При воздействии повышенной температуры пайки может произойти вспучивание корпусов ИС («попкорн»), растрескивание кристаллов, нарушение функционирования схем. Схожие эффекты возникают и в печатных платах. Под действием температуры происходит расслоение основания, ухудшается плоскостность, что отрицательно сказывается на точности установки ИС, особенно в корпусах больших размеров. Большинство компонентов удалось сделать совместимыми с таким температурным режимом бессвинцовой пайки. Исключение составляют некоторые типы интегральных схем, конденсаторов и соединителей, предельная температура пайки для которых не должна превышать 225 –230°С. Во всяком случае, необходимо соблюдать предписанные режимы хранения и использования компонентов.

#### ***Флюсы для монтажной пайки.***

Конечным условием надежной пайки является смачивание поверхности соединяемых металлов припоем. Следовательно, главным требованием к флюсу является обеспечение хорошей смачиваемости поверхности паяного шва расплавленным припоем за счет уменьшения поверхностного натяжения припоя и улучшения его растекания по всем зазорам паяного шва. Дополнительные требования состоят в том, что флюс должен выполнять следующее:

- растворять поверхностные пленки на металле и припое, тем самым активировать поверхности;
- предотвращать окисление активированных поверхностей;
- обеспечивать и выравнивать передачу тепла в зоне пайки;
- уступать припою при смачивании поверхностей (выдавливаться из зоны спая по мере смачивания металла припоем);
- не образовывать агрессивных паров, которые могли бы конденсироваться на соседних холодных поверхностях компонентов и элементах электрической изоляции, вызывая впоследствии коррозию и отказы изоляции;
- иметь способность к удалению (отмывке) доступными средствами.

Механизм действия флюса заключается в том, что окисные пленки металла и припоя растворяются или разрыхляются и всплывают на

поверхности флюса. На поверхности очищенного (активированного) металла образуется защитный слой флюса, препятствующий возникновению новых окисных пленок и загрязнений (если сам флюс не разлагается при перегреве). Жидкий припой должен замещать флюс и взаимодействовать с основным металлом. Поэтому смачиваемость припоем спаиваемых поверхностей должна быть больше, чем у флюса.

Химическая активность флюса, используемого для монтажной пайки, должна проявляться только при температуре пайки. При температурах эксплуатации аппаратуры он должен быть нейтрален, чтобы не вызывать коррозионных процессов и разрушения изоляции. Этим свойством среди других при определенных условиях обладают флюсы на основе канифоли.

Материалы, предлагаемые в качестве флюсов для пайки электронных изделий, могут относиться к смолосодержащим и смолонесодержащим. Смолонесодержащие флюсы могут иметь ионогенные компоненты, от которых платы нужно тщательно очищать.

Основу смолосодержащих флюсов, как правило, составляет канифоль, представляющая собой смесь органических кислот. Главный компонент этой смеси – абиетиновая кислота, вторичный – терпин. Органические кислоты – такие как салициловая, молочная, стеариновая, лимонная, муравьиная и т. д. также могут быть использованы для подготовки поверхности к пайке, однако в силу их большей активности они требуют более аккуратного обращения и тщательной промывки изделий после пайки. Эти кислоты, как и некоторые их соединения, чаще используются в качестве активаторов и добавок к флюсам на основе канифоли.

Уровень кислотности флюса на основе чистой канифоли очень мал, но в результате ее растворения в спирте и в процессе нагрева при пайке происходит ее дополнительная активация. Процесс активации канифоли начинается при температуре около 170 °С. При сильном нагреве (более 270 °С) происходит интенсивное разложение канифоли и потеря ее флюсующих свойств.

Канифольные флюсы в стандартах называют смолосодержащими, имея в виду техническое название канифоли – древесная смола. Смолосодержащие паяльные флюсы классифицируются по кислотности и активности.

Бескислотные флюсы приготавливаются на основе канифоли и спиртов (одно- и многоатомных): этилового, глицерина, этиленгли-

колей, этил ацетата и др. Например, флюсы ФКСп, ФКЭт представляют собой растворы сосновой канифоли в этиловом спирте и этилацетате (соответственно). Эти флюсы приготавливают непосредственно в производстве.

Активируют канифольные флюсы присадками химических активаторов: салициловой кислоты, органическими соединениями галогенов. Например, флюс ФКТ содержит добавку тетрабромида дипентена, а флюс ФКТС – добавку салициловой кислоты.

Использование активных флюсов для монтажной пайки категорически запрещено. Возможные их остатки при неполной отмывке вызывают интенсивное разрушение электронных узлов.

В последнее время появился и начал интенсивно распространяться комплекс смолонесодержащих водорастворимых флюсов, поддающихся удалению водными растворами моющих средств. Например, флюс ФТС, содержащий салициловую кислоту, триэтаноламин и спирт этиловый.

Составы флюсов можно найти в справочниках, стандартах и каталогах фирм-поставщиков.

В бессвинцовой пайке используют флюсы на водной основе, не содержащие VOC-компонент (Volatile Organic Compounds – композиции с органическими испаряющимися компонентами). Их преимущества состоят в невоспламеняемости, меньшей интенсивности испарения, способности быть активными в широком температурном диапазоне. Для продления жизнеспособности этот флюс может быть заморожен как сам по себе, так и в составе паяльных паст. Он обеспечивает высокое поверхностное натяжение припоя и способен флюсовать монтажные отверстия.

**Флюсы на синтетической основе.** В синтетических флюсах используются фенольные, полиэфирные и другие синтетические смолы с фиксированным массово-молекулярным распределением, что позволяет регулировать процесс активации и поликонденсации и получать остатки с заданными свойствами: пластичность, механическая прочность, теплостойкость, влагостойкость и др. В частности, регулируя процессы поликонденсации можно получать остатки флюса с высокой термоустойчивостью – более 125 °С, то есть выше верхнего предела работоспособности аппаратуры. Это позволяет применять влагозащитные покрытия без удаления остатков такого флюса после пайки, если соблюсти стерильные условия прохождения плат по сквозному процессу сборки и пайки.

Полимеризующиеся флюсы, не требующие отмывки после пайки, обеспечивают хорошее качество паяных соединений на всех известных финишных покрытиях.

**Типы флюсов.** Предлагаемые на рынке флюсы классифицируются по степени активности следующим образом (приведенная ниже классификация отличается от отечественного отраслевого стандарта ОСТ 4Г0.033.200):

*Tun «R»* (от слова «*rosin*» – канифоль) представляет собой чистую канифоль в твердом виде или растворенную в спирте, этил ацетате, метил енэтил-кетоне и подобных растворителях. Это наименее активная группа флюсов, поэтому ее используют для пайки по свежим поверхностям или по поверхностям, которые были защищены от окисления в процессе хранения. Судя по рекламе и в соответствии с рекомендациями ОСТ 4Г0.033.200, эта группа флюсов не требует удаления их остатков после пайки, если потом электронный модуль не покрывается влагозащитным лаком.

*Tun «RMA»* (от слов «*resin mild activated*» – слегка активированная канифоль) – группа смолосодержащих флюсов, активированных различными комбинациями активаторов: органическими кислотами или их соединениями (диметилалкилбензиламмонийхлорид, трибутилфосфат, салициловая кислота, диэтиламин солянокислый, триэтаноламин и др.). Эти флюсы обладают более высокой активностью по сравнению с типом *R*. Предполагается, что в процессе пайки активаторы испаряются без остатка. Поэтому они считаются абсолютно безвредными. По рекламе этот флюс тоже не требует отмывки. Но очевидно, что процесс пайки должен быть гарантированно завершен полным испарением активаторов. Такие гарантии может обеспечить только машинная пайка с автоматизацией температурно-временных процессов (температурного профиля пайки).

*Tun «RA»* (от слов «*rosin activated*» – активированная канифоль). Эта группа флюсов рекламируется для промышленного производства электронных изделий массового спроса. Несмотря на тот факт, что данный вид флюса отличается более высокой активностью по сравнению с упомянутыми выше, он также преподносится рекламой как не требующий смывки, поскольку его остатки якобы не проявляют видимой коррозионной активности.

*Tun «SRA»* (от слов «*super activated resin*») – сверхактивированная канифоль). Эти флюсы были созданы для нестандартных для электроники применений. Они могут использоваться для пайки никельсо-

державших сплавов, нержавеющей сталей и материалов типа сплава *ковар*. Флюсы типа *SRA* очень агрессивны и требуют тщательной отмывки при любых обстоятельствах, поэтому их использование в электронике строго регламентировано.

*Tin «No-Clean»* (не требует смывки). Эта группа специально создана для процессов, где нет возможности использовать последующую отмывку плат или она затруднена по каким-то причинам. Основное отличие этой группы состоит в крайне малом количестве остатков флюса на плате по окончании процесса пайки.

Для обеспечения высокой надежности паяных соединений смачиваемость припоем спаиваемых поверхностей является определяющей. Этому способствует активность флюса в режимах пайки. Поэтому повышенная активность флюса желательна, но при условии, если это не влечет за собой ухудшение электроизоляционных свойств монтажного основания за счет неизбежных ионногенных загрязнений, источником которых являются остатки активаторов флюсов.

**Активаторы.** Устойчивость процесса пайки обеспечивается активаторами – компонентами флюсов. Наиболее широко используемые активаторы включают в себя линейные дикарбоновые кислоты (щавелевая, малоновая, янтарная, глутаровая, адипиновая, пимелиновая, пробковая, азелаиновая, себациновая), особые карбоновые кислоты (лимонная, фумаровая, винная, глутаминовая, яблочная, фталевая, леволиновая, стеариновая, бензойная и органические галоидные соли).

Линейные дикарбоновые кислоты более эффективны, чем монокрбоновые кислоты, и являются наиболее эффективными при относительно малой молекулярной массе. Активаторы с большей растворимостью в воде, такие как глутаровая и лимонная кислоты, как правило, являются более подходящими для водосмываемых флюсов, в то время как активаторы с низкой растворимостью, например, адипиновая кислота, лучше для безотмывочных флюсов.

Галоидные соли более активны, чем органические кислоты. Однако они также более химически активны при температуре окружающей среды, поэтому необходимо более строго соблюдать срок годности особенно после вскрытия упаковки паяльной пасты.

Помимо использования органических кислот или галогенидов в качестве активаторов также часто применяются такие органические основания, как амины. Поставщиками паяльных паст практикуется использование комбинации нескольких или всех этих групп активаторов, чтобы повысить эффективность пайки.

**Растворители во флюсах и пастах.** Чтобы придать флюсам и паяльным пастам определенную вязкость, в них вводят растворители, в частности алифатические амины, гликоли, алифатические кетоны, пирролы, сложные алифатические эфиры, сложные эфиры гликолей, спирты (изопропанол, л-бутанол, изобутанол, этанол, терпинеол), алифатические и ароматические углеводороды, терпены (скипидар), эфиры гликолей. Среди них системы на основе гликолей являются наиболее распространенными главным образом благодаря сбалансированной растворяющей способности, содействию пайке и вязкости. Также широко используются спирты, особенно терпинеол, хорошо растворяющий канифоль. Выбор растворителя для флюса в основном определяется химическим составом флюса. Например, для водосмываемого активатора, такого как лимонная кислота, часто необходимо применение полярных растворителей, например, гликоли, для того чтобы растворить активатор. Другие факторы, обуславливающие выбор растворителя, включают в себя запах и время, в течение которого паста сохраняет свои свойства на трафарете и будучи нанесенной на печатную плату.

**Реологические добавки.** Для высокопроизводительных процессов, например при трафаретной печати, требуется, чтобы паста легко протекала через перфорации трафарета, но не растекалась, будучи нанесенной на плату. Кроме того, нужно, чтобы паста была неклеякой, чтобы не задерживаться в перфорациях трафарета, но достаточно клейкой, чтобы приклеиться к плате и фиксировать компоненты, устанавливаемые на пасту после ее нанесения. Для того чтобы удовлетворять этим противоречивым требованиям, используют реологические добавки (большинство из них запатентованы), такие как производные касторового масла, парафины (петролатум), полиэтиленгликоли (растворимые в воде), растительный воск, неорганические тиксотропные добавки (активированные силикатные порошки, активированная глина). Наиболее часто используемые реологические добавки – производные касторового масла. По своей природе это семейство химических соединений относится к углеводородам и обычно применяется в безотмывочных или канифольных среднеактивированных флюсах. Для водосмываемых флюсов преобладающим выбором являются полиэтиленгликоли или производные полиэтиленгликолей благодаря их хорошей растворимости в воде.

### 5.3. Сварка

**Сварка** – технологический процесс соединения деталей в результате действия межатомных сил, которые образуются при местном сплавлении и совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей. **Микросварка** (microwelding) – набор способов межсоединений с очень малой зоной сплавления или без расплавления, так чтобы сварной шов был соизмерим с микроскопическими размерами соединяемых деталей: выводов кристаллов микросхем с внешними выводами корпусов, выводов микросхем с контактными площадками на монтажных подложках.

У современных изделий электроники размеры монтажных элементов настолько малы, что образование зоны плавления, какая наблюдается в конструкционной сварке, привело бы к их разрушению. Чтобы предотвратить разрушение монтажных элементов, микросварку проводят методами *квасисплавления*, когда соединение металлов проходит без образования большого литого ядра, преимущественно за счет процессов *термодиффузии*.

*Второе* принципиальное отличие монтажной микросварки от других методов соединений (в первую очередь от конструкционной) состоит в необходимости предотвращения нагрева электронных компонентов, особенно микросхем. Это тем более важно в связи с увеличением количества выводов микросхем и соответствующего уменьшения их размеров, так что зона нагрева при пайке и сварке находится в непосредственной близости к корпусу высоко-интегрированного компонента.

**Место микросварки в производстве электроники.** У современных изделий электроники размеры монтажных элементов настолько малы, что образование зоны плавления, какая наблюдается в конструкционной сварке, привело бы к их разрушению. Чтобы предотвратить разрушение монтажных элементов, микросварку проводят методами *квасисплавления*, когда соединение металлов проходит без образования большого литого ядра, преимущественно за счет процессов *термодиффузии*.

*Второе* принципиальное отличие монтажной микросварки от других методов соединений (в первую очередь от конструкционной) состоит в необходимости предотвращения нагрева электронных компонентов, особенно микросхем. Это тем более важно в связи с увеличением количества выводов микросхем и соответствующего уменьше-

ния их размеров, так что зона нагрева при пайке и сварке находится в непосредственной близости к корпусу высоко-интегрированного компонента.

*Третья* особенность микросварки состоит в ее преимуществе перед пайкой: микросварка позволяет монтировать компоненты с очень малым зазором. Шаг выводов микросхем порядка 0,4 мм сегодня становится обычным, а завтра ожидается 0,3 мм. Зазор между такими выводами становится настолько малым (100 – 150 мкм), что при обычной пайке он может быть залит припоем, что приведет к короткому замыканию. В микроэлектронике такие зазоры – обычное явление, этим обусловлено широкое использование в микроэлектронном производстве методов микросварки. Повсеместное распространение методов микросварки в производстве электроники затруднено из-за присущих ей серьезных недостатков, которые заставляют совершенствовать технологию пайки, а сварку применять в исключительных случаях.

Самый существенный недостаток микросварки состоит в затруднительности ремонта сварного соединения. Его можно только разрушить, в то время как демонтаж пайки выполняется повторным нагревом.

Зависимость режимов пайки от теплофизических характеристик и конструкции соединяемых элементов делает ее технологию неустойчивой (плохо управляемой), а значит и менее надежной. Сварку нельзя использовать для присоединения компонентов с лужеными выводами или легкоплавкими покрытиями под пайку: слой полуды будет расплавлен раньше основного металла, под действием электро- и термодинамических сил в зоне сварки произойдет разбрызгивание припоя и загрязнение сварного шва продуктами его сгорания.

Но преимущества монтажной микросварки состоит в том, что она создает не разрушающиеся при высокой температуре соединения. В конструкциях бортовой аппаратуры такие требования возникают при создании микросборок и гибридных интегральных микросхем, и удовлетворить их может только микросварка. Освоение технологий СОВ – кристалл на плате и МСМ – многокристальные модули связано с использованием микросварки как основного метода формирования межсоединений между кристаллами микросхем и монтажной подложкой.

***Механизм образования сварного шва.*** Микросварку производят либо в жидкой фазе (сварка плавлением), либо в твердой фазе (сварка

давлением и термокомпрессией). Возможность образования при плавлении хрупких интерметаллических соединений и ухудшение за счет этого адгезии тонких металлических пленок к подложке ограничивает применение микросварок с использованием нагрева до расплавления.

Ввиду малых толщин соединяемых элементов, сварка в основном выполняется без образования расплава или в режиме квазисплавления. Применение микросварок без плавления обусловлено также большей возможностью управления параметрами процесса, его механизации и автоматизации, высоким качеством соединения. При микросварке давлением формы и размеры сварной точки ограничены отпечатком рабочей частью инструмента.

Все методы монтажной микросварки отличаются лишь способами генерации и введения тепловой энергии в зону соединения:

- при термокомпрессионной сварке тепло поступает от нагретого инструмента (кондуктивная теплопередача);
- при контактной сварке – от тока нагрузки непосредственно в свариваемых элементах;
- при ультразвуковой – от трения на границе соединяемых поверхностей;
- при газовой сварке – от пламени;
- при лучевой – от поглощения энергии светового луча.

Отсутствие зоны плавления при выполнении монтажной микросварки компенсируется обязательным присутствием процесса пластической деформации зоны соединения. Для этого процесс микросварки организуется так, чтобы нагрев сопровождался приложением давления.

Сварка в твердой фазе (сварка квазисплавлением) протекает в три стадии:

- 1 – физический контакт поверхностей;
- 2 – активация поверхностей за счет пластической деформации и нагрева;
- 3 – объемное взаимодействие.

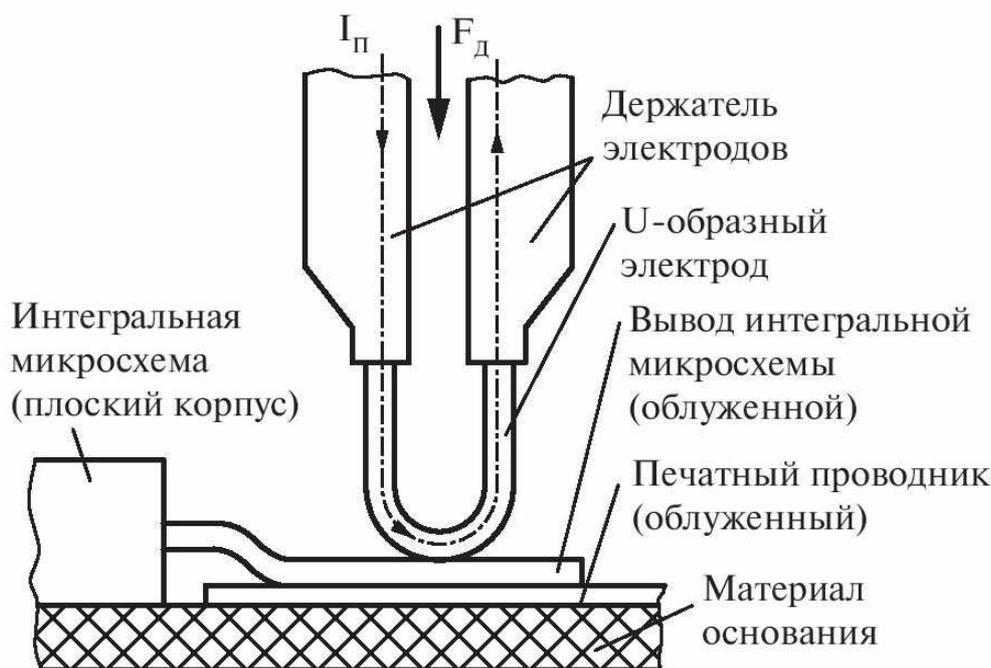
На первой стадии (50 мс) вместе с образованием физического контакта начинается выделение тепла, при этом с поверхности частично удаляются (расползаются) окисные пленки. Свариваемые поверхности сближаются на расстояние атомного взаимодействия.

На второй стадии (100 мс) температура достигает максимума, увеличивается деформация, происходит активация всей поверхности соединения, точки схватывания развиваются в пятна сварки.

Третья стадия (250 мс) – уплотнение зоны соединения, образование прочных химических связей, заканчивается слияние отдельных пятен взаимодействия и релаксация напряжений упругопластической деформации сварного шва.

**Термокомпрессионная микросварка** – сварка давлением, при которой нагрев соединяемых поверхностей осуществляется до перехода их в пластическое состояние с одновременным приложением давления. В результате воздействия двух факторов – тепла и давления – возникает пластическое течение материалов, что позволяет им сблизиться на расстояние межатомного взаимодействия. Получению прочного соединения способствует также взаимная диффузия материалов и образования твердых растворов в тонкой приграничной области.

Тепловая энергия при этой сварке поступает в зону соединения путем теплопередачи от поверхности инструмента, нагреваемого импульсом тока (рис. 5.11).

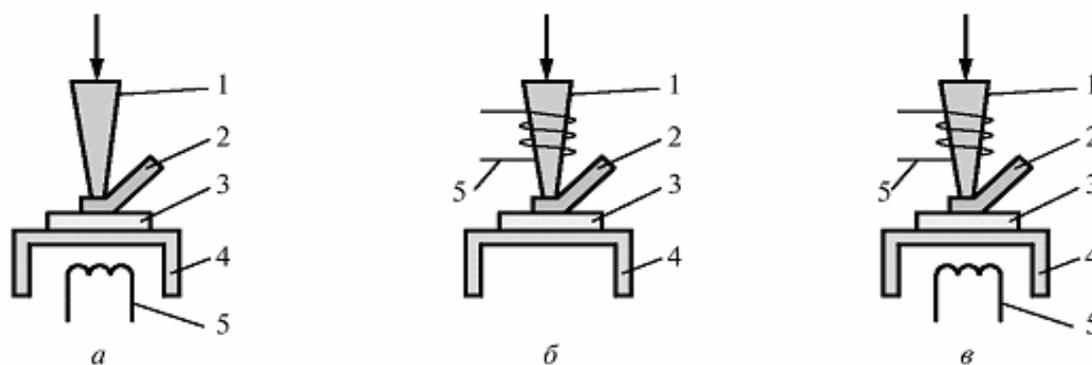


**Рис. 5.11.** Схема термокомпрессионной микросварки выводов микросхем к контактным площадкам монтажной подложки:  $I_{\text{п}}$  – ток подогрева инструмента;  $F_{\text{д}}$  – усилие давления электрода на зону сварки

Термокомпрессия обеспечивает сварку плоских проводников из мягких материалов с высокой электропроводностью (например, из меди) с тонкими металлическими покрытиями на жестких диэлек-

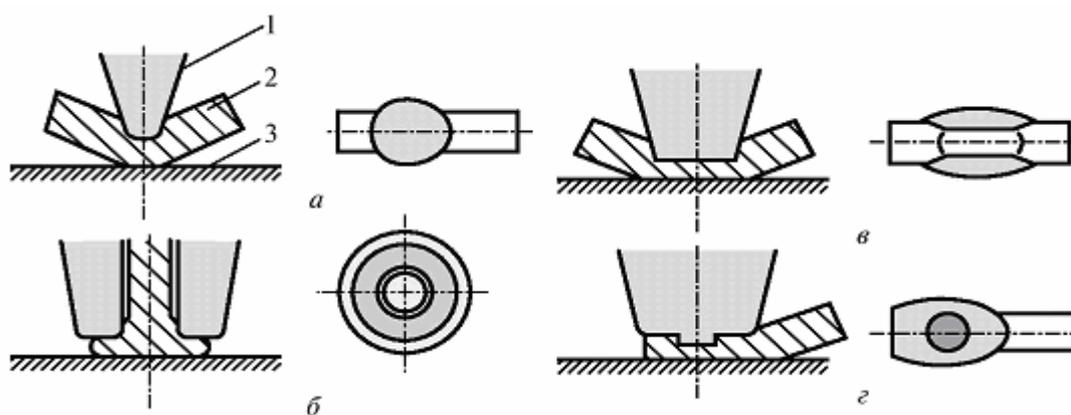
трических подложках (например, на керамике, ситалле). Применение термокомпрессионной микросварки ограничено приемлемыми сочетаниями свариваемых материалов, например, весьма трудно сваривать ковар, никелевые и железные сплавы. Поверхности соединяемых элементов требуют очистки и активации путем обезжиривания, травления, зачистки с последующей защитой от окисления.

Термокомпрессионная микросварка классифицируется по трем признакам: по способу нагрева (рис. 5.12), по форме сварного соединения, обусловленной инструментом (рис. 5.13), по видам соединений: внахлест или встык (рис. 5.14).



**Рис. 5.12.** Разновидности термокомпрессии в зависимости от способа нагрева:

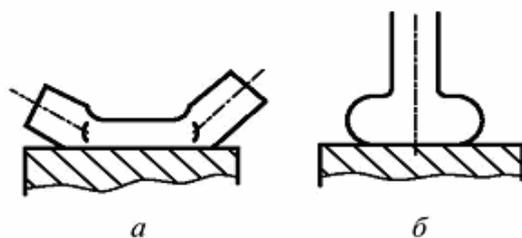
*a* – нагрев только рабочего столика; *б* – нагрев только рабочего инструмента; *в* – одновременный нагрев рабочего столика и инструмента, где *1* – рабочий инструмент, *2* – присоединяемый вывод, *3* – монтажная подложка, *4* – рабочий столик, *5* – нагреватель



**Рис. 5.13.** Основные виды термокомпрессионных соединений:

*a* – соединение в виде плоской сварной точки (термокомпрессия клином);  
*б* – соединение встык (термокомпрессия капилляром с деформацией шарика);  
*в* – соединение с ребром жесткости (термокомпрессия инструментом с канавкой);  
*г* – соединение типа «рыбий глаз» (термокомпрессия с выступом);  
 где *1* – инструмент, *2* – проволока, *3* – подложка

Для воспроизводимости температуры инструмента при выполнении большого числа сварок, следующих одна за другой, необходимо, чтобы инструмент успевал остывать к моменту выполнения следующей сварки.



**Рис. 5.14.** Схема сварного соединения:  
*а* – внахлест; *б* – встык с образованием шарика

Иначе накапливаемое в инструменте тепло от предыдущих сварок будет приводить к его постепенному перегреву и нарушению режима сварок. Для получения малой постоянной времени необходимо, чтобы теплоемкость инструмента была ограничена его объемом порядка  $0,1 - 0,5 \text{ мм}^3$  и была на несколько порядков меньше остальных теплоотводящих частей держателя инструмента.

Инструмент должен быть сделан из материала, который не приваривался бы к свариваемым поверхностям: молибдена, вольфрама, твердого сплава типа ВК-15 и т.п.

Метод термокомпрессии требует тщательного контроля режимов сварки: давления, температуры, времени сварки, и поэтому может быть выполнен только в автоматическом режиме.

Сварка термокомпрессией наиболее распространена в микроэлектронике для соединения выводов кристалла с выводами корпуса микросхемы. В этом случае для присоединения к кристаллу используется шариковый вывод, а присоединение проволочки к торцу выводу осуществляется внахлест или так называемым методом термокомпрессии клином.

Элементы, подлежащие микросварке, должны пройти определенные стадии подготовки: очистку поверхностей, а золотую проволоку подвергнуть отжигу.

Температура процесса –  $150 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , длительность импульса нагрева  $0,2 - 0,5 \text{ с}$ . Давление передается соединяемым деталям электродом, радиус которого приблизительно соответствует диаметру проволочки. Это давление составляет  $0,2 - 1,5 \text{ Н}$  ( $20 - 150 \text{ гс}$ ). Материал электродов выбирается исходя из необходимости обеспечения низкой

теплопроводности, высокой прочности при температурах до 500 °С, отсутствием схватывания со свариваемыми деталями. К таким материалам можно отнести вольфрам и молибден или твердые сплавы типа ВК-бМ, ВК-15, если нагрев производится инструментом (см. рис. 4.8), или синтетический корунд, если используется внешний нагрев. При длительной работе поверхность металлических электродов окисляется и загрязняется выделяющимися продуктами нагрева. В потоке защитного газа исключается образование загрязняющих окисных пленок.

Последовательность операций соединения контактных площадок на кристалле микросхем с внешними выводами корпуса или монтажной подложки показана на рис. 5.15.



**Рис. 5.15.** Схема процесса микросварки:

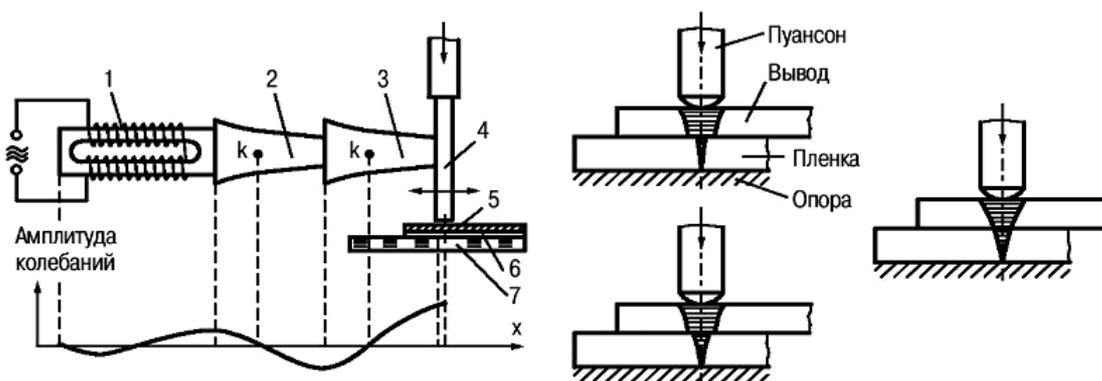
- 1 – оплавление золотой проволоки с образованием шарика;
- 2 – присоединение проволоки к контактной площадке кристалла;
- 3 – подъем капиллярного электрода; 4 – присоединение проволоки к внешнему выводу корпуса; 5 – подъем электрода и оплавление проволоки

**Ультразвуковая сварка** применяется для соединения деталей, нагрев которых затруднен, или при соединении разнородных металлов или металлов с прочными окисными пленками (алюминий, нержавеющие стали и т.п.).

Неразъемные соединения образуются при совместном воздействии на инструмент механических колебаний высокой частоты и относительно небольших сдавливающих усилий. Сочетание этих воздействий приводит к выделению тепла за счет трения поверхностей, стиранию окисных пленок и сглаживанию неровностей с созданием чистых поверхностей, что интенсифицирует процесс образования активных центров и приводит к образованию соединения. Акустической энергии, как правило, достаточно для образования сварного со-

единения. Однако надежней к деформационному активированию трением добавлять термическое активирование.

С помощью пуансона вывод прижимается к контактной площадке, прикладываются ультразвуковые колебания перпендикулярно направлению приложения давления с частотой 20 – 60 кГц. Для получения колебаний применяют магнитострикционный (до 20 кГц) или пьезоэлектрический (40 – 60 кГц) генератор колебаний, от которого кинетическая энергия через концентратор передается к месту сварки (рис. 5.16). В результате высокочастотного трения соприкасающиеся поверхности не только разогреваются, но и освобождаются от поверхностных пленок, обнажая свежие активированные поверхности. Соприкосновение обнаженных от разделительных пленок поверхностей приводит к прочному их соединению на атомарном уровне.



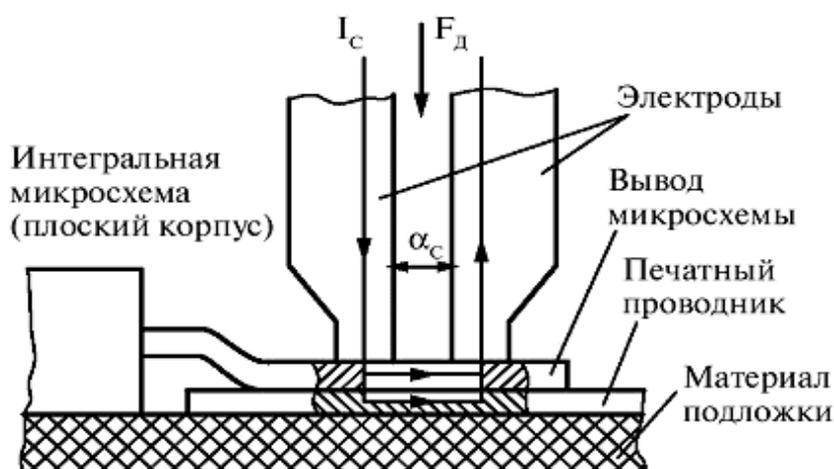
**Рис. 5.16.** Принцип ультразвуковой сварки:

1 – магнитострикционный преобразователь; 2 и 3 – концентраторы ультразвуковых колебаний; 4 – пуансон; 5 – вывод; 6 – пленка алюминия; 7 – подложка; к – узлы колебаний

Основные параметры ультразвуковой сварки: амплитуда и частота колебаний инструмента, внешнее давление и температура, если используется внешний нагрев. Нагрев до 150 – 200 °С сокращает время и улучшает качество сварки. Время сварки подбирается экспериментально в диапазоне 0,3 – 0,5 с.

**Микросварка расщепленным электродом** заключается в одностороннем подводе к зоне соединения сварочного тока от двух электродов, имеющих зазор порядка 100 – 300 мкм (рис. 5.17). Для образования настоящего сварного ядра необходимо заставить поток тока протекать через нижний из свариваемых металлов. Это достигается расстановкой электродов на расстоянии в 3 – 5 раз больше толщины свариваемого пакета.

К сожалению, при сварке неизбежно выделяются пары органических веществ из диэлектрического основания монтажных подложек (печатных плат). В этом виде сварки они конденсируются на сварочных электродах, образуя тонкую диэлектрическую пленку, которой достаточно, чтобы сделать процесс неустойчивым. Поэтому электроды нужно периодически чистить.



**Рис. 5.17.** Сварка расплюснутым электродом:  
 $I_c$  – сварочный ток;  $F_d$  – сила давления электродов;  
 $\alpha_c$  – зазор между электродами

Принцип сварки расплюснутым электродом сводится к разогреву свариваемых проводящих деталей протекающим током. Для образования настоящего сварного ядра необходимо заставить ток протекать через нижний слой свариваемых деталей. Это достигается установкой зазора между электродами, который должен составлять от двух до пяти суммарных толщин выводов. Вследствие отталкивающих сил между двумя параллельно протекающими токами появляется эффект выдавливания тока в нижний слой. Сварочный импульс формируют, как правило, разрядом конденсатора. Поскольку медные контактные площадки на печатной плате имеют относительно большую проводимость, их нагрев затруднен. Поэтому, если предусматривать именно этот метод монтажной микросварки, приходится никелировать поверхность меди, чтобы увеличить выделение джоулева тепла. Другой прием улучшения условий микросварки – золочение выводов микросхем. Золотое покрытие оплавляется в процессе сварки и действует как твердый припой, то есть процесс сварки переходит в твердую пайку с золотом в качестве припоя.

В технологии микросварки расщепленным электродом следует учитывать следующие факторы:

– при сравнительно малых усилиях сжатия и малых собственных электрических сопротивлениях соединяемых деталей тепло преимущественно выделяется на контактных сопротивлениях между деталями и между электродами и верхней свариваемую деталью;

– при жестких режимах сварки (короткие и мощные импульсы тока) и недостаточно чистых свариваемых поверхностях возможны на начальном этапе испарения и выплески металла, неустойчивость качества сварки;

– режимы сварки существенно зависят от множества факторов: состояние поверхностей, размеры и формы электродов, усилие давления, форма, длительность и своевременность тока нагрева;

– при разнородности металлов деталей по термоЭДС возможно проявление эффекта Пельтье в смещении сварной зоны в одну из деталей.

**Точечная электродуговая сварка.** Преимущество электродуговой сварки в противоположность сварке расщепленным электродом состоит в том, что переходное сопротивление между электродом и деталью не влияет на параметры сварки. Передача тепла при расплавлении нижней из соединяемых деталей происходит только за счет теплопередачи, поэтому вывод элемента и контактная площадка печатной платы должны находиться в хорошем термическом контакте, который обеспечивается специальным прижимом. Для свободно горящей дуги минимальный ток составляет около 1 А при напряжении 450 – 550 В. Чистое время сварки составляет около 30 мс. Принимая во внимание время, необходимое для позиционирования, на печатной плате может быть выполнено 12 микросварок с шагом 1,27 мм в течение 1 с (рис. 5.18).

Точечная электродуговая монтажная микросварка характеризуется наличием кратковременно зажигаемой электрической дуги, которая образуется между вольфрамовым электродом и деталью. Зажигание дуги происходит при следующих условиях:

- соприкосновении электрода с деталью и отвода его;
- высокочастотной ионизации воздушного зазора. За этим следует выключение сварочного импульса.

Благодаря омыванию места сварки аргоном достигается чистая и блестящая поверхность точечной сварки.

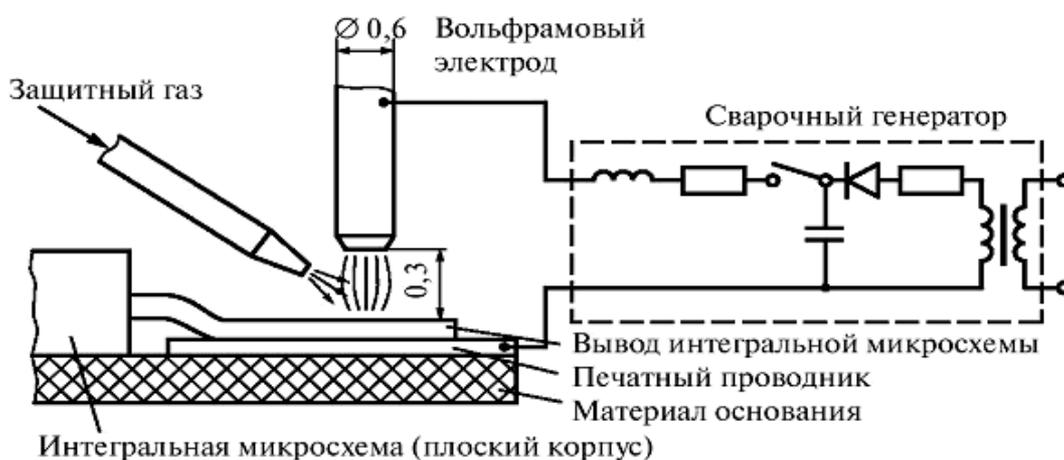


Рис. 5.18. Принцип точечной электродуговой сварки

Недостаток электродуговой микросварки – использование высоких напряжений разряда, противопоказанного современным микросхемам.

**Сварка микропламенем** основана на подаче в зону свариваемого шва остронаправленного пламени диаметром менее 0,5 мм, вызывающего расплавление соединяемых поверхностей. Наиболее удобно использовать пламя горения водорода в кислороде, температура которого 3400 °С. Стехиометрическое соотношение этих газов обеспечивают электролитическим разложением дистиллированной воды в газообразователе, входящем в состав установки для сварки. Для увеличения производительности газовыделения (разложения воды) в воду добавляют гидроксид калия.

Горелка – тонкое сопло в виде медной трубки с внутренним диаметром 0,3 – 0,4мм.

Поскольку водород и кислород образуются из воды в точном химическом соотношении, происходит полное сгорание водорода в кислороде. Продуктом реакции является только вода.

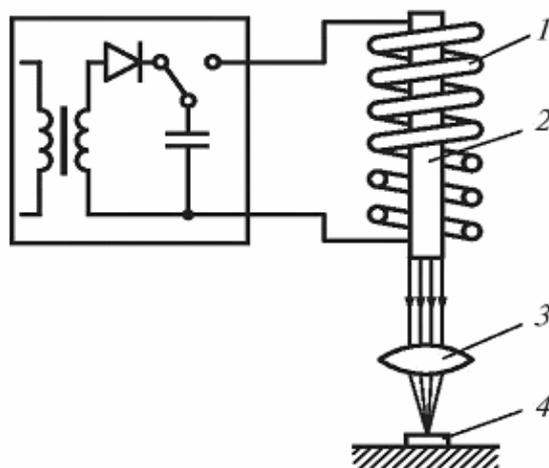
Газ можно обогащать парами метанола для повышения теплотворной способности пламени.

Максимальная плотность мощности –  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

**Лучевая микросварка** основана на сильном локальном нагреве соединяемых материалов или сфокусированным лучом лазера (лазерная сварка), или пучком электронов (электроннолучевая сварка), или

потоком ионов (плазменная сварка). При этих способах сварки плавлением желателен лишь теплофизический контакт между деталями в зоне сварки.

В качестве источников излучения используют газоразрядные лампы высокого давления, отличающиеся зоной горения, близкой к точечной, которую удобно фокусировать на малоразмерный объект сварки (рис. 5.19).



**Рис. 5.19.** Принцип лазерной сварки:  
1 – источник света; 2 – активное тело лазера;  
3 – система линз; 4 – вывод микросхемы

Вместе с тем их спектр излучения хорошо согласуется со спектром поглощения большинства металлов и расходится со спектром поглощения диэлектриков, что очень удобно для пайки компонентов на печатных платах.

Дозирование энергии производят с помощью фотозатворов.

Важные преимущества лучевой микросварки:

- отсутствие непосредственного контакта с зоной пайки;
- достаточно большое расстояние до объекта пайки;
- возможность сварки через прозрачные стенки и среды, что необходимо для условий вакуумной гигиены.

Лучевая сварка *лазерным лучом* отличается гораздо большей плотностью энергии – до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. При этой плотности энергии испаряются все применяемые для соединений металлы.

Благодаря незначительной дивергенции (расхождению) лазерного луча его энергию можно сконцентрировать в пятно диаметром до 10 мкм. Так как импульс лазера можно сделать очень коротким, про-

цесс нагрева элементов сварки сводится к адиабатическому, то есть потери на теплоотдачу во внешнюю среду во время сварки отсутствуют.

Энергия светового луча адсорбируется на поверхности свариваемых деталей и переходит в тепло. Глубина, в которой поглощается энергия, небольшая – всего 5 – 50 нм. В процессе интенсивного нагрева выделяются пары сублимирующих металлов, которые затеняют луч для дальнейшего расплавления соединения. Поэтому часто излучение лазера модулируют, создавая паузы для рассасывания паров.

Разновидности форм соединений при сварке планарных выводов на контактные площадки печатных плат (рис. 5.20):

- концевая сварка – лазерный луч расплавляет конец вывода и частично контактную площадку;
- центральная сварка – лазерный луч направлен только на вывод и должен его проплавить;
- сварка с пробивкой отверстия – лазерный луч проплавляет отверстие и через него – часть контактной площадки.



*Рис. 5.20.* Разновидности монтажной лазерной сварки

Ремонтно – пригодной является концевая сварка, для этого она и предназначена. Но попасть лучом в край вывода очень сложно. Позиционирование легче осуществить при центральной сварке.

Типичные режимы лазерной сварки:

- энергия импульса – 1 – 2 Бг/с;
- длительность импульса – 4 – 8 мс;
- диаметр пятна нагрева – 200 мкм.

Серьезным недостатком лучевой сварки и пайки является недоступность нагрева J-выводов и BGA-компонентов.

## 5.4. Склеивание

### Клеи.

Механизмы отверждения клеев можно классифицировать следующим образом:

- высыхание растворов клеящих материалов;
- анаэробная реакция клеев, для которых кислород воздуха является ингибитором реакции полимеризации;
- полимеризация за счет поглощения актиничного (высокоэнергетического) облучения: ультрафиолетового, электронного потока, радиационного облучения;
- анионные реакции (цианоакрилаты);
- отверждение активаторами (модифицированные акрилы).

Соединение за счет растворения склеиваемых поверхностей: простой метод, который использует составы для растворения соединяемых термопластичных частей. Пример типичного в применении соединения – склеивание полихлорвиниловых трубок с термопластичными наконечниками в набор трубок. В то время как сварка с помощью растворителей обладает рядом преимуществ, будучи быстрым, недорогим и простым способом соединения, растворители имеют некоторые ограничения. Так как метод основывается на растворении материалов, то реактопласт, стекло и металл не могут быть соединены вместе этим методом. Большие зазоры трудно заполнить, а различные типы полимеров не могут быть соединены друг с другом. Кроме того, передозировка при использовании растворителя может привести к растрескиванию некоторых аморфных пластмасс. Галогеновые растворители типа этилендихлорида и метил енхлорида могут наносить вред окружающей среде. Некоторые растворители очень огнеопасны; некоторые рассматриваются как потенциальные канцерогенные вещества. Персонал, работающий с этими веществами, должен быть защищен от вдыхания паров растворителей.

При полимеризационном склеивании клеевое соединение не имеет вышеперечисленных недостатков. Способность соединять различные материалы, например, термопластики, термореактивные пластмассы, стекло и металл является важным преимуществом. Клеящие вещества хорошо заполняют зазоры и способны формировать герметичное уплотнение между двумя поверхностями. Так как клей является жидкостью, то он должен быть преобразован в твердое вещество

посредством процесса отверждения, например, теплотой, влажностью, светом, поверхностным иницированием или смешиванием реактивных компонентов.

Большинство клеев – реактивные полимеры. Они переходят из жидкого состояния в твердое за счет различных реакций полимеризации (например, эпоксидные композиции) и поликонденсации (фенолоальдегиды), отверждения за счет соединения с атмосферной влагой (силиконы, уретаны) или кислородом воздуха (олифы).

Терморреактивные полимеры в процессе отверждения проходят три фазы:

*стадия А* – исходные продукты полимеризации смешаны и готовы вступить в реакцию при нагреве. Без нагрева реакция тоже идет, но медленно. Как правило, исходная смесь растворена в растворителях, замедляющих взаимодействие исходных продуктов;

*стадия В* – из исходной смеси удалены растворители; продукты вступили в реакцию полимеризации, но она находится только в начальной стадии. В этой стадии продукты еще способны растворяться, плавиться, формоваться. Без растворителя они представляют собой сухие продукты, способные к затариванию и транспортировке;

*стадия С* – реакции полимеризации завершены и продукты более не способны пластически менять форму, плавиться, растворяться. Продукт в стадии *С* теряет способность к переработке. Его формы устойчивы. При нагреве они только деструктурируются (разрушаются, горят).

Клеи, если они поставляются в готовом виде, находятся в стадии *В*, и для отверждения их подвергают нагреву или УФ-облучению.

Анаэробные клеи – это однокомпонентные материалы, которые отверждаются при комнатной температуре в условиях отсутствия контакта с кислородом. Жидкий компонент отверждения остается неактивным до тех пор, пока он находится в контакте с атмосферным кислородом. Если клей лишен доступа атмосферного кислорода, например, при соединении деталей, происходит быстрое отверждение, особенно при одновременном контакте с металлом. Это отверждение может быть представлено следующим образом: при прекращении поступления атмосферного кислорода формируются свободные радикалы под действием ионов металла (Си, Fe).

**Назначение клеев в сборочно-монтажных процессах.** Клеящие составы для поверхностного монтажа предназначены для закрепления компонентов на печатных платах. Клеи должны обладать приемле-

мыми тиксотропными и реологическими свойствами, которые позволили бы производить их нанесение на высоких скоростях (порядка 40 000 точек в час) с использованием высокоскоростного дозирующего оборудования, исключающего загрязнение контактных площадок, образование тянущихся нитей и пропуск точек. После нанесения на поверхность плат клеи должны сохранять устойчивую форму в виде точек для закрепления широкого диапазона компонентов различного размера и массы. Требования к клеям применительно к технологиям поверхностного монтажа:

До отверждения:

- порции клея быть соизмеримы с очень малыми компонентами, такими как 0402 и 0603. Для этого они требуют строгого гранулометрического контроля, который возможен при использовании специальной технологии смешивания, обеспечивающей нужную дисперсию и предотвращающей закупорку наконечника дозатора;
- порции клея, не прошедшие термическую обработку, должны обладать достаточной удерживающей способностью (прочностью неотвержденного материала), достаточной для сохранения правильного положения больших компонентов относительно контактных площадок;
- неотвержденный клей не должен абсорбировать влагу из атмосферы.

После отверждения:

- клеевое соединение должно быть достаточно прочным, чтобы удерживать компоненты различной формы, размера и массы на различных монтажных подложках с различными покрытиями, включая органическое защитное покрытие (OSP);
- клеи должны сохранять прочность клеевого соединения в процессе пайки волной припоя, при котором температура материала может достигать 270 °С.

Клеи должны обладать хорошими электроизоляционными характеристиками, в том числе во влажной среде, для предотвращения электромиграции и коррозии, приводящих к отказу изделий.

## **5.5. Непаяные методы неразъемных соединений**

Непаяные методы соединений достаточно распространены, поэтому их нельзя обойти вниманием. Все, кто знаком с автомобильной

электроникой, с прокладкой сетей, с вычислительной техникой и средствами коммуникаций, хорошо знают и используют в своей практике методы обжима контактов, в экспериментальных лабораториях активно используют быстро сменяемые условно неразъемные соединения для создания макетов.

Рынок предлагает широкий инструментарий для реализации соединений, условно называемых непаяными.

Наиболее распространенные непаяные соединения: соединения скручиванием и намоткой, под зажим, соединения обжатием (самое распространенное), соединение впрессовыванием контактных штырей в металлизированные отверстия (Press-Fit), соединения проводящими пастами.

К группе непаяных соединений относят все неразъемные соединения, образующиеся за счет холодной деформации стыков соединяемых элементов. Усилия вдавливания этих элементов друг в друга с образованием герметичной зоны металлического контактирования – обязательное условие образования прочного и надежного соединения.

В силовой электронике, в электротехнических сетях непаяные соединения широко распространены: практически все силовоточные соединения выполняются или скрутками, или зажимом под винт. Алюминиевые провода, имеющие прочную окисную пленку, скручивают только в высоковольтных силовоточных линиях. В этих условиях в линии достаточно напряжения и мощности, чтобы окисная пленка пробилась, а зона контакта расплавилась с образованием сварного соединения.

Для слаботочной аппаратуры, где малые токи и напряжения не способны улучшить «плохой» контакт, электрические соединения изначально не должны иметь разделительных слоев из окислов и загрязнений. Это достигается холодной пластической деформацией стыков соединений, так что при этой деформации пленки окислов раздвигаются, обнажая чистый металл. Такое состояние сжатия должно удерживаться, чтобы обеспечить герметичность (газонепроницаемость) стыков для предотвращения окисления и нарушения металлической проводимости.

Преимущества всех непаяных соединений состоят в следующем:

- отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения, что является в ряде случаев решающим преимуществом;
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
- экономичность;
- простота ремонта – не нужен нагрев;

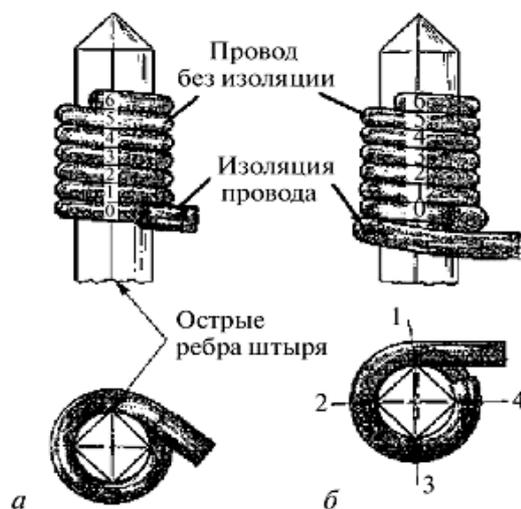
- гигиеничность в производстве (нет ни флюсов, ни припоев);
- высокая надежность.

Наиболее характерным для непаяных соединений с точки зрения разрешения проблем надежности являются соединения методом накрутки.

**Монтаж соединений накруткой** предназначен для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штыревых выводов. Монтаж накруткой:

- исключает применение припоев и флюсов;
- повышает надежность соединений по сравнению с паяными при механических и климатических воздействиях;
- ускоряет процесс электрического монтажа аппаратуры;
- создает условия для его автоматизации.

**Контактное соединение накруткой** – соединение неизолированного провода (участка провода) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием (рис. 5.21).



**Рис. 5.21.** Соединение накруткой провода:  
*а* – регулярная накрутка, *б* – модифицированная накрутка

Электрический контакт возникает в зонах контакта провода с острыми кромками вывода. Натяжение провода при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавливанию провода в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого соединения. Возможно соединение накруткой с применением провода с тонкой изоляцией. Тогда изоляция прорезается острыми кромками вывода.

Соединение накруткой должно удовлетворять следующим требованиям:

- минимальные номинальное и переходное сопротивления;
- газонепроницаемость для исключения коррозии;
- сумма площадей зон контакта должна быть больше поперечного сечения провода;
- электрическая стабильность во времени при механических и климатических воздействиях.

Эти требования обеспечиваются выбором соответствующих материалов вывода и провода, конструкцией соединения и технологическими условиями его получения.

Материал вывода должен обладать достаточной пластичностью для образования поверхностей контакта в результате деформирования острых кромок. Необходима определенная упругость и прочность вывода для сопротивления скручиванию его в процессе навивки провода. От состояния поверхностного слоя материала зависят электрические параметры соединения. Для изготовления выводов применяют медь, латунь, плакированную сталь, никелево-серебряные сплавы, бериллиевую и фосфористую бронзы. Последние имеют наилучшие физико-механические свойства:

- высокий модуль упругости;
- низкое остаточное напряжение;
- коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения медного провода.

На выводы наносят покрытия из серебра, золота, олова или сплава олово-свинец, предохраняющие поверхности от окисления, способствующие процессу диффузии металлов и определяющие значения переходного сопротивления.

Выводы из латуни и бронзы, предназначенные для специальной электронной аппаратуры, гальванически покрывают золотом (3 – 6 мкм) с предварительным серебрением (9 – 12 мкм). Применяют серебрение (6 – 9 мкм) по никелевому покрытию (1 – 3 мкм). Для обычной аппаратуры выводы получают из меди с покрытием оловом или сплавом олово-свинец толщиной не более 35 – 40 мкм.

Для равнопрочности элементов соединений необходимо обеспечить равенство суммы площадей контакта провода со штырем и площади поперечного сечения провода. Это, как правило, обеспечивается 16 – 20 точками контактирования в зависимости от диаметра провода. Следовательно, соединение должно быть многовитковым.

Следует указать, что соединение, состоящее из 5 – 6 витков луженого медного провода, навитого на вывод из фосфористой бронзы с золотым или серебряным покрытием, имеет номинальное сопротивление 0,001 – 0,003 Ом. После электрических, механических и климатических испытаний оно увеличивается не более чем на 0,001 Ом. Переходное сопротивление контакта в накрутке составляет 0,0004 – 0,0008 Ом и после испытаний изменяется по закону, близкому к закону нормального распределения.

Большое значение в обеспечении электрической и механической стабильности соединения имеет процесс диффузии контактирующих металлов.

Напряжение в навитом проводе снижается в процессе эксплуатации на 20 – 50 % в зависимости от температурного воздействия. Диффузия металлов покрытия увеличивает механическую прочность и обеспечивает сохранение электрических параметров соединения во времени. Срок службы соединения накруткой при нормальных климатических воздействиях 15 – 20 лет.

Для накрутки применяют одножильный провод диаметром 0,17 – 1,2 мм. Провод большего диаметра требует увеличения усилия натяжения и использования более прочных выводов.

Вывод должен иметь минимум две острые кромки. В соответствии с этим условием применяют выводы с квадратной, прямоугольной, ромбовидной, двойной треугольной, U- и V-образной формой поперечного сечения. Наибольшее распространение получили квадратные и прямоугольные выводы, причем квадратные имеют ряд преимуществ при автоматизации монтажа накруткой.

U- и V-образные выводы обладают большей упругостью по сравнению с прямоугольными при одинаковой площади поперечного сечения. Их применяют в ламповых панелях и реле, а также для монтажа аппаратуры, работающей при температуре 120 – 180° С. При такой температуре напряжение в проводе в течение 3 ч снижается вдвое, а упругость вывода позволяет сохранить электрические и механические параметры соединения.

Для обеспечения сопротивления скручиванию при навивке площадь поперечного сечения вывода должна быть не меньше площади сечения провода. Обычно отношение диаметра жилы провода к стороне квадратного вывода составляет 0,5 – 0,6, а к стороне прямоугольного вывода – 0,3 – 0,5. Отношение сторон штыря прямоугольного сечения должно быть не более 1:3.

Длина вывода определяется следующим:

- 1) диаметром провода;
- 2) числом витков в соединении;
- 3) количеством соединений на выводе и составляет 12 – 38 мм.

Соединение накруткой должно быть самозапирающимся, чтобы провод не мог сойти со штыря.

При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное (немодифицированное), модифицированное и бандажное (см. рис. 5.21).

*Немодифицированное соединение* получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода.

*Модифицированное соединение* отличается от немодифицированного наличием 1 – 2 витков изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка провода при механических воздействиях (вибрации, смещениях вывода) за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта. Но габариты такого соединения увеличиваются по сравнению с обычными. Поэтому, когда шаг выводов для накрутки становится меньше 2,5 мм, применение модифицированного соединения затруднительно.

*Бандажное соединение* состоит из нескольких витков бандажной проволоки. Провод при накручивании захватывает и обжимает штырь и вывод (провод, вывод, шина и др.).

Наибольшее применение нашло модифицированное соединение, особенно в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. При малом шаге между выводами и больших сечениях монтажного провода применяют обычное соединение.

Бандажное соединение рекомендуется для образования контактных соединений с выводами навесных элементов, шинами питания и при использовании для монтажа многожильных проводов, не способных к накрутке.

Накрутку провода на штырь производят в следующей поверхности:

- выбирают оправку, соответствующую конфигурации штыря и размеру провода;
- нарезают провода заданных длин;
- укладывают провода разной длины в соответствующие ячейки кассы;
- очищают провода от изоляции на заданной длине;

– вставляют провода в отверстие оправки на глубину, определяемую длиной очищенного от изоляции провода (пока края изоляционной оболочки не натолкнутся на вход отверстия, куда вставляется провод);

– загибают провод вокруг втулки оправки, так чтобы он не закрывал отверстие, предназначенное для штыря. Свободный конец провода придерживают;

– по таблице соединений находят адрес штыря, с которого начинается цепь соединений;

– оправка с проводом насаживается на штырь, соответствующий началу цепи, и включается вращение оправки;

– находится второй адрес цепи, прокладывается провод между штырями по направлению ко второму адресу, и повторяются операции накрутки. Поскольку длина цепей разная, длина проводов также указывается в таблице соединений и выбирается из соответствующей ячейки кассы с проводами.

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления связей к общей для всех модификаций массе соединений. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10 %.

Соединения накруткой могут также успешно применяться и для изготовления паяных соединений, то есть опайванием накрученного провода. На одном штыре можно также разместить и паяное соединение многожильного провода, и накрученный одножильный провод. Пайка должна предшествовать накрутке.

Соединения накруткой хорошо сочетаются с технологией впрессовыванием штырей в отверстия. Тогда монтаж вообще обходится без процессов пайки или сварки. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются именно таким образом.

**Винтовое соединение.** В соединениях под винт усилие сжатия возникает при затяжке винта. Возникающий в винтовых соединениях запас упругости обеспечивает необходимое усилие для того, чтобы контактная поверхность не снизилась ниже определенного значения, при котором соединение теряет газостойкость. Винтовым способом можно соединять и алюминиевые провода, поскольку окисные пленки под вращающимся винтом разрушаются и герметизируются. Как и в любом соединении, необходимо упругой частью деформации сжа-

тия предотвратить релаксацию (текучесть) материалов конструкций. Поэтому целесообразно использовать соединительные элементы, изготовленные из фосфористой бронзы или твердой латуни.

## 5.6. Тест для проверки знаний

1. Из перечисленных способов пайки являются групповыми видами обработки:

- а) лазерная пайка;
- б) пайка погружением в расплав припоя;
- в) импульсная пайка;
- г) пайка волной припоя.

2. Хорошее смачивание поверхности металла припоем характеризуется значением краевого угла:

- а)  $\theta = 180^{\circ}$ ;
- б)  $\theta < 45^{\circ}$ ;
- в)  $75^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$ .

3. Процесс покрытия поверхностей соединяемых деталей тонкой пленкой припоя называется:

- а) сварка;
- б) лужение;
- в) пайка.

4. Технологический процесс соединения изделий, осуществляемый с помощью специальных веществ, которые вследствие взаимодействия с поверхностью изделий и изменения своего физического состояния способны при определенных условиях прочно их скреплять –

- а) пайка;
- б) склеивание;
- в) сварка.

5. При электромонтажных работах используются способы сварки:

- а) термокомпрессионная;
- б) газовая;
- в) ультразвуковая;
- г) диффузионная.

6. Какой из способов получения электромонтажных соединений обладает низкой термостойкостью:

- а) пайка;
- б) сварка;
- в) накрутка;
- г) склеивание.

7. Какой из способов получения электромонтажных соединений обладает наибольшей механической прочностью:

- а) пайка;
- б) сварка;
- в) накрутка;
- г) склеивание.

8. Какой из способов получения электромонтажных соединений не вызывает изменения структуры соединяемых материалов:

- а) пайка;
- б) сварка;
- в) накрутка;
- г) склеивание.

9. Процесс получения неразъемного соединения металлических изделий путем местного нагревания их до расплавления или тестообразного состояния без применения или с применением механического усилия:

- а) пайка;
- б) сварка;
- в) стежковый монтаж.

10. Припойная паста при поверхностном монтаже электрорадио-элементов является:

- а) флюсующим веществом;
- б) антикоррозионным покрытием;
- в) веществом для закрепления ЭРЭ перед пайкой.

11. Разъемными из перечисленных видов конструкционных соединений деталей ЭВС являются:

- а) соединение сваркой;
- б) болтовое соединение;

- в) соединение пайкой;
- г) винтовое соединение;
- д) соединение склеиванием.

12. К какой группе материалов относится серебро:

- а) легкопаяемые;
- б) среднепаяемые;
- в) труднопаяемые.

13. К какой группе материалов относится бронза:

- а) легкопаяемые;
- б) среднепаяемые;
- в) труднопаяемые.

14. К какой группе материалов относится алюминий:

- а) легкопаяемые;
- б) среднепаяемые;
- в) труднопаяемые.

## 6. СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

### 6.1. Принципы организации сборочного процесса

#### *Типы сборок ЭА*

В электронной промышленности существует шесть общих типов SMT сборки, каждому из которых соответствует свой порядок производства. Когда разработчик выбирает тип сборки, его целью должна быть минимизация числа операций, так как каждая операция может увеличивать промышленную стоимость. Существует специальный стандарт, в котором представлены основные виды сборок, разбитые по классам.

SMC и IPC документация по поверхностному монтажу на платы, IPC-7070, J-STD-013 и National Technology Roadmap for Electronic Interconnections включают следующую классификацию следующих схемы поверхностного монтажа:

- Тип 1 – монтируемые компоненты установлены только на верхнюю сторону или **interconnecting structure**.
- Тип 2 – монтируемые компоненты установлены на обе стороны платы или **interconnecting structure**.
- Класс А – только through-hole (монтируемые в отверстия) компоненты.
- Класс В – только поверхностно монтируемые компоненты (SMD).
- Класс С – смешанная: монтируемые в отверстия и поверхностно монтируемы компоненты.
- Класс Х – комплексно-смешанная сборка: through-hole, SMD, fine pitch, BGA.
- Класс Y – комплексно-смешанная сборка: through-hole, surface mount, Ultra fine pitch, CSP.
- Класс Z – комплексно-смешанная сборка: through-hole, Ultra fine pitch, COB, Flip Chip, TCP.

Операции, используемые при различных типах сборки:

- нанесение пасты и установка SMT компонентов на верхнюю сторону платы;
- нанесение пасты и установка SMT на нижнюю сторону платы;

- нанесение клея и установка SMT компонентов на нижнюю сторону платы с последующем его высыханием;
- автоматическая установка DIP компонентов;
- автоматическая установка координатных компонентов (такие как светодиоды и т.п.);
- ручная установка других компонентов;
- пайка волной или пайка инфракрасным излучением;
- промывка плат;
- ручная пайка компонентов.

### Тип 1В: SMT Только верхняя сторона

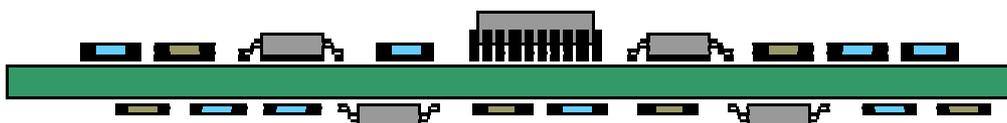


Этот тип не является общим, так как большинство разработок требует некоторых DIP компонентов. Его называют IPC Type 1B.

Порядок проведения процесса:

- нанесение припойной пасты, установка компонентов, пайка, промывка.

### Тип 2В: SMT Верхние и нижние стороны

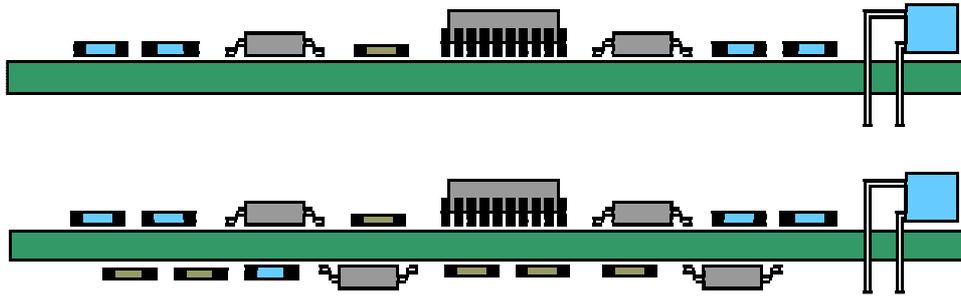


На нижней стороне платы размещаются чип-резисторы и другие компоненты небольших размеров. При использовании пайки волной, они будут повторно оплаиваться за счет верхнего (побочного) потока волны припоя. При размещении больших компонентов с обеих сторон типа PLCC увеличивают издержки производства, потому что компоненты нижней стороны должны устанавливаться на специальный токопроводящий клей. Данный тип называется IPC Type 2B.

Порядок проведения процесса:

- нанесение припойной пасты, установка компонентов, пайка, промывка нижней стороны;
- нанесение припойной пасты на верхнюю сторону печатной платы, установка компонентов, повторная пайка, промывка верхней стороны.

## Специальный тип: SMT верхняя сторона в первом случае и верхняя и нижняя во втором, но PTH только верхняя сторона



Этот метод установки используется, когда имеются DIP компоненты, в SMT сборке. Процесс включает размещение DIP компонентов, вставляемых в отверстия перед SMT пайкой. При использовании данного метода убирается лишняя операция пайки волной или ручной пайки PTH компонентов, что значительно уменьшает стоимость изделия. Первое требование – способность компонентов противостоять вторичной пайки. Кроме того, размеры отверстия платы, контактные площадки и геометрия трафарета должны быть точно совмещены, чтобы достичь качественной спаики. Плата должна иметь сквозные металлизированные отверстия и может быть односторонней или двухсторонней, то есть компоненты могут размещаться как с верхней, так и с нижней стороны.

Обязательным требованием при использовании данного метода является наличие сквозных металлизированных отверстий.

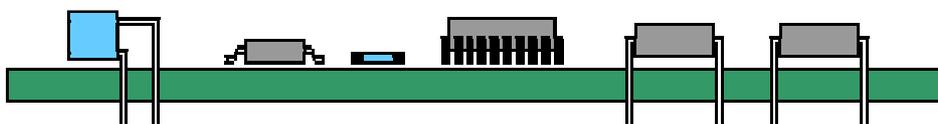
Порядок обработки односторонней печатной платы:

- нанесение припойной пасты, установка SMT компонентов, установка PTH компонентов, пайка, промывка верхней стороны.

Порядок обработки двухсторонней печатной платы:

- нанесение припойной пасты, установка SMT компонентов, повторное оплавление, промывка нижней стороны;
- установка PTH компонентов, пайка, промывка верхней стороны.

## Тип 1С: SMT только верхняя сторона и PTH только верхняя сторона

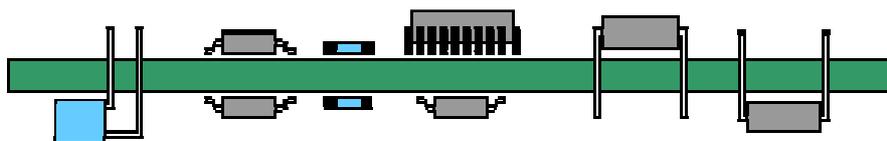


Данный метод является смешанной технологией сборки. Все модули SMT и PTH установлены на верхней стороне платы. Допускается установка некоторых компонентов, монтируемых в отверстия (PTH) на верхней стороне платы, где размещены SMT компоненты для увеличения плотности. Данный тип сборки называется IPC Type 1C.

Порядок проведения процесса:

- нанесение припойной пасты, установка, оплавление, промывка верхней части SMT;
- автоматическая установка DIP, затем осевых компонентов (такие как светодиоды);
- ручная установка других компонентов;
- пайка волной PTH компонентов, промывка.

### **Тип 2C: SMT верхняя и нижняя стороны или PTH на верхней и нижней стороне**

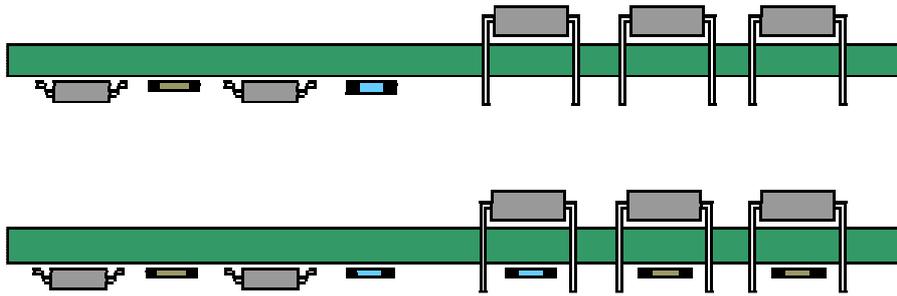


Установка поверхностно монтируемых и монтируемых в отверстия (DIP) компонентов с обеих сторон платы не рекомендуется из-за высокой стоимости сборки. Эта разработка может требовать большого объема ручной пайки. Также не применяется автоматическая установка PTH компонентов из-за возможных конфликтов с SMT компонентами на нижней стороне платы. Данный тип сборки называется IPC Type 2C.

Порядок проведения процесса:

- нанесение припойной пасты, установка, пайка, промывка верхней стороны SMT;
- нанесение специального токопроводящего клея через трафарет, установка, фиксация SMT;
- автоматическая установка DIP и осевых компонентов;
- маскирование всей нижней стороны PTH компонентов;
- ручная установка других компонентов;
- пайка волной PTH и SMT компонентов, промывка;
- ручная пайка нижней стороны PTH компонентов.

## Тип 2С: SMT только нижняя сторона или РТН только верхняя



Данный тип предполагает размещение поверхностного крепления с нижней стороны платы и РТН на верхней стороне. Он также является одним из очень популярных видов размещения, так как позволяет значительно увеличить плотность размещения компонентов. Тип имеет название IPC Type 2C.

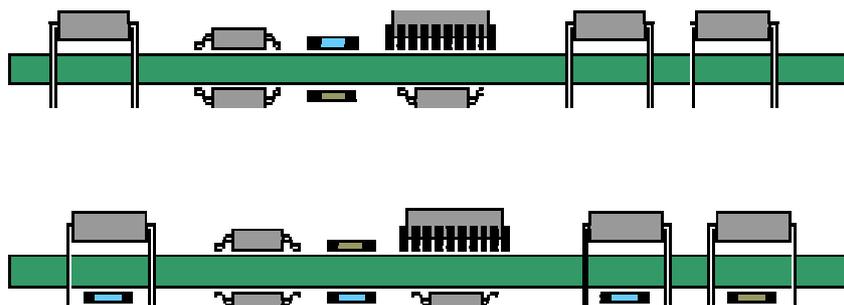
Порядок обработки (РТН конфликтов на нижней стороне нет):

- нанесение клея через трафарет, установка, высыхания клея на нижней стороне SMT;
- автоматическая установка DIP, затем осевых компонентов;
- ручная установка других компонентов;
- пайка волной РТН и SMT компонентов, промывка.

Альтернативный порядок обработки (РТН конфликтов на нижней стороне):

- автоматическая установка DIP, затем осевых компонентов;
- точечное нанесение клея (диспенсорный метод), установка, высыхания клея на нижней стороне SMT;
- ручная установка компонентов;
- пайка волной РТН и SMT компонентов, промывка.

## Тип 2У: SMT верхняя и нижняя стороны или РТН только на верхней стороне



Данный тип позволяет располагать поверхностно монтируемые компоненты с обеих сторон платы, а DIP компоненты только на верхней. Это очень популярный вид сборки у разработчиков, позволяющий разместить компоненты с высокой плотностью. Нижняя сторона SMT компонентов остается свободной от осевых элементов и ножек DIP компонентов. Например, нельзя размещать микросхемы между ножками DIP компонента.

Порядок проведения процесса (без размещения поверхностно монтируемых (SMT) между ножками монтируемых в отверстия (PTH) компонентов на нижней стороне платы):

- нанесение припойной пасты, установка, пайка, промывка верхней стороны части SMT;
- нанесение клея через трафарет, размещение, высыхание клея SMT на нижней стороне;
- автоматическая установка DIP, а затем осевых компонентов;
- ручная установка других компонентов;
- пайка волной PTH и SMT компонентов, промывка;

Альтернативный порядок проведения процесса (на нижней стороне платы поверхностно-монтируемые (SMT) компоненты размещены между ножек компонентов, монтируемых в отверстия (PTH)):

- нанесение припойной пасты, размещение, пайка, промывка верхней стороны части SMT;
- автоматическая установка DIP, затем осевых компонентов;
- точечное нанесение клея (диспенсорным методом), установка, высыхание клея на нижней стороне платы;
- ручная установка других компонентов;
- пайка волной PTH и SMT компонентов, промывка.

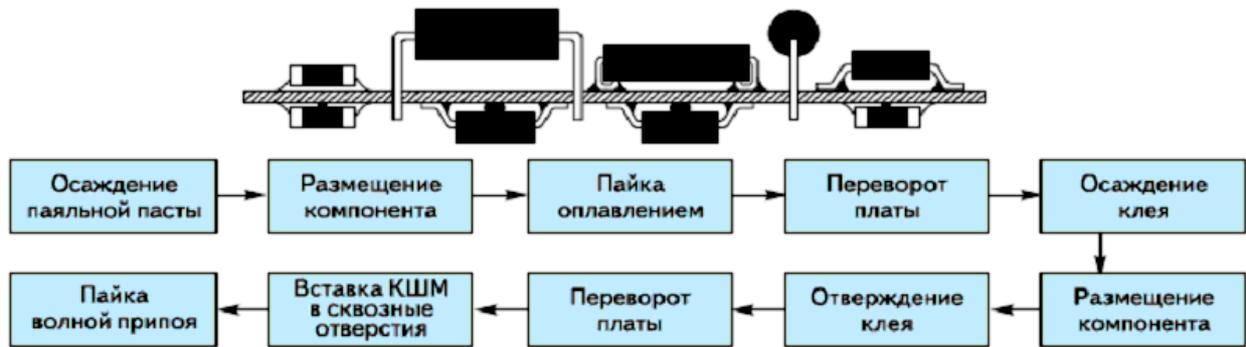
Технологические маршруты сборки печатных плат приведены на рис. 6.1 – 6.5.



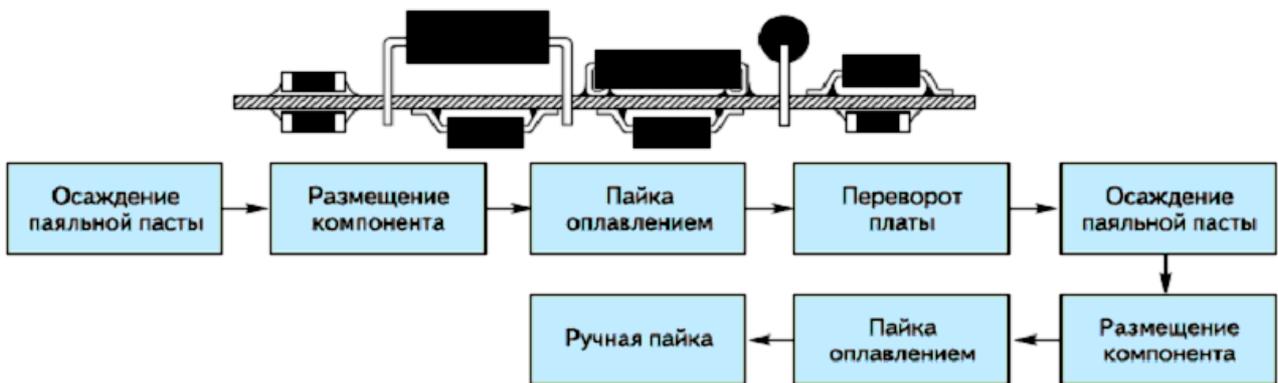
**Рис. 6.1.** Односторонняя сборка поверхностного монтажа для компонентов поверхностного монтажа, только пайка оплавлением



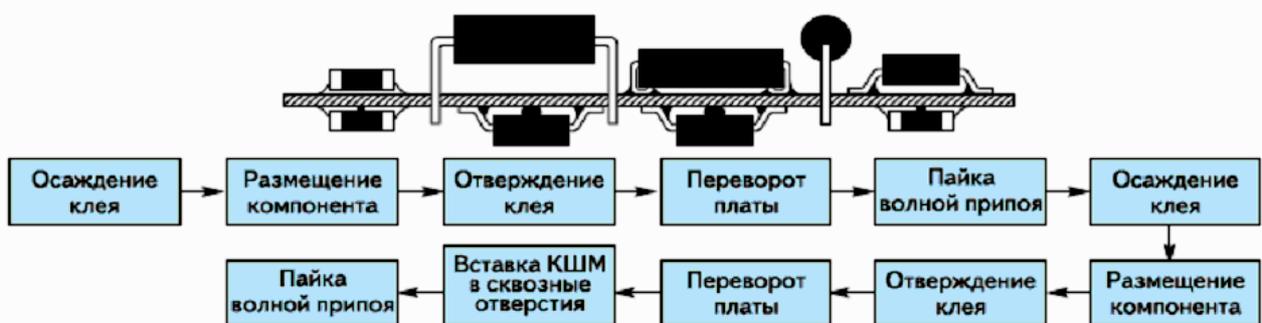
*Рис. 6.2.* Односторонняя сборка поверхностного монтажа, только пайка погружением



*Рис. 6.3.* Двусторонняя сборка с комбинированной технологией монтажа: пайка оплавлением и пайка погружением или волной припоя



*Рис. 6.4.* Двусторонняя сборка с комбинированной технологией монтажа: пайка оплавлением и ручная пайка



*Рис. 6.5.* Двусторонняя сборка с комбинированной технологией монтажа, только пайка погружением

## 6.2. Технология монтажа в отверстия

Технология монтажа в отверстия (Through Hole Technology, ТНТ), также называемая иногда штырьковым монтажом, является родоначальником подавляющего большинства современных технологических процессов сборки электронных модулей. Также существует ряд распространенных, но не совсем корректных названий данной технологии, например, DIP-монтаж (название происходит от типа корпуса – Dual In-Line Package – корпус с двухрядным расположением выводов, широко применяемого, но не единственного в данной технологии) и выводной монтаж (название не совсем корректно, поскольку монтаж компонентов с выводами применяется и во многих других технологиях, в т. ч. в поверхностном монтаже).

Фактически данная технология появилась вместе с началом использования монтажных плат как метода выполнения электрических соединений. До этого монтаж компонентов осуществлялся пространственно путем крепления выводов компонентов к металлическим контактам на конструктивных элементах устройства либо соединением выводов компонентов между собой. Применение монтажных плат перенесло конструирование узлов из пространства на плоскость, что значительно упростило как процесс разработки конструкций, так и изготовление устройств. Появление печатного монтажа в дальнейшем привело к революции в технологичности и автоматизации проектирования электронных устройств.

Технология монтажа в отверстия, как следует из названия, представляет собой метод монтажа компонентов на печатную плату, при котором выводы компонентов устанавливаются в сквозные отверстия платы и припаиваются к контактными площадкам и/или металлизированной внутренней поверхности отверстия.

Широкое распространение технология монтажа в отверстия получила в 50-х – 60-х годах XX века. С тех пор значительно уменьшились размеры компонентов, увеличилась плотность монтажа и трассировки плат, было разработано не одно поколение оборудования для автоматизации сборки узлов, но основы конструирования и изготовления узлов с применением данной технологии остались неизменными.

В настоящее время технология монтажа в отверстия уступает свои позиции более прогрессивной технологии поверхностного монтажа, в особенности, в массовом и крупносерийном производстве, бытовой электронике, вычислительной технике, телекоммуникациях,

портативных устройствах и других областях, где требуется высокая технологичность, миниатюризация изделий и хорошие слабосигнальные характеристики.

Тем не менее, есть области электроники, где технология монтажа в отверстия по сей день является доминирующей. Это, прежде всего, силовые устройства, блоки питания, высоковольтные схемы мониторов и других устройств, а также области, в которых из-за повышенных требований к надежности большую роль играют традиции, доверие проверенному, например, авионика, автоматика АЭС и т.п.

Также данная технология активно применяется в условиях единичного и мелкосерийного многономенклатурного производства, где из-за частой смены выпускаемых моделей автоматизация процессов неактуальна. Эта продукция, в основном, выпускается небольшими отечественными предприятиями как для бытового, так и для специального применения.

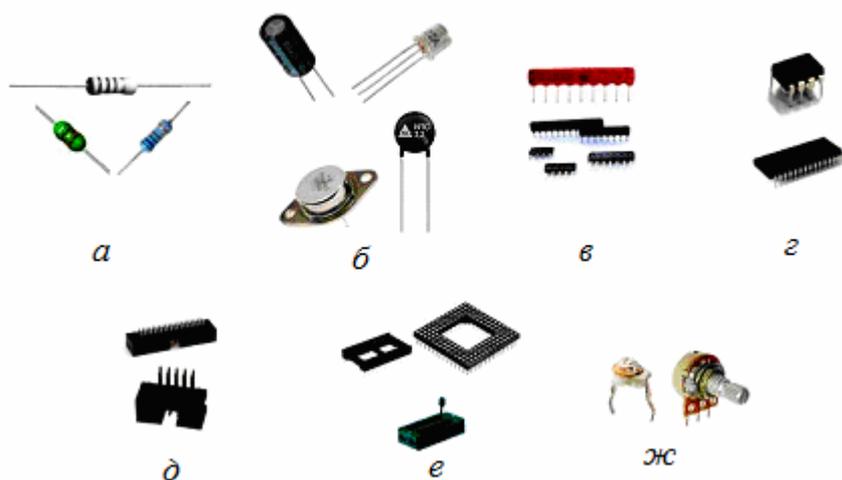
Некоторое время назад имела место ситуация, когда выбор технологии монтажа в отверстия мог быть продиктован применяемыми компонентами. Некоторые компоненты попросту не выпускались в корпусах для поверхностного монтажа. Особенно это было актуально для нашей страны, поскольку новинки доходили до нас с опозданием. Сейчас эта ситуация существенно изменилась, и большинство компонентов общего применения можно найти либо в обоих исполнениях, либо в исполнении для поверхностного монтажа, поскольку он считается более прогрессивным. Исключение составляют силовые компоненты, электромеханические реле, разъемы, большие переменные резисторы, панели ИМС и некоторые другие компоненты, однако многие из них уже имеют аналоги для монтажа на поверхность. Существует неоднозначное отношение к надежности электролитических конденсаторов для поверхностного монтажа, а их танталовые аналоги достаточно дороги, поэтому часто на платах среди поверхностного монтажа можно встретить штыревые алюминиевые электролитические конденсаторы. Все это обуславливает необходимость применения технологии смешанного монтажа (одновременного наличия на ПП SMT- и THT-компонентов).

Технология установки THT-компонентов относительно проста, хорошо отработана, допускает ручные и автоматизированные методы сборки, хорошо обеспечена сборочным оборудованием и технологическим оснащением. В данной статье кратко рассмотрены основные операции THT-технологии.

## Компоненты

ЭК, используемые в технологии монтажа в отверстия, по типу корпуса можно разбить на следующие основные группы (примеры корпусов приведены на рис. 6.6):

- а) ЭК с осевыми (часто встречается обозначение axial, аксиальными) выводами;
- б) ЭК с радиальными выводами (radial);
- в) SIL, SIP (Single In-Line Package) – многвыводной корпус с однорядным расположением выводов;
- г) DIP (Dual In-Line Package) – корпус с двухрядным расположением выводов;
- д) разъемы, слоты;
- е) панели для ИС, в том числе DIP; ZIF (Zero Insertion Force, панели с нулевым усилием вставки для штырьковых ИС); PGA (Pin Grid Array, панели для штырьковых ИС с матрицей выводов);
- ж) различные компоненты сложной формы.



**Рис. 6.6.** Примеры ТНТ-компонентов:

- а* – с осевыми выводами; *б* – с радиальными выводами;
- в* – в корпусах SIL; *г* – в корпусах DIP; *д* – разъемы;
- е* – панели для ИС; *ж* – ЭК сложной формы

Такое разделение компонентов прежде всего связано с особенностями технологии их монтажа. Так, например, осевые и радиальные выводы компонентов требуют формовки и обрезки, тогда как большинство других компонентов в этом не нуждаются. При формовке выводов и, как следствие, последующей установке компонентов с осевыми выводами они имеют дополнительную степень свободы

(вращение вокруг оси), поэтому их маркируют цветными кольцами, исключая установку «маркировкой вниз».

Также есть различия в механизмах захвата, базирования и фиксации разных групп компонентов, поэтому часто компоненты в разных корпусах устанавливаются каждый на своем оборудовании.

**Типичная последовательность операций.** Технологический процесс сборки ПП на основе ТНТ-технологии состоит из следующих типовых этапов:

- подготовка выводов ЭК (формовка, обрезка), часто совмещается с автоматизированным монтажом;
- установка компонентов (ручная, автоматическая);
- пайка (волной припоя, ручная, селективная);
- отмывка (ультразвуковая, струйная).

На некоторых предприятиях сохранилась технология, при которой из-за проблем с покрытиями выводов и хранением компонентов подготовка выводов включала в себя предварительное лужение, однако современная технология этого не предусматривает благодаря качественной упаковке и покрытию выводов современных компонентов.

Ниже рассмотрены данные операции в порядке выполнения.

### **Подготовка выводов ЭК**

Выводы ЭК перед монтажом должны быть специальным образом подготовлены.

Цель подготовки:

- выравнивание (рихтовка) выводов (если требуется);
- обеспечение необходимого монтажного расстояния между выводами;
- зазора между ПП и компонентом (если требуется);
- фиксации ЭК на ПП при ручном монтаже либо до поступления платы в установку пайки.

Зазор обычно обеспечивается приданием выводам ЭК соответствующего изгиба – так называемого «опорного зига» (рис. 6.7, *а*); самофиксация ЭК на ПП перед групповой пайкой – особым изгибом части вывода, входящей в отверстие ПП – замка (рис. 6.7, *б*). Одновременное выполнение зига и замка носит название «зиг-замок».

Также возможно крепление ЭК следующими методами:

- обеспечением пружинения выводов;
- посадкой на клей (клей полимеризуется при комнатной температуре, при этом для стеклянных корпусов может понадобиться надева-

ние трубки на часть корпуса, контактирующую с адгезивом; также необходимо обеспечить достаточное количество клеевых точек для крепления тяжелых ЭК);



**Рис. 6.7.** Обеспечение с помощью формовки выводов ЭК:

*а* – зазора между ПП и компонентом (опорный зиг);

*б* – самофиксации ЭК на ПП (замок)

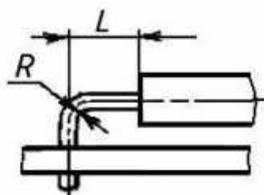
- подпайкой выводов (применяется при ручном монтаже – например, подпайка двух диагонально расположенных выводов разъема);
- подгибкой (полной либо частичной – на угол от 0 до 45° от плоскости ПП и только для выводов диаметром менее 0,7 мм (более – в технически обоснованных случаях); необходимо обеспечить минимально допустимое расстояние от загнутого вывода до соседних КП/выводов/проводников; следует осуществлять подгибку вдоль печатного проводника, если в конструкторской документации нет других указаний);
- с использованием различных держателей (хомутов, металлических скоб, клипс, зажимов).

Тяжелые элементы (например, трансформаторы) или элементы, подверженные механическим воздействиям (тумблеры, потенциометры, подстроечные конденсаторы), устанавливаются с помощью особых держателей. Такие держатели обеспечивают надежное механическое крепление соответствующих элементов к ПП и предотвращают обрыв и поломку выводов под воздействием механических нагрузок.

Формовку круглых или ленточных выводов элементов производят с помощью ручного монтажного инструмента либо специальных полуавтоматических устройств таким образом, чтобы исключались механические нагрузки на места крепления выводов к корпусу. При формовке выводов не допускается их механическое повреждение, нарушение защитного покрытия, изгиб в местах соединения вывода и корпуса, скручивание относительно оси корпусов, растрескивание стеклянных изоляторов и пластмассовых корпусов.

Основные ограничения (рис. 6.8) накладываются на размер от корпуса ЭК до оси изогнутого вывода ( $L$ ) и внутренний радиус изгиба выводов ( $R$ ). Минимальный размер  $L$  в зависимости от типа ЭК нахо-

дится в пределах 0,75 – 4 мм (но не менее  $2 \cdot D$  выводов); размер  $R$  зависит от диаметра вывода и составляет минимум 0,5 – 1,5 мм (но не менее  $(1-2) \cdot D$  выводов). Также на выводах не должно быть деформаций и утонений, превышающих 10 % от диаметра, ширины либо толщины вывода.



**Рис. 6.8.** Основные параметры формовки

Несоблюдение данных рекомендаций может привести к образованию избыточных напряжений в месте крепления вывода к корпусу ЭК и в области изгиба вывода и, как следствие, появлению в этих местах трещин и, возможно, обрывов, в особенности при механических воздействиях на собранный узел. Не допускается изгибать жесткие выводы (лепестки) транзисторов и диодов средней и большой мощности, так как это может привести к растрескиванию их стеклянных изоляторов и нарушению герметичности корпусов.

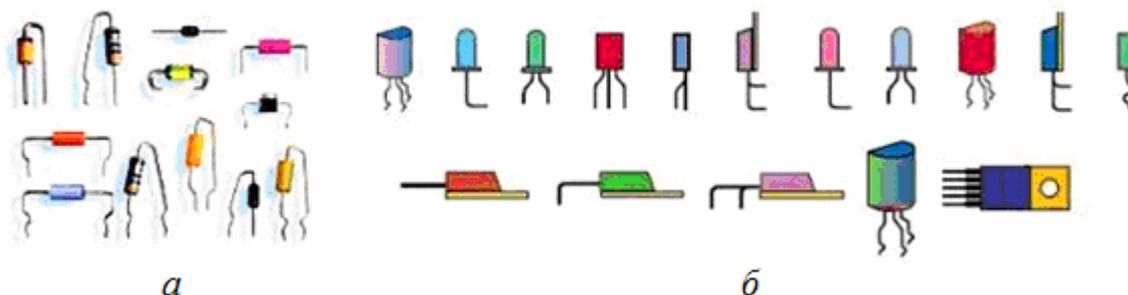
Расстояние от корпуса до места пайки должно быть не менее 2,5 мм, если не приняты меры к дополнительному теплоотводу в процессе пайки.

Не осуществляют формовку, подгибку и обрезку при установке многовыводных ЭК (ИС в DIP-корпусе и пр.). Для них может проводиться исключительно рихтовка (выравнивание) выводов, если в этом есть необходимость.

Устройства формовки выпускаются с механическим и электрическим приводом подачи ЭК, а также механическим либо пневматическим – самого устройства формовки. Загрузка компонентов производится из лент, трубчатых кассет, россыпи. Геометрические параметры формовки регулируются; установки оснащаются сменными формовочными матрицами. Специальная конструкция матриц формовочных устройств обеспечивает отсутствие избыточных напряжений и зазубрин на материале в месте изгиба вывода. Примеры отформованных выводов различных ТНТ-компонентов приведены на рис. 6.9.

Производительность формовочного оборудования в автоматическом режиме при загрузке из лент, как правило, составляет

до 40000 ЭК/час для ЭК с осевыми выводами и 20000 ЭК/час – с радиальными; при загрузке ЭК из россыпи – 7000 и 3000 ЭК/час соответственно. При ручной подаче ЭК типовая производительность – около 1500–3000 ЭК/час.



**Рис. 6.9.** Примеры формовки выводов ЭК:  
а – с осевыми и б – с радиальными выводами

Существуют автоматические счетчики выводных компонентов, вклеенных в ленту (до 100 ЭК/с).

### Установка компонентов

Установка ТНТ-компонентов осуществляется с применением специальных монтажных автоматов, автоматизированных рабочих мест (АРМ) либо полностью вручную.

**Автоматизированный монтаж.** Существует два основных вида автоматизированного оборудования по критерию выполняемых функций:

- *собственно монтажные автоматы (inserter, от insert – вставлять), осуществляющие вставку штырьковых выводов ЭК в отверстия на ПП, их подрезку и подгибку (опционально) с обратной стороны ПП с помощью монтажных, гибочных и отрезных головок соответственно; делятся на группы по типу компонентов (Axial (Radial) inserter – автомат для монтажа ЭК с осевыми (радиальными) выводами, DIP inserter – автомат для монтажа ЭК в корпусах DIP, Odd-Form inserter – автомат для монтажа ЭК в корпусах сложной формы);*

- *секвенсеры (sequencer) – автоматы формирования последовательности устанавливаемых ЭК (то есть подготовки программной ленты, содержащей последовательно вклеенные ЭК разных типоразмеров в порядке их последующего монтажа; осуществляется путем переклейки ЭРЭ из первичных лент по программе).*

Многие монтажные автоматы одновременно обладают функцией секвенсеров, то есть могут работать непосредственно из первичных лент без необходимости подготовки программной ленты.

Следует отметить, что на современном рынке, наряду с выпущенным в 90-е гг. и продающимся сейчас б/у (в т.ч. восстановленным) оборудованием для выводного монтажа (различные модели автоматов Dynapert, Panasert, Amistar, Universal Instruments и пр.), присутствуют современные модели различных производителей, уделяющих существенное внимание развитию технологии автоматизированного монтажа в отверстия. Многие опции автоматов, ранее доступные лишь для SMT-монтажа, стали неотъемлемой частью современного сборочного оборудования для ТНТ-технологии. Следящие приводы перемещений по координатным осям, управление с помощью ПК, загрузка питателей без остановки работы, контроль правильности подачи ЭК, одновременная сборка более чем одной ПП, автоматическая загрузка/выгрузка ПП, коррекция погрешностей проводящего рисунка ПП, автоматическая смена захватных устройств – все это доступно в настоящее время и для штырькового монтажа. Применяются системы технического зрения для оптической коррекции положения ЭК и считывания реперных знаков. Сборочные головки автоматов оснащены преимущественно механическими захватами с сервоприводом. Стандартные углы поворота ЭК кратны 90°, однако, как правило, существует возможность оснащения автомата сборочной головкой со свободным углом поворота.

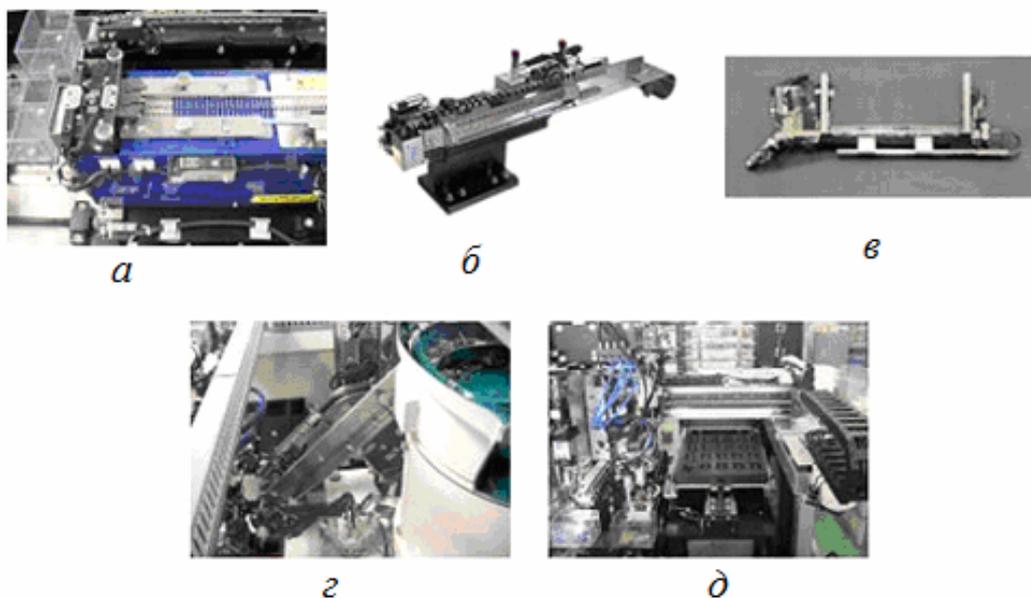
Ряд автоматов обладает способностью устанавливать на ПП проволочные перемычки (jumpers), нарезая их непосредственно перед монтажом из непрерывного прутка.

Паспортная производительность современного монтажного оборудования достигает 20 000 – 40 000 ЭК/час при уровне ошибок монтажа 100 – 200 ppm (для простых ЭК). Производительность при монтаже ЭК сложной формы может быть меньше на порядок. Основными параметрами оборудования, помимо перечисленных выше, являются геометрические характеристики ЭК и ПП, которые подлежат установке:

- диапазон либо дискретный набор расстояний между выводами (рядами выводов);
- максимальный диаметр и высота ЭК (в зависимости от его типа – с осевыми либо радиальными выводами);
- диапазон диаметров выводов;
- диапазон габаритных размеров ПП.

**Загрузочные устройства.** Для оснащения автоматов монтажа ТНТ-компонентов используются загрузочные устройства (питатели) следующих основных типов (рис. 6.10):

- ленточные для ЭК с радиальными и осевыми выводами – предназначены для пошаговой подачи ЭРЭ, вклеенных в ленту; лента может быть намотана на бобину (Tape and Reel) или упакована в «магазин» -коробку (Ammo Pack);



**Рис. 6.10.** Примеры питателей для ТНТ-компонентов:

*а* – с осевыми выводами; *б* – с радиальными выводами;

*в* – из трубчатых кассет; *г* – вибробункерный;

*д* – из матричных поддонов

- из трубчатых кассет для ИС в DIP-корпусе, компонентов сложной формы – с наклонным транспортным лотком и горизонтальные (для ЭК, которые не скользят свободно по наклонному лотку вследствие своих конструктивных особенностей – массы, формы корпуса либо выступающих острых выводов);

- вибробункерные для подачи различных ЭК из россыпи с возможностью их одновременной ориентации перед захватом;

- матричные (сотовые) для ЭК сложной формы – из матричных поддонов, магазинов.

Ряд моделей оборудования оснащается питателями с микропроцессорным управлением, а также устройствами их автоматической смены.

### ***Ручная и полуавтоматическая установка компонентов***

Данная операция выполняется на АРМах либо монтажных столах. В этих устройствах автоматизирована подача сборочной информации – места установки ЭК на ПП и его требуемой ориентации, а также может быть обеспечена автоматическая подача нужного лотка с компонентами устанавливаемого типоминнала, механизирован процесс фиксации ПП на монтажном столе. АРМы могут быть дополнительно оснащены устройствами формовки выводов ЭК. Такое оборудование дешево, но малопроизводительно (1000–2000 ЭК/ч). Существуют следующие варианты установки ЭК:

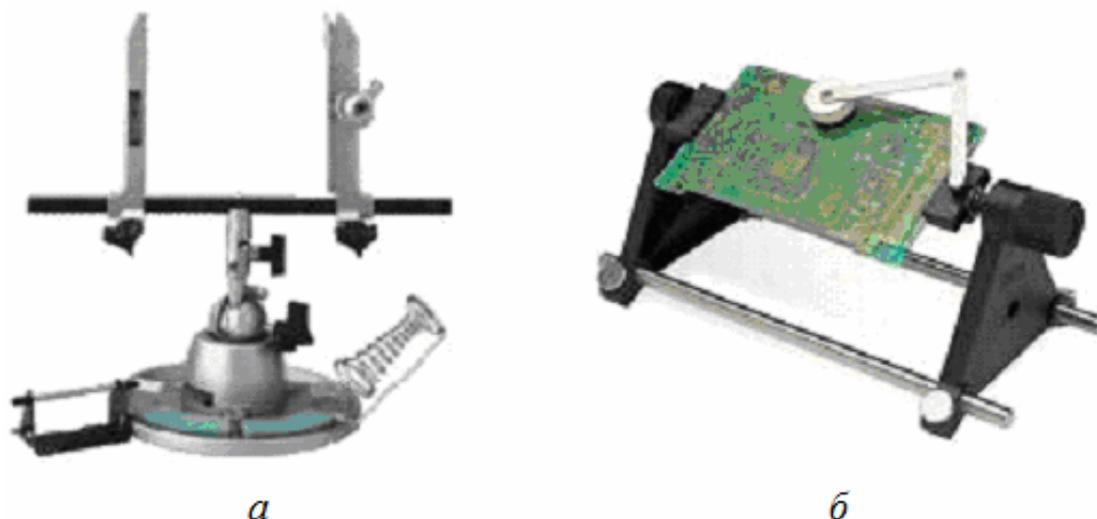
1. *С зазором* (вариант II по ОСТ4 010.030-81). При таком способе установки легче осуществить отмывку собранных узлов от остатков флюса, меньше перегрев ИС при пайке. Печатные проводники могут располагаться в этом случае под навесным элементом. При определенных условиях (при определенных спектрах воздействия) улучшается стойкость к вибро- и ударным воздействиям, передающимся по плате, поскольку воздействие демпфируется выводами. Тем не менее, увеличивается высота узла, меньше его устойчивость к прямым механическим воздействиям. Возможен отрыв КП от односторонней ПП при приложении значительного давления к ЭК сверху.

2. *Без зазора* (вариант I по ОСТ4 010.030-81). Элементы лучше сопротивляются механическим нагрузкам (в особенности – с дополнительным креплением за корпус скобой и т.д.), высота узла получается меньшей. Улучшается теплоотдача от компонента печатной плате, что часто применяется, когда использование радиатора нецелесообразно. Компоненты с радиальными выводами, уложенные на бок, рекомендуется устанавливать исключительно без зазора (в отдельных случаях – с технологическими прокладками под корпусом). Уменьшается длина выводов ЭК, что улучшает электрические характеристики устройства. Однако может быть затруднена отмывка собранного узла, а также необходимо обеспечить взаимную изоляцию ЭК и печатных проводников, металлизированных отверстий, проходящих под корпусом (например, с помощью изолирующих прокладок с клейкой их к корпусу ЭК и/или ПП).

3. *Вертикальная установка ЭК* (вариант III по ОСТ4 010.030-81) с осевыми выводами увеличивает плотность компоновки, однако снижает технологичность, повышает вероятность взаимного замыкания выводов, увеличивает высоту узла и делает внешний вид неопрят-

ным. При этом необходимо, чтобы угол наклона ЭК относительно вертикальной оси не превышал  $15^\circ$ . Типы установки компонентов регламентируется отраслевыми стандартами и стандартами предприятия. Хотя требования отраслевых стандартов не являются в настоящее время обязательными, их часто применяют в качестве рекомендации и исходных документов. Устанавливать ЭК следует таким образом, чтобы были различимы элементы их маркировки, в особенности касающиеся полярности, для обеспечения последующего контроля правильности монтажа.

Монтаж компонентов можно проводить, устанавливая по одному ЭК и далее осуществляя пайку путем поворота ПП, однако более технологичным является способ, когда ПП в процессе монтажа имеет жесткую фиксацию. Для закрепления печатных плат и их поворота в процессе монтажа применяют специальные приспособления. Существуют держатели ПП (рис.6.11), снабженные подпружиненным фиксатором платы, обеспечивающие возможность ее закрепления в горизонтальной, вертикальной, а также повернутой вокруг одной или двух осей плоскости, антистатическую защиту при монтаже и пайке.



**Рис. 6.11.** Примеры держателей ПП  
Источник: *a* – PanaVise Products, Inc. и *б* – Cooper Industries, LLC.

## **Пайка**

В рамках ТНТ-технологии преимущественно применяются три метода пайки: пайка волной, селективная и ручная.

### **6.3. Технология поверхностного монтажа**

Бурное развитие микроэлектроники, переход от интегральных схем (ИС) малой интеграции к большим ИС (БИС) и сверхбольшим ИС (СБИС) ставит производителей электронных узлов перед необходимостью радикального изменения метода сборки.

Увеличение количества выводов компонентов, уменьшение их размеров и расстояний между ними, изменение конфигурации выводов – все это делало более целесообразной установку многовыводных корпусов БИС и СБИС не в сквозные отверстия, а на контактные площадки, расположенные на поверхности печатных плат.

Перед рассмотрением самого технологического процесса сборки отметим один из наиболее важных этапов создания электронной техники, которому, к сожалению, уделяется недостаточно внимания. При разработке платы для монтажа на поверхности (в отличие от традиционной технологии) необходимо уделить внимание грамотной подготовке данных САД/САМ: в этом случае подготовка программы управления автоматическими установщиками и проектирование трафарета (в случае трафаретного нанесения припойной пасты) занимает считанные минуты.

Рассмотрим подробнее основные этапы сборочного процесса.

#### **Нанесение припойной пасты**

Особо оговорим, что техника нанесения адгезивов во многом полностью аналогична технике нанесения припойных паст (за исключением режимов нанесения). Диспенсорное нанесение адгезивов осуществляется при соотношении диаметра нанесенной точки к ее высоте в диапазоне от 1,5:1 до 5:1. Нужно отметить, что в 90 % случаев нанесения адгезивов используются диспенсоры. Производительность автоматических установок достигает 50000 точек/ч.

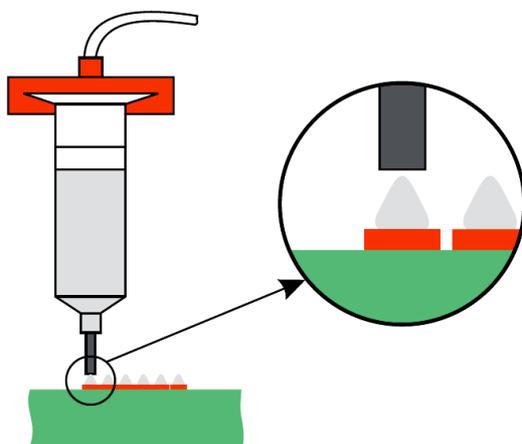
Технологические режимы трафаретного нанесения адгезивов (печать заливкой) схожи с трафаретным нанесением паст. Однако используемые для нанесения адгезивов трафареты обычно имеют толщину от 0,15 до 0,20 мм.

После установки компонентов на термоотверждаемый адгезив осуществляется запекание при температуре от 110 до 160 °С.

В дальнейшем будет описываться технология применительно к припойным пастам.

**Диспенсорное нанесение.** Диспенсорное нанесение является довольно часто встречающимся методом нанесения припойной пасты, применяемым в штучном и мелкосерийном производстве. К основным преимуществам метода относятся простота переналадки оборудования и отсутствие необходимости изготовления трафарета. Однако не стоит считать этот метод более экономически оправданным (по сравнению с трафаретной печатью). Стоимость банки пасты для трафаретного нанесения колеблется в пределах \$40 – 60, а одного шприца пасты – \$10 – 20.

В основе метода лежит диспенсор – шприц (рис. 6.12). Под действием сжатого воздуха осуществляется выдавливание пасты через иглу на поверхность контактных площадок печатной платы. Метод применим как для ручного нанесения, так и для автоматического.



**Рис. 6.12.** Диспенсорное нанесение пасты

Производительность ручной работы у опытных операторов достигает 120 точек в минуту. Производительность автоматического нанесения достигает 500 точек в минуту.

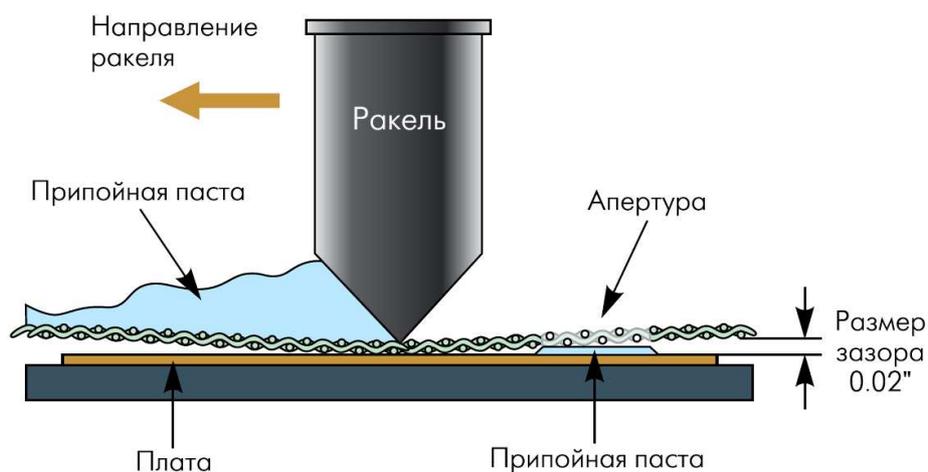
При ручном диспенсорном нанесении возможны два наиболее опасных вида брака:

- неточное дозирование – приводит к замыканиям после оплавления;
- разное количество припойной пасты на контактных площадках одного компонента – приводит к эффекту опрокидывания.

При автоматическом диспенсорном нанесении брак может возникнуть только по вине оператора (за исключением отказа оборудования по техническим причинам). Наименее вероятный брак – неточность нанесения в пределах погрешности оборудования. Поскольку

точность современных установок достаточна (а зачастую и избыточна) для процесса диспенсорного нанесения, погрешность размещения пасты на печатной плате не приводит к браку. Соответственно, брак может возникнуть только из-за неверной программной настройки оборудования по вине оператора.

**Трафаретная печать.** Метод трафаретной печати подразумевает нанесение пасты через апертюры (окна) в сетчатом (рис. 6.13) или цельнометаллическом трафарете припойной пасты на контактные площадки печатных плат.



**Рис. 6.13.** Трафаретное нанесение пасты

Техника трафаретной печати проста: при движении ракеля по поверхности трафарета припойная паста продавливается сквозь его апертюры на контактные площадки. Наиболее важной фазой этого процесса является продвижение пасты вдоль поверхности трафарета, так как наносимая масса должна перемещаться по поверхности трафарета с определенной силой прижатия ракеля и строго выверенной скоростью его перемещения. Трафарет и рапель должны быть чистыми, и паста должна иметь строго определенные характеристики для этой силы и скорости. Ошибки в этих параметрах приводят к таким бракам, как закоротки или непропаи. Практика показывает, что больше половины ошибок всего процесса сборки печатных плат приходится именно на процесс нанесения припойной пасты. Преимуществом метода трафаретного нанесения припойной пасты является то, что паста может быть нанесена слоем до 300 (в предельных случаях до 650) мкм с очень высокой точностью. В общем случае отверстия трафарета открывают лишь 50 – 90% площади контактных площадок,

что исключает нанесение излишнего количества припойной пасты (соответственно, данный метод, в отличие от диспенсорного нанесения, позволяет осуществлять высокоточный монтаж компонентов со сверхмалым шагом выводов).

При нанесении припойной пасты этим методом используются специальные установки. Такие установки на рынке паяльного оборудования делятся на два типа: лабораторные ручные рамы и полуавтоматические или автоматические принтеры. В ручных или полуавтоматических установках припойная паста вручную размещается на трафарете и затем прожимается сквозь него на контактные площадки платы с помощью ракеля.

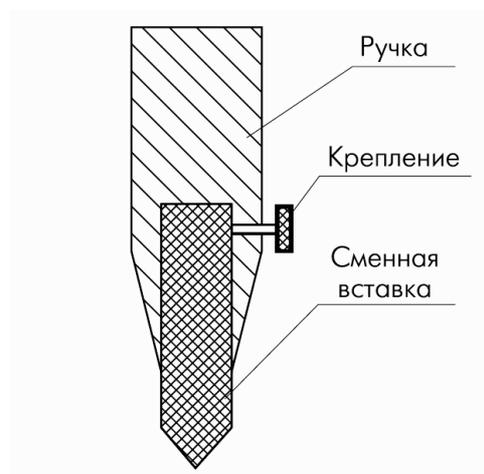
Автоматические установки работают без вмешательства оператора (тем самым существенно уменьшая возможность ошибки). Поскольку время нанесения пасты трафаретной печатью гораздо меньше времени установки компонентов на плату, современные установки (например, фирмы Samsung) имеют встроенные системы 20-контроля качества, что позволяет осуществлять контроль непосредственно во время нанесения. Таким образом, отпадает необходимость дополнительного промежуточного контроля.

**Расположение платы** на рабочем поле установки трафаретной печати целесообразно осуществлять диагонально. Только в этом случае обеспечивается равномерное нанесение пасты на контактные площадки 4-сторонней ориентации (например, для компонентов типа QFP). К тому же нужно отметить, что крепление платы осуществляется только по периферии, и в случаях, когда используются большие мультиплицированные заготовки, обеспечить достаточную жесткость системы «плата – трафарет» можно только за счет дополнительных опор. Встраиваемые в автоматические линии автоматы Samsung позволяют в автоматическом режиме в зависимости от размеров платы и расположения компонентов установить дополнительные опоры в рабочей области из внешнего магазина.

Еще одной особенностью при трафаретной печати является вибрационное движение ракеля. Возвратно-поступательные колебания, обеспечиваемые приводом перемещения ракеля, позволяют исключить (или значительно снизить) вероятность проявления эффекта частичного заполнения апертур трафарета. Кроме того, вибрационное движение ускоряет процесс нанесения пасты.

**Типы ракелей.** Общий вид составного ракеля показан на рис. 6.14. Износостойкость и твердость ракеля сильно влияют на ка-

чество нанесения припойной пасты (адгезива). В условиях массового производства состояние кромки ракеля подлежит тщательному контролю.



**Рис. 6.14.** Ракель

Для обеспечения высокого качества нанесения кромка ракеля должна быть острой и прямой.

Сила прижатия ракеля к трафарету также влияет на качество нанесения. Слабое прижатие может привести к пропускам либо к неровному заполнению апертур трафарета припойной пастой. Чрезмерное прижатие приводит к вычерпыванию пасты из больших апертур трафарета. Кроме того, может произойти вдавливание пасты между поверхностью трафарета и печатной платой. Проявление такого дефекта зависит от шероховатости мест среза материала в окнах трафарета (в случае механического изготовления трафарета).

На сегодняшний день европейские компании, работающие в данной отрасли (Samsung, Assemblion, Siemens и т. д.), используют два основных типа раделей: полиуретановые и металлические

По мере уменьшения шага выводов компонентов все большую популярность стали приобретать металлические ракели. Их изготавливают из нержавеющей стали или латуни в форме клина с углом от 30 до 45°.

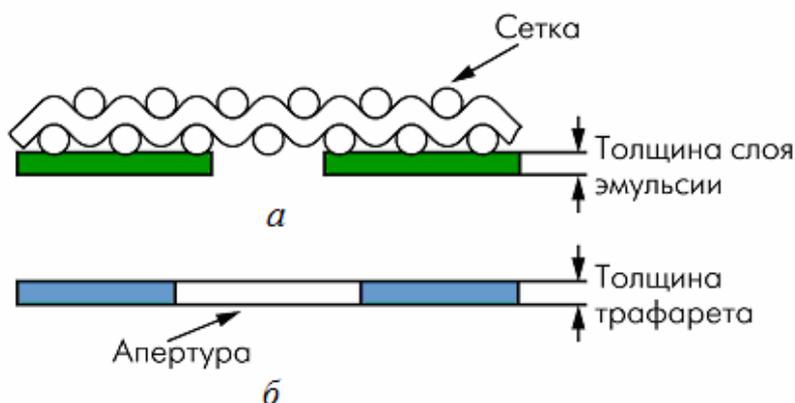
Благодаря отсутствию смены формы рабочей кромки во время нанесения пасты (благодаря высокой жесткости), металлические ракели не вызывают вычерпывания пасты из окон трафарета.

Однако стоимость металлических раделей гораздо выше полиуретановых, кроме того, они вызывают значительный износ трафарета.

Поскольку для различных компонентов требуется различное количество припойной пасты на контактных площадках платы, существует проблема подбора правильной толщины трафарета.

Для нанесения различного объема пасты на контактные площадки одной и той же платы поступают по-разному. Крупные фирмы производители используют трафареты сложной конфигурации. Остальные производители используют трафареты двойной толщины (система «трафарет на трафарете»). При использовании таких трафаретов паста наносится только каучуковыми (полиуретановыми) ракелями, кромка которых повторяет рельеф трафарета при нанесении.

**Типы трафаретов.** На сегодняшний день наибольшее распространение получили сеточные (рис. 6.15, а) и цельнометаллические (рис. 6.15, б) трафареты.



**Рис. 6.15.** Сетчатый – а и цельнометаллический – б трафареты

Металлические трафареты используются в случае больших заготовок плат при условии массового выпуска. Сеточные трафареты представляют собой натянутые на рамки мелкоячеистые сети (размер ячейки должен превышать размер частиц припоя).

Изготовление сетки трафарета осуществляется методами фотолитографии: после нанесения светочувствительной маски осуществляется экспонирование и проявление.

Важными параметрами металлического трафарета являются точность изготовления апертур и гладкость поверхностей.

На сегодняшний день существуют три основных способа создания трафаретов:

- 1 – химическое травление;
- 2 – лазерное вырезание;
- 3 – аддитивный способ.

**Химическое травление трафаретов.** Формирование окон в металлическом трафарете травлением называется химическим фрезерованием. На металлическую пластину наносят фоторезист с обеих сторон, экспонируют и проявляют его, после чего травят металл сквозь образовавшиеся окна. Поскольку при травлении наружные кромки металла подвергаются травлению в большей степени, форма отверстия при одностороннем травлении приближалась бы в сечении к трапеции. Поэтому используют технику двустороннего травления, при которой погрешность формы кромки окна существенно уменьшается.

Физическая природа процесса травления такова, что после травления кромка отверстия не получается гладкой. Существует ряд методов достижения требуемого качества кромки окна: метод электрополировки, гальваническое осаждение никеля.

Полировка всей поверхности трафарета может привести к тому, что шарики припоя в припойной пасте будут «отскакивать» от поверхности трафарета и образовывать пустую прослойку между поверхностью трафарета и кромкой ракеля. Поэтому стремятся полировать только кромки апертур. Нанесение никеля повышает качество нанесения пасты, однако слой никеля может существенно изменить размер апертур трафарета, что должно учитываться при его проектировании.

**Лазерное вырезание трафаретов.** Лазерное вырезание, как и предыдущий метод, относится к субтрактивным способам формирования изделий, однако ему не присущ такой большой недостаток, как подтравливание материала.

Поскольку при изготовлении трафарета нет промежуточного создания фотошаблонов и последующих этапов литографии, точность размеров апертур гораздо выше, чем при использовании предыдущего метода.

Другим преимуществом лазерной резки является то, что стенки апертур можно сформировать в конической форме. Аналогичную форму апертур можно получить и химическим односторонним травлением, однако в этом случае угол будет почти неконтролируемым.

Для существенного облегчения нанесения припойной пасты достаточен клин боковых стенок апертур в  $2^\circ$ .

Способ лазерной резки позволяет вырезать апертуры шириной 0,004 мм с точностью 0,0005 мм, что делает этот способ перспектив-

ным при формировании апертур для компонентов с малым шагом. Признанным лидером в области оборудования для лазерной резки является компания Маре.

Недостатком лазерного изготовления трафаретов является (как и в предыдущем случае) неровность кромок апертур трафарета. Это явление возникает из-за испарения и окаливания металла в процессе резки. Это может вызвать закупоривание отверстий трафарета припойной пастой. Сглаживание кромок можно осуществить микро-травлением.

Еще одним недостатком такого метода является то, что лазерной резкой невозможно получить многоуровневые трафареты без предварительного химического травления областей, которые должны быть тоньше основного материала трафарета.

Поскольку каждая апертура трафарета вырезается отдельно, стоимость изготовления трафарета таким способом зависит от сложности топологии печатной платы и обычно значительно выше, чем травление.

***Аддитивный способ изготовления (метод гальванопластики).*** Третий способ изготовления трафаретов заключается в гальваническом осаждении никеля на гибкую подложку – медную фольгу.

На фольгу накатывается фоторезист, экспонируется и проявляется таким образом, чтобы проявленный рельеф повторял рисунок будущего трафарета (в месте расположения апертур трафарета фоторезист остается, в остальных удаляется при проявлении). Толщина используемой фольги 0,25 мм.

Затем на полученную подложку осуществляется химико-гальваническое осаждение никеля. После достижения требуемой толщины трафарета процесс осаждения заканчивается, и производится смывка фоторезиста.

Ключевым этапом получения готового трафарета является отделение никелевого слоя от медной подложки. Этот процесс осуществляется изгибом меди, при котором никель начинает отслаиваться.

Процесс гальванического осаждения, как и метод лазерного вырезания, исключает подтравливание стенок апертур, что предотвращает забивку пасты под поверхность. Следовательно, уменьшается вероятность образования замыканий на печатных платах. Однако такая абсолютно вертикальная форма кромок апертур приводит к проблемам при снятии трафарета с платы, на которую нанесена припойная паста.

**Выбор технологии** изготовления трафаретов учитывает особенности методов, представленных в табл. 6.1.

Таблица 6.1

*Особенности методов изготовления*

Особенность	Химическое травление	Лазерная резка	Гальванопластика
Точность размеров	3	4	5
Гладкость стенок апертур	4	3	5
Контроль формы стенок апертур	3	4	5
Производительность	5	4	4
Прочность трафарета	5	5	5
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая

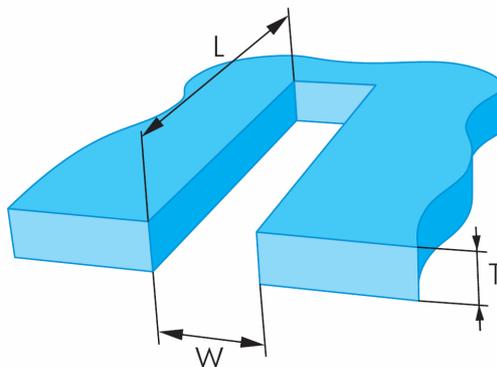
Система оценки: 5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – плохо

Основным аспектом изготовления трафарета является соотношение ширины минимального окна и толщины трафарета в этом месте (рекомендуется значение 1 – 1,5). Этот параметр выдерживается для предотвращения закупорки трафарета.

Также рекомендуется выдерживать определенное значение отношения площади окна трафарета к площади контактной площадки. Данный параметр рассчитывается по формуле (рис. 6.16):

$$P = \frac{\text{площадь апертуры}}{\text{площадь стен апертуры}} = \frac{L \times W}{2 \times (L + W) \times T}$$

В случаях, когда параметр  $P$  находится в пределах 0,75 – 0,66, рекомендуется лазерная резка (желательно с электрополировкой или нанесением слоя никеля). В диапазоне от 0,66 до 0,50 рекомендуется гальванопластическое изготовление трафарета.



**Рис. 6.16.** Соотношение сторон апертуры

**Брак трафаретной печати.** Основными видами брака, вызванного ошибками оператора при *ручной* трафаретной печати являются следующие:

- неравномерное нанесение пасты (вызвано неравномерной силой прижатия ракеля к трафарету);
- смазывание пасты при отрыве трафарета от печатной платы;
- неполное заполнение апертур трафарета из-за загрязнения кромки ракеля пастой или использования просроченной пасты.

При *автоматической* трафаретной печати брак чаще всего также возникает из-за погрешностей настройки оборудования:

- неверный подбор зазора между ракелем и трафаретом;
- неправильно подобранная скорость движения ракеля и т. д.

При трафаретном нанесении припойной пасты можно выделить шесть основных *видов дефектов*:

1. Дефект совмещения трафарета и монтажной платы. Ошибка совмещения апертур трафарета и контактных площадок платы не должна превышать 15 % от минимального размера апертуры трафарета для контактной площадки минимального элемента платы.

2. Просадка пасты. Этот дефект может быть вызван неправильно подобранной вязкостью припойной пасты. Рекомендуемая просадка пасты не должна превышать 15 % минимального размера контактной площадки.

3. Неравномерность толщины нанесенной пасты. После нанесения пасты ее толщина должна колебаться в диапазоне  $\pm 20$  % от желаемой. Слишком тонкий слой материала может быть недостаточным для пайки компонента. Слишком толстый слой может привести к замыканиям контактных площадок платы.

4. Вычерпывание пасты из апертур трафарета. Такой дефект может быть вызван чрезмерной силой прижатия ракеля к поверхности трафарета, слишком мягкой кромкой ракеля. В результате уменьшается количество пасты на контактных площадках. Уменьшение пасты при вычерпывании не должно превышать 20 % от расчетной высоты пасты.

5. Излишки пасты. Такой дефект может быть вызван недостаточной силой прижатия ракеля к поверхности трафарета или погрешностью геометрической формы кромки ракеля. Высота нанесенной припойной пасты с учетом этого дефекта не должна превышать расчетную, более чем на 20 %.

6. Наклон нанесенной пасты по отношению к монтажной плате. Величина наклона регламентируется следующим образом: разница максимальной высоты пасты и минимальной высоты не должна быть больше 20 % желаемой высоты.

Проведенный анализ способов нанесения пасты и изготовления трафаретов показывает целесообразность следующего применения этих методов:

Диспенсорный метод нанесения пасты применим на участках прототипной и мелкосерийной сборки плат (низкая производительность).

Трафаретная печать применима на крупносерийных и массовых участках. Помимо огромной производительности (десятки плат/ч против единиц плат/ч у диспенсорной), метод обладает высочайшей точностью нанесения (под платой подразумевается еврозаготовка размерами 240 мм x 160 мм).

По технологии изготовления трафаретов можно обозначить следующие области применения:

- Травление трафаретов приемлемо для узлов широкого потребления и продукции не ответственного назначения.

- Гальванопластика также применяется для узлов широкого потребления. Качество нанесения и точность нанесения обычно ниже, чем у химически выфрезерованных трафаретов (за счет вертикальности стенок).

- Лазерное вырезание трафаретов применимо для всех электронных блоков. По качеству и точности нанесения эти трафареты превосходят предыдущие два.

Виды брака трафаретной печати приведены в табл. 6.2.

### **Установка компонентов**

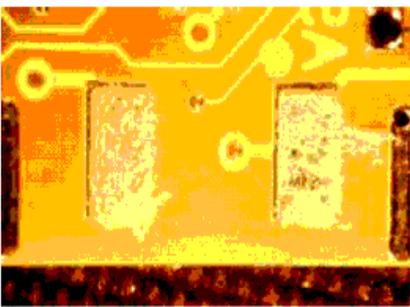
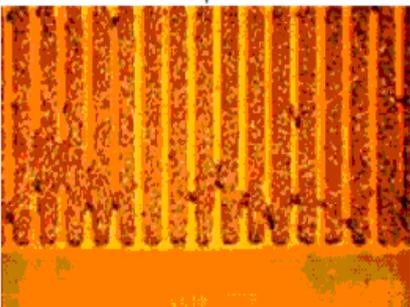
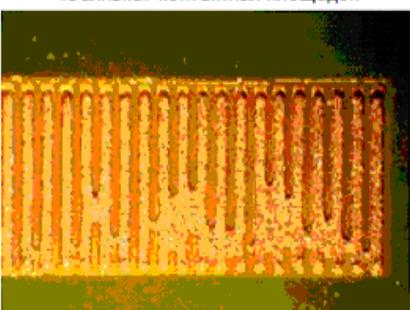
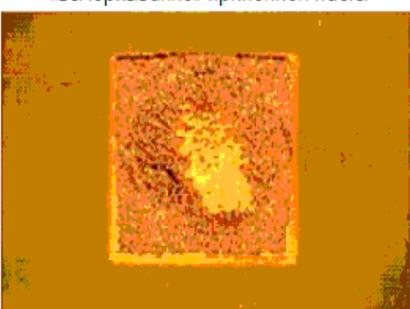
Установка поверхностно монтируемых компонентов гораздо проще установки традиционных, монтируемых через отверстия. Автоматизация процесса установки поверхностно монтируемых компонентов стала возможной благодаря структуре корпусов компонентов и особенно их выводов.

В зависимости от производительности можно выделить два основных типа установщиков:

- автоматы и полуавтоматы;
- ручные.

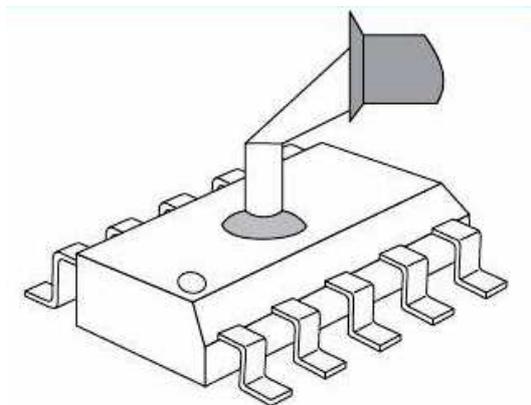
Таблица 6.2

## Виды брака трафаретной печати

№	Вид брака	Причина возникновения	Устранение
1	Смазывание 	Смазывание происходит чаще всего либо на стадии отрыва трафарета от печатной платы, либо на стадии установки компонентов	При единичном браке — очистка контактных площадок и ручное диспенсорное нанесение пасты. При большой площади смазывания — полная очистка платы и повторное нанесение пасты.
2	Закоротки 	Дефект возникает из-за неравномерного прилегания трафарета к печатной плате, из-за ошибки при определении силы прижатия и скорости перемещения ракеля и из-за неравномерной толщины защитного покрытия платы.	В случае механического повреждения трафарета — его замена. При загрязнении трафарета — тщательная промывка. В остальных случаях необходим более точный подбор режимов нанесения или замена плат.
3	«Заливка» контактных площадок 	Чрезмерно велик зазор между печатной платой и трафаретом в локальных областях платы.	Регулировка зазора при трафаретной печати.
4	«Вычерпывание» припойной пасты 	Брак возникает при чрезмерном прижатии ракеля с полимерной рабочей кромкой к трафарету. При печати происходит продавливание кромки ракеля в апертюры трафарета и вычерпывание пасты.	До отделения трафарета: локальное нанесение пасты в апертюры трафарета. После отделения: ручное диспенсорное нанесение пасты.

**Ручная установка SMD-компонентов** (рис. 6.17) осуществляется вакуумными пинцетами. Сегодня рынок оборудования предлагает огромный выбор инструментов и насадок для ручной установки компонентов. Тем не менее, небольшие размеры корпусов и малый шаг между выводами сильно затрудняют установку интегральных компонентов типа QFP и BGA. Чаще всего вакуумным пинцетом устанавли-

ливаются пассивные компоненты и ИС с шагом выводов не менее 0,65 мм. Производительность ручной установки составляет порядка 300 компонентов в час.



*Рис. 6.17.* Ручная установка компонентов

### ***Автоматическая и полуавтоматическая установка***

*Револьверные системы.* Наиболее быстрыми типами установщиков являются системы револьверного типа. При этом высокая скорость установки компонентов берет верх над точностью установки и гибкостью переналадки. Такие машины обычно имеют неподвижную плату и перемещающиеся питатели и револьверную головку. Производительность может достигать 60 тыс. комп./ч. Данный тип оборудования ориентирован на компоненты, поставляемые в ленте, и используется для крупносерийных производств с малой номенклатурой.

*Портальные системы.* Для данного типа установщиков характерно неподвижное расположение плат и питателей и перемещающаяся установочная головка. Производительность достигает 30 тыс. комп./ч, но при этом точность установки компонентов достигает 0,05 мм. В отличие от предыдущего типа, эти установщики работают с широким диапазоном типоразмеров компонентов. Использование таких систем целесообразно для участков с модульным принципом построения, используемых при создании широкономенклатурных производств, что актуально для России.

*Двойные блоки установочных головок.* Традиционно в автоматах используется концепция сдвоенного блока установки: пока одна головка выполняет позиционирование и установку компонента на ПП, вторая осуществляет захват и центрирование компонента из питателя. Программное обеспечение системы управления оптимизирует этот процесс.

Некоторые автоматы содержат до 18 установочных головок. Их производительность достигает 96 тыс. комп./ч, однако такие системы не являются гибкими в переналадке.

*Видеосистемы автоматов.* В револьверных системах обычно осуществляется контроль и центрирование компонента при каждом повороте головки. Для порталных систем характерно использование видеокамер высокого разрешения для каждой установочной головки. Для этого используются лазерные системы позиционирования или камеры нижнего просмотра. Типичные системы имеют станции центрирования: установочная головка подводит компонент к системе видеонаблюдения, затем после центрирования осуществляется перемещение в зону установки. Автоматы фирмы Samsung позволяют осуществить «центрирование на лету», то есть во время перемещения головки от места захвата к месту установки осуществляется центрирование компонента благодаря подвижной системе контроля. Такой метод позволяет существенно увеличить производительность автоматов и точность установки благодаря исключению «лишних» холостых ходов и вибрационных коротких перемещений (захват – центрирование — установка).

*Интеллектуальные питатели.* Назначение питателей автоматических установщиков заключается в подаче компонентов в зону захвата установочной головки. Питатели могут быть ленточными, пенальными, матричными или кассетными. Наиболее часто используются ленточные питатели.

Большинство порталных установщиков использует все возможные типы питателей. Автоматы фирмы Samsung имеют быстросменные питатели с системой автораспознавания и возможностью подготовки в режиме off-line (неустановленными в автомат), а установщик автоматически распознает питатели с загруженными компонентами. Таким образом, смена питателей занимает всего несколько минут.

После установки комплекта питателей система управления автомата проверяет настройки. Оператор может удаленно (с помощью сетевого подключения) получить следующую информацию: какие компоненты используются в настоящий момент; штрих-код с номером партии; количественные данные, необходимые для планирования производственного процесса.

Ранее разъемы, силовые переключатели, колодки и т. д. устанавливались только вручную. Однако в современные автоматы поверхностного монтажа могут встраиваться специальные ленточные носи-

тели, матричные поддоны и специальные захваты с системами видео-контроля. При этом дооснащение автоматов не требует значительных инвестиций.

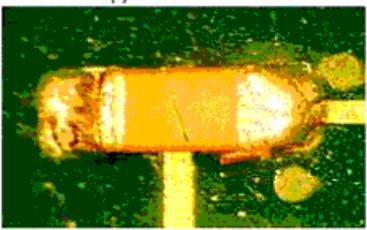
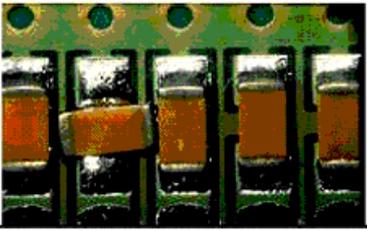
*Полуавтоматические* системы принципиально отличаются от автоматов отсутствием привода установочной головки – перемещение осуществляет оператор. Автоматизация процесса заключается только в запоминании управляющим устройством координат установки каждого компонента и в блокировке перемещения манипулятора в заданных точках. Такой принцип установки удобен в мелкосерийном производстве и лабораторных условиях. Производительность установки компонентов в этом случае достигает 700 комп./ч.

Использование полуавтоматических установщиков целесообразно в лабораториях и исследовательских участках, то есть там, где требуется выполнение малых объемов сборочных работ. Типичное мнение о достаточности полуавтоматов для изготовления прототипов является ошибочным, так как в настоящее время существует ряд типоразмеров компонентов, не поддающихся ни ручной, ни полуавтоматической установке. При этом такие компоненты становятся неотъемлемой частью современных электронных модулей.

Виды брака установки компонентов приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

*Брак установки компонентов*

№	Вид брака	Причина возникновения	Устранение
1	Разрушение компонента 	Разрушение корпуса возможно при неточной регулировке высоты захвата и установки компонентов автоматическими и полуавтоматическими системами. При двустороннем монтаже брак может возникать из-за неаккуратного размещения платы на этапе трафаретной печати или установки компонентов. Дефект может быть невидим до конца оплавления пасты.	Регулировка систем установки компонентов и аккуратное размещение плат двустороннего монтажа в рабочих областях оборудования.
2	Неправильное расположение 	Дефект возникает из-за ошибки программирования автоустановщиков компонентов либо из-за движения компонента на присоске во время перемещения установочной головки.	1. Исправление программы установщика 2. Снижение давления в откачной системе установщика.
3	Изгиб выводов компонентов 	Причина дефекта заключается в неверной настройке высоты захвата/установки компонентов в автоустановщиках. Кроме того, возможно отсутствие центрирования присоски относительно корпуса компонента.	Регулировка оборудования.

## **Оплавление припойной пасты**

**Методы нагрева.** Основным механизмом передачи тепла, используемым в установках пайки с ИК-нагревом, является излучение. Передача тепла излучением имеет большое преимущество перед теплопередачей за счет теплопроводности и конвекции. Это единственный из механизмов теплопередачи, обеспечивающий передачу тепловой энергии по всему объему монтируемого устройства (за исключением затененных участков). Остальные обеспечивают передачу тепловой энергии только поверхности монтируемого изделия.

В процессе пайки ИК-излучением скорость нагрева регулируется изменением мощности каждого излучателя и скорости движения конвейера с ПП (для печей конвейерного типа). Основным недостатком пайки ИК-нагревом является то, что количество энергии излучения, поглощаемой компонентами и платами, зависит от поглощающей способности материалов, из которых они изготовлены: если не вдаваться в подробности механизма теплопередачи и теорию расчетов коэффициентов поглощения, можно сказать, что чем «чернее» нагреваемое тело, тем эффективнее его нагрев ИК-методом. Поэтому в пределах монтируемого устройства нагрев осуществляется неравномерно. Кроме того, не стоит забывать про теневые эффекты (невозможность пропайки выводов под корпусами микросхем).

Поэтому в современных печах применяют сочетание длинноволновых и коротковолновых излучателей, что позволяет осуществить более равномерный прогрев поверхности сборки (хотя и в этом методе есть свои особенности: прогрев зависит от массы нагреваемых изделий и их распределения по плате). В таком варианте компоновки печи тепло ПП и компонентам передается как за счет излучения (70 %), так и конвекцией (30 % – при помощи принудительной вентиляции воздуха в рабочей камере).

В связи с вышесказанным печи для ИК-пайки изготавливают таким образом, чтобы на стадии предварительного нагрева изделие подвергалось воздействию длинноволновых нагревателей, обеспечивающих более высокую равномерность нагрева, а на стадии пайки – комбинированному действию ИК-излучателей и конвекционного нагрева. Наиболее эффективное сочетание нагрева: ИК-прогрев всей сборки плюс принудительная конвекция (длинноволновые нагреватели плюс принудительная циркуляция воздуха в зоне пайки).

В последнее время нередко используются печи с заполнением камер пайки азотом – такой подход позволяет устранить кислород из

зоны пайки и значительно снизить окисление. Однако не стоит забывать и об экономической стороне процесса. Необходимо с учетом программы выпуска рассчитать, что дешевле: постоянный напуск азота в печь или использование флюсов и их последующая отмывка.

**Требования, предъявляемые к печам пайки оплавлением.** Основным требованием, предъявляемым к печи (помимо требуемой производительности), является точная выдержка температурного профиля изделия (рис. 6.18).

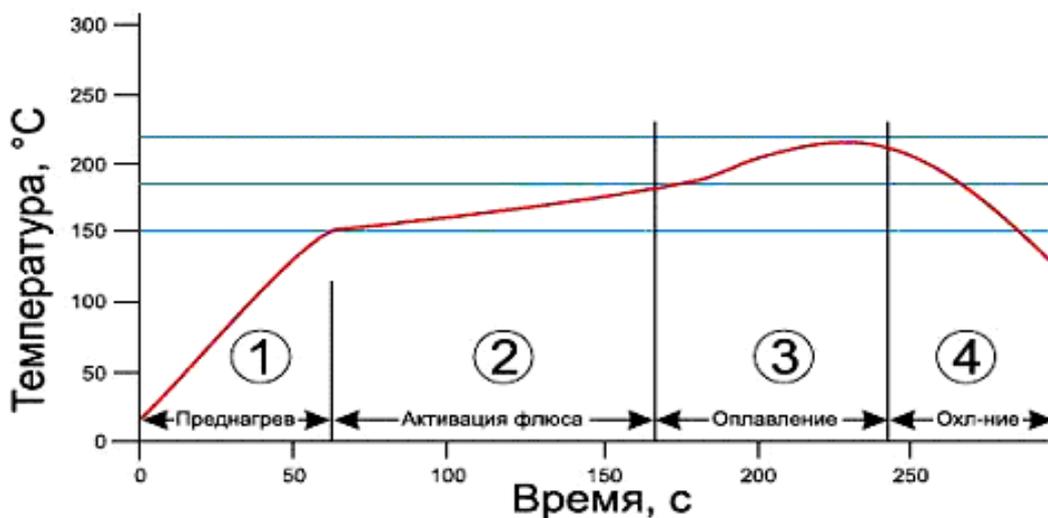


Рис. 6.18. Температурный профиль изделия

На стадии 1 осуществляется предварительный нагрев платы, предотвращающий коробление изделия при температуре расплавления припоя. Практический опыт пайки показывает, что слишком высокая скорость нагрева изделия до температуры активации флюса может привести к такому дефекту, как припойный бисер, последствиями которого является разбрызгивание мелких шариков припоя по дну компонента и поверхности платы из-за повышенного газовыделения припойной пасты. Поэтому максимальная скорость предварительного нагрева не должна быть более  $2 - 4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Главным моментом на втором этапе пайки является выдержка платы при температуре активации флюса в течение времени, необходимого для активации и полного испарения флюсовой составляющей припойной пасты. Кроме того, зона теплового насыщения (2) позволяет избежать смещения компонентов относительно контактных площадок платы вследствие разности коэффициентов температурного расширения корпусов и текстолита.

Время нагрева изделия на первых двух этапах пайки рассчитать точно обычными методами тепловой техники практически невозможно из-за большого количества вариантов сборок печатных плат (в одном случае поверхность текстолита может быть полностью оптически открыта, в другом поверхность платы может закрываться корпусами интегральных компонентов до значения коэффициента перекрытия 50 – 80 %). Однако обобщение экспериментальных данных позволяет говорить о том, что время всего цикла предварительного нагрева колеблется от одной до двух минут независимо от скорости нагрева (естественно, при условии, что она не будет превышать 2 – 4 °С/с).

По завершении цикла преднагрева начинается цикл пайки изделия (3-й участок на рис. 6.18). При пайке скорость роста температуры до значения  $t$  расплавления припоя должна быть по возможности высокой, для того чтобы избежать перегрева компонентов печатной платы. На практике рост температуры от 120 до 200 – 220°С производится в течение 10 – 15 с, после чего осуществляется выдержка температуры пайки в течение времени, необходимого на самоустановку компонентов (10 – 15 с).

После выполнения цикла пайки нагреватели печи выключаются (в случае камерных печей) либо плата перемещается на конвейере в зоне охлаждения (для конвейерных печей).

Далее следует этап охлаждения платы, который, в зависимости от типа печи и требований по производительности, может осуществляться двумя вариантами:

- естественное охлаждение в печи до времени отвердевания припоя, затем на воздухе;
- в блоке принудительного охлаждения.

В условиях крупносерийного и массового производства время охлаждения не рассчитывается, так как печатная плата с напаянными компонентами охлаждается принудительно в блоке охлаждения после транспортировки из блока пайки. Процесс пайки одной платы и остывания и выгрузки другой ведется параллельно, что значительно повышает производительность.

В условиях мелкосерийного и единичного производства время охлаждения также не учитывается, так как можно утверждать, что время охлаждения печи до температуры затвердевания припоя гораздо меньше времени всего цикла пайки и незначительно влияет на производительность печи. Обычно время естественного охлаждения

припоя до температуры отвердевания меньше 20 с. Сравнительно быстрое падение температуры в печах подобного класса обусловлено конструктивными особенностями: печи представляют собой стационарную камеру нагрева с большими тепловыми потерями через окно загрузки, которое, как правило, остается открытым в течение всего цикла пайки.

Кроме того, некоторые типы камерных печей, применяющихся в мелкосерийном и единичном производстве, оснащаются механизмом автоперемещения плат в камеру пайки и на открытое пространство для охлаждения.

**Эффект опрокидывания** также известен под названиями «манхэттенский эффект».

Небольшие пассивные компоненты имеют тенденцию смещаться при пайке как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Опрокидывание компонентов приводит к разрыву соединения контактной площадки платы и контакта компонента.

Основные причины возникновения дефекта:

- Размерные погрешности контактных площадок платы: площадки одного компонента сильно отличаются друг от друга.
- Различное смачивание припоем одноименных контактных площадок платы и контактов элемента (разная степень окисления).
- Повышенная шероховатость контактной площадки, на которую наносится припойная паста.
- Недостаточная металлизация контактных площадок корпуса электронного компонента, излишки припоя на них.
- Большие растягивающие напряжения между контактными площадками и припойной пастой (чаще всего при пайке в парогазовой фазе).

Неправильное размещение компонентов. Физическую природу эффекта опрокидывания поясняет рис. 6.19.

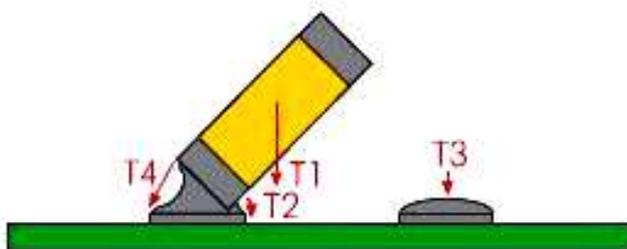


Рис. 6.19. Эффект опрокидывания

Показанные на рис. 6.19 силы представляют следующее:

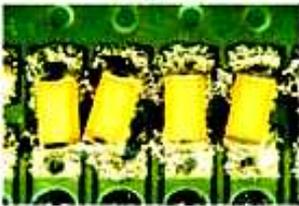
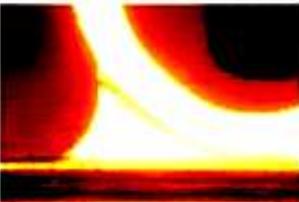
- T1 – вес компонента.
- T2 – силы поверхностного натяжения расплавленного припоя с внутренней стороны контакта.
- T3 – сила «склеивания» припоя.
- T4 – сила поверхностного натяжения расплавленного припоя с внешней стороны контакта.

Эффект опрокидывания опасен при следующем соотношении:  $T4 > T1 + T2 + T3$ .

Виды брака при оплавлении приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

*Брак пайки компонентов*

№	Вид брака	Причина возникновения	Устранение
1	<p>Непропай</p> 	Недостаточная температура оплавления припойной пасты	Локальный брак устраняется вручную с помощью термофенов. В случае непропая всей платы допускается повторное оплавление пасты в печи
2	<p>Трещины и расслоения корпусов</p> 	Неверно сформирован термопрофиль работы печи: на этапе оплавления происходит резкий скачок температуры	Подобный дефект может не проявиться внешне на других корпусах, но при этом возможен их выход из строя. После функционального теста необходима замена сгоревших компонентов
3	<p>Излом корпуса</p> 	Подобные повреждения имеют механическую природу и происходят на этапе установки компонентов на печатную плату с помощью автоматических систем размещения	Корректировка высоты установки компонентов
4	<p>Излом контакта</p> 	Полное или частичное повреждение паяного соединения возможно при изгибах печатной платы после пайки	Повторное оплавление контакта термофеном
5	<p>Эффект опрокидывания</p> 	Причины данного дефекта могут скрываться во всех этапах технологического процесса сборки плат. Кроме того, возможно неверное проектирование печатной платы. Более подробно данный дефект рассмотрен ниже	Необходима выпайка компонента, очистка контактных площадок и локальная пайка нового компонента

№	Вид брака	Причина возникновения	Устранение
6	Опрокидывание интегральных компонентов 	Опрокидывание интегральных многовыводных компонентов возникает из-за некачественной подготовки поверхности контактных площадок перед пайкой (сильные окисления, загрязнения)	Платы необходимо хранить в соответствии с существующими стандартами
7	Плохая смачиваемость компонента 	Причиной ухудшения смачиваемости выводов компонентов является их сильное окисление. Такой брак может быть не выявлен электрическим тестом; подобные контакты ненадежны в эксплуатации	Необходимо хранение компонентов в специальных шкафах (например, шкафы для хранения SMD японской фирмы Tabai Espec)
8	«Открытые» выводы 	Типичный вид брака для транзисторов SOT89 — отрыв контактов от места пайки. Под массивный задний вывод всегда делают большую контактную площадку, однако при нанесении припойной пасты необходимо выдержать минимально достаточную высоту. Переизбыток пасты приводит к чрезмерному подъему компонента и отсутствию контакта выводов с припойной пастой	Необходима выпайка компонента, очистка контактных площадок и локальная пайка
9	Припойный бисер 	Припойный бисер — это шарики припойной пасты, разбрызгавшиеся по поверхности печатной платы во время пайки	Дефект подробно рассмотрен в соответствующем разделе
10	Утолщение контактов 	Дефект возникает из-за плохой смачиваемости контактных площадок печатной платы	Платы необходимо хранить в соответствии с существующими стандартами
11	Ростекание припоя 	Дефект вызван ошибкой проектирования платы. Переходное отверстие расположено слишком близко к контактной площадке. Минимальное расстояние должно быть равным $0,010''$ при толщине проводника $0,006-0,008''$ . В противном случае паста будет «стекать» с контактных площадок в отверстия	Исправление топологии печатной платы

*Предотвращение дефекта опрокидывания.* Избежать этого дефекта можно на этапе проектирования печатной платы. Необходимо выдержать одинаковые размеры одноименных контактных площадок, обеспечить одинаковые габариты проводников, подходящих к одноименным площадкам. Эти меры позволяют обеспечить одинаковый теплоотвод от них во время пайки.

Полностью устранить возникновение дефекта на этапе сборки позволяют адгезивы.

**Припойный бисер** представляет собой разбрызганные шарики припоя на нижней части компонентов и печатной плате. Чаще всего такие шарики наблюдаются под Chip-резисторами и конденсаторами, а также под компонентами типа SOT. Причинами появления припойного бисера чаще всего являются неаккуратное нанесение припойной пасты, повышенное газовыделение пасты на этапе предварительного нагрева либо комбинация этих причин. Скорость предварительного нагрева обычно не должна превышать 2 – 4 °С/с. В противном случае начинается закипание жидкой составляющей припойной пасты и повышенное газовыделение, что приводит к разбрызгиванию пасты.

**Ремонт после неудачной пайки.** Припойные шарики диаметром, превосходящим минимальное расстояние, необходимое для изоляции выводов компонента друг от друга, аккуратно удаляются при помощи вакуумного термоотсоса. При этом необходимо убедиться, что ни один припойный шарик не остался на монтажной плате под компонентом. Маленькие припойные шарики, покрытые флюсом, можно оставить на поверхности платы или компонента при минимальном риске нарушения работоспособности изделия. Как показывает практический опыт, небольшие шарики припоя, расположенные на диэлектрической поверхности платы, смываются вместе с остатками флюса при отмывке в УЗ-ваннах.

Приемлемое количество и размеры припойного бисера рассмотрены в стандарте IPC-A-610 или ERF-R19.

## **Контроль**

В современных электронных модулях может проявляться огромное количество дефектов. В зависимости от развития технологии и техники диапазон дефектов постоянно меняется, что вызывает необходимость в новых методах контроля.

**Внутрисхемный контроль.** Данный метод является единственным, позволяющим оценить качество и работоспособность изделия (в отличие от остальных методов, которые нацелены на определение качества пайки). При этом можно не только оценить, насколько хорошо пропаяно соединение, но и оценить место дефекта, проверить работоспособность сложных интегральных компонентов.

Установки внутрисхемного контроля выполняются как в варианте ручных тестеров (с набором тестовых щупов и клипс, а также с возможностью подключения зондового стенда «ложе гвоздей»), так и в виде автоматических тестеров с перемещающимися щупами либо с настраиваемой матрицей щупов.

**Автоматический оптический контроль.** Данный метод позволяет оценить качество пайки, точность расположения компонентов, а некоторые системы, благодаря возможности анализа маркировки корпусов компонентов, позволяют оценить верность расположения того или иного компонента (проверка полярности).

Кроме того, поскольку в данном случае исключается человеческий фактор (распознавание графического изображения осуществляется в автоматическом режиме и качество тестирования не зависит от опыта оператора), вероятность ошибки в результатах теста минимальна.

**Автоматический рентгеновский контроль.** Рентгеновский контроль является наиболее эффективным методом оценки качества пайки компонентов с матричным расположением выводов. Естественно, нельзя забывать и о том, что существуют системы оптического контроля, способные «заглянуть» под корпус микросхемы, однако рентгеновский контроль дает большую информацию о качестве. Кроме того, в зависимости от конфигурации платы и собранного устройства этот метод может оказаться единственно возможным, поскольку осуществить электрический контроль узла иногда просто невозможно.

## **Отмывка**

Для обеспечения высокого качества готового изделия процесс отмывки необходимо разделять на 5 этапов.

1. Первый этап заключается в определении целей отмывки. Во многом это определяется качеством сборки на предыдущих этапах: либо нужно удалять остатки флюса и, частично, припойный бисер, либо осуществлять косметическую отмывку изделия.

2. Второй этап имеет своей целью четкое определение отмывочной жидкости: это может быть обычная дистиллированная вода либо специальное технологическое моющее средство.

3. Третий этап – выбор отмывочной системы. На данном этапе нужно знать объем отмываемых партий и метод отмывки: статические ванны (для прототипного производства) либо полуавтоматические и автоматические линии ультразвуковой или струйной отмывки.

4. На четвертом этапе необходимо осуществить тестирование выбранного метода отмывки с помощью специальных тестовых купо-

нов. Цель – проконтролировать поверхностное сопротивление и добиться оптимального результата. Нередко на этом этапе выясняется ошибочность предварительного выбора. Перед покупкой оборудования и выбором отмывочных жидкостей проконсультируйтесь сначала с опытными специалистами!

5. Последним этапом является интеграция системы контроля процесса: необходимо добиться воспроизводимости результатов отмывки и достичь стабильности процесса при переходе на новые типы отмывочных жидкостей.

### **Ремонт модулей**

Замена поверхностно монтируемых компонентов в большинстве случаев невозможна без специального оборудования. Во многом это определяется малым шагом между выводами компонентов, а иногда и подкорпусной разводкой матричных компонентов (BGA.CSPht. д.).

Наибольшее распространение в сервисных и ремонтных центрах получила технология пайки горячим воздухом.

В общем случае, ручной демонтаж компонентов с линейным расположением выводов состоит из следующих операций:

1. Если на контакты нанесено влагозащитное покрытие, требующее удаления при оплавлении олова, – необходимо очистить плату вокруг микросхемы отмывочной жидкостью (типа ПРОЗОЙ).

2. «Запайка» выводов. Операция заключается в огибании трубчатым припоем выводов компонента. Цель – исключить появление зазора между выводами и губками термопинцета для равномерной теплопередачи.

3. Лужение губок термопинцета. На разогретые губки ( $t = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) наносится максимальное количество олова по периметру будущего теплового контакта. Как и в предыдущем случае, цель – избежать зазора при захвате.

4. Захват компонента. Губки термопинцета позиционируются над компонентом. Захват осуществляется до упора губок без значительных механических напряжений. Удержания термопинцета в течение 3 – 5 секунд вполне достаточно для выпайки компонента. Если этого не происходит – либо неравномерно осуществляется теплопередача, либо температура губок недостаточна для работы.

5. Подъем компонента. Демонтированный компонент поднимается над поверхностью печатной платы и отводится по траектории наименьшего пути до периферии платы. При этом не должно быть рез-

ких толчков и тряски: излишки расплавленного припоя могут капнуть на поверхность платы, закортит выводы близлежащих компонентов.

6. Удаление остатков припоя с контактных площадок осуществляется вакуумным отсосом. Жало отсоса нагревается до температуры около 400 °С (в зависимости от типа используемого припоя) и посредством разрежения в канале откачки остатки расплавленного припоя засасываются в накопительную камеру отсоса. Ручной монтаж SMD-компонентов может осуществляться двумя основными способами: пайка паяльником с «волновым» жалом в случае линейного расположения выводов (QFP, SO и т. д.) и конвекционная пайка горячим воздухом. Поскольку в большинстве случаев на печатной плате помимо компонентов с прутковым типом выводов присутствуют компоненты с J-образными выводами (SOI, PLCC), наибольшее распространение получила технология пайки горячим воздухом. Она является универсальной для всех типов компонентов (за исключением матричного расположения выводов).

Ручной монтаж компонентов горячим воздухом состоит из следующих этапов:

1. На предварительно очищенные контактные площадки диспенсером линейно наносится припойная паста.

2. С помощью вакуумного захвата позиционируется и устанавливается корпус электронного компонента

3. Основная трудность, с которой встречаются технологи сборочно-монтажных производств, заключается в сдувании неоплавленной пасты с контактных площадок при использовании термофена. Это связано с неточностью его регулировки. При подготовке воздушного паяльника к работе необходимо провести регулировку воздушного потока. Давление воздуха должно быть таким, чтобы при температуре наконечника паяльника около 400 °С на расстоянии 0,5 см бумажная салфетка приобретала темно-коричневый оттенок и при этом не сдувалась со своего положения. Поднесенный на 2,5 см к выводам микросхемы паяльник необходимо медленно и равномерно перемещать вдоль выводов каждой из сторон микросхем для сушки припойной пасты.

4. Критерием окончания этапа сушки является испарение флюсовой составляющей, которое можно оценить визуально: припойная паста приобретет ярко выраженный зернистый вид. После этого паяльник придвигается к выводам на расстояние около 0,5 см и происходит оплавление пасты.

В случае, когда инструмент отрегулирован верно, а частицы припоя после сушки сдуваются с поверхности контактных площадок, с большой долей вероятности можно диагностировать некондиционное состояние пасты – она либо просрочена, либо неверно хранилась.

**Автоматизированная замена.** Полуавтоматическая и автоматическая замена требуется либо в условиях серийного и массового ремонта, либо при ремонте компонентов с матричным расположением выводов. Принципиальное отличие автомата от полуавтомата заключается в наличии у последнего привода автоматического позиционирования микросхемы над контактными площадками. Выдержка термопрофиля при пайке и выпайке микросхем в обоих вариантах осуществляется автоматически.

В общем случае последовательность при замене компонентов на ремонтных комплексах следующая:

1. Над корпусом микросхемы позиционируется.

2. При контроле системы управления осуществляется расплавление паяных соединений. В случае, когда вакуумная присоска встроена в нагревательную насадку, немедленно осуществляется подъем компонента. В других случаях насадка отводится в сторону, и на ее место подается вакуумный захват.

3. Как и в случае ручной замены компонентов, осуществляется очистка контактных площадок от остатков припоя. Однако в случае компонентов с матричным расположением выводов используется специальное оборудование: термофен и вакуумный отсос с жаропрочным наконечником.

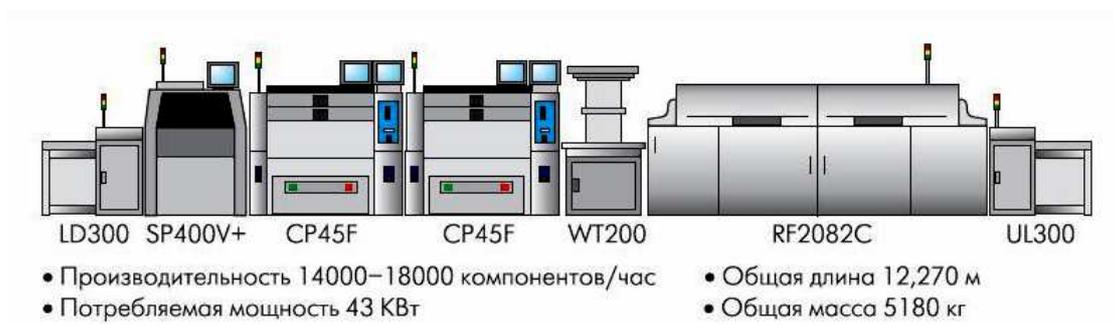
4. На поверхность очищенных контактных площадок наносится жидкий флюс – как правило, флюс-карандашом. Затем осуществляется позиционирование нового или восстановленного компонента.

5. На окончательном этапе ремонта выводы установленного компонента оплавляются горячим воздухом через специальную насадку под контролем автоматической системы регулировки температуры.

После каждого из этапов сборки необходима операция промежуточного контроля качества технологического процесса. Такой подход к управлению качеством (с использованием контрольных карт и графиков флуктуации параметров сборки) позволяет исключить саму возможность возникновения брака – за счет поддержания на заданном уровне параметров сборки (разрежение в канале откачки вакуумного захвата установщика, скорость движения ракеля, температура в печи и т. д.). Только в этом случае можно предотвратить возникно-

вление брака (который может проявиться только после финишной операции оплавления). Кроме того, постоянный межоперационный контроль позволяет устранить саму тенденцию к возникновению брака (за счет контроля флуктуации основных параметров сборки: количество и точность нанесения припойной пасты, точность установки компонентов, температура и т. д.).

К примеру, автоматические линии фирмы Samsung имеют встроенные системы контроля качества, обеспечивающие высокое качество собираемых модулей. Пример компоновки автоматической линии приведен на рис. 6.20.



**Рис. 6.20.** Универсальная автоматическая линия сборки плат

Для ручных и автоматизированных мелкосерийных участков подойдут дискретные системы оптического, рентгеновского и функционального контроля.

Использование систем АОI (автоматические системы оптического контроля) позволяет проверить точность установки и качество пайки компонентов. Компоненты с матричным расположением выводов (такие, как BGA, CSP и т. д.) для проверки точности установки и качества паяных соединений требуют применения систем рентгеновского контроля. При этом оба описанных метода не дают 100 % гарантии качества пайки, если не применялось функциональное тестирование

#### **6.4. Теория обеспечения заданной точности выходных параметров сборочных единиц**

##### **Производственные погрешности. Причины возникновения, законы распределения**

Любой ТП производства электронной аппаратуры характеризуется циклом последовательных операций изготовления деталей и сборочных единиц. На каждой операции неизбежно появляются некото-

рые колебания геометрических характеристик, режимов выполнения и физико-механических свойств материалов, которые отражают закономерности соответствующей операции и обусловлены комплексом случайных и систематических внешних и внутренних факторов, действующих в производстве. Они вызывают отклонение выходных параметров изделий.

Для нормального функционирования аппаратуры необходимо, чтобы отклонения параметров деталей, сборочных единиц и всего устройства в целом от номинальных находились в пределах, заданных в технической документации. Степень соответствия параметров изготовленных изделий установленным допускам определяет их технологическую точность.

Анализ точности производственного процесса позволяет для каждой технологической операции вскрыть причины возникновения производственных погрешностей, обосновать границы технологического допуска, правильно настроить ТП и выбрать экономичный метод достижения требуемой точности.

Под **производственными погрешностями** понимают отклонения параметров от номинальных данных, указанных в чертежах, нормалях, ТУ и другой технической документации, которые возникают при изготовлении деталей и сборочных единиц ЭА. Границы изменения параметров в процессе производства определяют технологические допуски, которые рассчитываются и устанавливаются заранее. В зависимости от того, какие параметры изделий они ограничивают, различают механические (геометрические) и электрические допуски.

Производственные погрешности подразделяются на систематические, которые вызываются детерминированными причинами и могут быть постоянными во времени или изменяться в пределах партии по определенному закону, и случайные, изменение величины и знака которых носит статистический характер.

*Систематические погрешности*, вызываются следующими основными причинами:

1) методическими, которые возникают из-за ограниченных возможностей метода изготовления детали или контроля ее параметров, замены точных формул приближенными при технологических расчетах;

2) неточностью изготовления оснастки и рабочего инструмента;

3) деформацией и износом оборудования, оснастки и инструмента;

4) температурными воздействиями на деталь или сборочную единицу в зоне обработки.

*Случайные производственные погрешности* определяются следующим:

1) неоднородностью сырья и отклонениями параметров комплектующих изделий (резисторов, конденсаторов, транзисторов, ИС и др.);

2) колебаниями технологического режима обработки;

3) субъективными данными рабочих и т. д.

Для описания производственных погрешностей используются следующие законы распределения: Гаусса, равновероятный, обобщенный типа А (Шарлье), эксцентриситета, экспоненциальный, некруглости, модуля разности и др.

Распределение производственных погрешностей подчиняется закону Гаусса при соблюдении следующих условий: 1) общая погрешность представляет сумму частных погрешностей, вызванных действием значительного числа случайных факторов и некоторого числа первичных систематических факторов; 2) среди частных погрешностей нет доминирующих, то есть влияние на общую погрешность одного порядка; 3) все случайные факторы взаимно независимы; 4) число случайных факторов и параметры вызванных ими частных погрешностей не изменяются во времени; 5) число систематических факторов и значения вызванных ими частных погрешностей остаются одинаковыми. Такие условия создаются при массовом производстве деталей и сборке аппаратуры на автоматически работающем оборудовании.

Если среди причин, вызывающих производственные погрешности, имеется резко доминирующий фактор (например, износ инструмента), равномерно изменяющийся во времени, то полное рассеивание отклонений одной производственной партии соответствует закону равной вероятности. Этот закон характеризуется двумя параметрами – средним значением и среднеквадратическим отклонением.

Когда распределение производственных погрешностей значительно отличается от гауссовского, применяется обобщенный закон типа А, который характеризуется четырьмя параметрами: средним значением, среднеквадратическим отклонением, коэффициентом асимметрии (мера косости) и эксцессом (мерой крутости).

Возможны случаи, когда производственные погрешности не адекватны описанным выше конкретным распределениям и требуют применения нестандартных распределений произвольного вида. При этом удобны полигауссовские модели погрешностей.

### **Методы анализа технологической точности выходных параметров сборочных единиц**

Для изучения производственных погрешностей применяют статистический и аналитический методы. Статистический метод анализа основан на получении и обработке большого количества наблюдений с помощью основных правил математической статистики. Он позволяет определить суммарную технологическую погрешность, которая возникает в результате взаимодействия ряда факторов, но не дает возможности выявить причины ее возникновения. Аналитический метод основан на установлении функциональных зависимостей между производственными погрешностями и выходными параметрами точности.

На практике эти методы часто сочетают. В результате появился расчетно-статистический метод анализа производственных погрешностей.

Разновидностью статистического метода анализа является корреляционный метод. Он применяется тогда, когда существует взаимная связь между производственными погрешностями параметров элементов.

*Статистический метод анализа* включает два этапа. На первом выбирается объект исследования, определяется объем экспериментальных данных и назначаются средства технического контроля. Основным требованием, предъявляемым к объекту исследования, является однородность экспериментальных данных, то есть наличие максимального числа общих признаков. Измерительные средства должны быть такими, чтобы полная предельная погрешность метода измерения не превышала 10 % от допуска на параметр.

На втором этапе проводится непосредственное наблюдение изучаемого параметра, обработка полученных статистических данных и анализ результатов.

*Аналитический метод анализа* производственных погрешностей применяется в тех случаях, когда имеется аналитическое выражение, связывающее выходной параметр изделия с параметрами эле-

ментов конструкции или ТП. В общем случае выходной параметр  $\Pi$  является функцией многих переменных, и его можно выразить уравнением:

$$\Pi = f(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n), \quad (6.1)$$

где  $q_i$  – влияющий параметр,  $n$  – их количество.

В реальных условиях влияющие параметры под действием ТП всегда отличаются от номинальных. Это, в свою очередь, вызывает технологическую погрешность выходного параметра. Рассчитать его можно, если предположить, что отклонения параметров малы ( $\Delta\Pi < \Pi$ ,  $\Delta q_i < q_i$ ), изменения параметров в пределах поля допуска линейны, а также если пренебречь членами второго порядка малости по сравнению с членами первого порядка ( $\Delta q_i \gg \Delta q_i^2$ ).

На основании сделанных допущений установим функциональную зависимость между производственными погрешностями выходного параметра и параметров влияющих элементов, используя правила дифференциального исчисления. Возьмем полный дифференциал выражения (6.1) и, перейдя к конечным приращениям, получим

$$\Delta\Pi = \frac{\partial\Pi}{\partial q_1} \Delta q_1 + \frac{\partial\Pi}{\partial q_2} \Delta q_2 + \dots + \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \Delta q_i + \dots \quad (6.2)$$

Так как погрешности параметров имеют различные размерности, то для удобства расчетов используем относительные величины, разделив (6.2) на (6.1):

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \frac{\partial\Pi}{\partial q_1} \frac{q_1}{\Pi} \frac{\Delta q_1}{q_1} + \frac{\partial\Pi}{\partial q_2} \frac{q_2}{\Pi} \frac{\Delta q_2}{q_2} + \dots + \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \frac{q_i}{\Pi} \frac{\Delta q_i}{q_i} + \dots \quad (6.3)$$

Члены, стоящие перед абсолютными и относительными погрешностями параметров, называются коэффициентами влияния  $B_i$  и показывают, какой вклад каждая из них вносит в погрешность выходного параметра. Уравнение (6.3) можно переписать в виде:

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = B_1 \frac{\Delta q_1}{q_1} + B_2 \frac{\Delta q_2}{q_2} + \dots + B_i \frac{\Delta q_i}{q_i} + \dots + B_n \frac{\Delta q_n}{q_n} = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\Delta q_i}{q_i} \quad (6.4)$$

Так как производственные погрешности носят случайный характер, то при суммировании независимых составляющих отклонения выходного параметра воспользуемся основными правилами теории вероятности: алгебраическим суммированием средних значений; квадратичным суммированием среднеквадратических отклонений.

Используя указанные выше правила суммирования, определим допуск на выходной параметр  $\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right)$ , его математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение по заданным допускам на параметры элементов  $\delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$  и по известным средним значениям  $M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$ :

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \delta_i^2 \left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}; \quad (6.5)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}; \quad (6.6)$$

$$M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) = \sum_{i=1}^n B_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right). \quad (6.7)$$

Полученные уравнения справедливы в том случае, если распределения производственных погрешностей параметров элементов подчиняются нормальному закону распределения и между ними отсутствует статистическая связь.

Каждое изделие может характеризоваться несколькими выходными параметрами  $m$ . В этом случае его точность описывается системой  $m$  уравнений:

$$\begin{aligned} \delta\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right) &= \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}; \\ &\dots \\ \delta\left(\frac{\Delta\Pi_m}{\Pi_m}\right) &= \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Решение уравнений (6.8) позволяет при заданных допусках на параметры элементов определить допуски на выходные параметры (прямая задача), а также при заданных допусках на выходные параметры найти допуски на параметры элементов (обратная задача). Часто оказывается, что обратную задачу решить невозможно, так как число неизвестных превышает число уравнений. В этом случае ис-

пользуется метод последовательного приближения, то есть неизвестным допускам на параметры элементов придают значения до тех пор, пока расчетное значение допуска на выходной параметр не станет меньше или равно заданному допуску на выходной параметр.

Полученные при аналитическом методе анализа зависимости справедливы только в тех случаях, если распределения составляющих погрешностей подчиняются нормальному закону распределения симметричны относительно среднего значения, поля рассеяния совпадают с полями допуска и между ними отсутствует статистическая связь.

### **Методы определения коэффициентов влияния в уравнениях погрешностей выходных параметров сборочных единиц**

Существует несколько методов определения коэффициентов влияния в уравнениях погрешностей выходных параметров, но наибольшее распространение получили аналитический метод (прямого дифференцирования) и экспериментальные – метод малых приращений, на основе планирования эксперимента, метод статистических испытаний и др.

При использовании аналитического метода в соответствии с (6.3) составляется общее выражение коэффициента влияния:

$$V_i = \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{\Pi}. \quad (6.9)$$

Для определения коэффициентов влияния по этому уравнению необходимо следующее: 1) взять частные производные выходного параметра по каждому из параметров деталей; 2) умножить полученные производные на отношение параметра  $q_i$ -го элемента к значению выходного параметра; 3) найти численные величины, подставив номинальные значения параметров в полученные выражения коэффициентов влияния.

Если выходной параметр связан с влияющими параметрами дробной линейной, рациональной или иррациональной функцией

$$\Pi = Q/H, \quad (6.10)$$

где  $Q = Q(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ ,  $H = H(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$  — многочлены, у которых показатель степени  $i$ -го параметра может быть больше единицы, то коэффициенты влияния могут быть определены по формуле:

$$B_i = \frac{dQ(q_i)}{Q} - \frac{lH(q_i)}{H}, \quad (6.11)$$

где  $d$  – показатель степени  $q_i$  параметра в числителе;

$l$  – показатель степени того же параметра в знаменателе;

$Q(q_i)$  и  $H(q_i)$  – части многочленов числителя  $Q$  и знаменателя  $H$ , в которые входит параметр  $q_i$ .

Уравнение позволяет исключить нахождение частных производных при определении коэффициентов влияния и значительно упростить расчеты на точность.

Метод прямого дифференцирования применяется в тех случаях, когда имеется строгая математическая модель, связывающая выходные характеристики со всеми параметрами элементов сборочной единицы, сопровождается статистически строгой оценкой адекватности полученного уравнения и значимости его коэффициентов. Если получение такой модели в аналитической форме невозможно, то используют экспериментальные методы.

Из экспериментальных методов вследствие своей простоты чаще других для определения коэффициентов влияния применяется метод малых приращений. Он основан на линейности исходного уравнения (6.4) погрешности выходного параметра и вытекающем отсюда принципе независимости действия погрешностей. Это позволяет анализировать действие каждой составляющей погрешности отдельно, полагая остальные погрешности равными нулю. Уравнение (6.4) в этом случае принимает вид:

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = B_1 \frac{\Delta q_1}{q_1}, \text{ откуда } B_1 = \frac{\Delta\Pi}{\Pi} \div \frac{\Delta q_1}{q_1}. \quad (6.12)$$

Для реализации этого метода собирается исследуемое изделие с параметрами элементов, принятыми за номинальные. Затем, последовательно изменяя значение каждого параметра (в пределах 5 – 10 %) при неизменных остальных, определяют приращение выходного параметра и по уравнению (6.12) коэффициенты влияния. Погрешность определения коэффициентов влияния методами малых приращений в значительной степени зависит от выбора измерительной аппаратуры и принимает малое значение лишь в том случае, если аппаратурная ошибка по крайней мере на порядок меньше, чем приращение параметра элемента и выходного параметра.

Метод статистического планирования эксперимента в сочетании с регрессионным анализом опытных данных позволяет косвенным путем получить математические модели для изделий, содержащих элементы как с линейными, так и с нелинейными параметрами.

### **Методы обеспечения заданной точности выходных параметров сборочных единиц**

Существуют несколько методов обеспечения требуемой точности изготовления сборочных единиц ЭА: полной взаимозаменяемости (МПВ), неполной взаимозаменяемости (МНВ), групповой взаимозаменяемости (МГВ), подгонки (МП) и регулировки (МР). Выбору метода предшествует работа по определению выражения, связывающего производственные погрешности выходных параметров с погрешностями параметров составляющих деталей.

**Метод полной взаимозаменяемости.** Его сущность заключается в том, что требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается включением в их состав деталей с определенными производственными допусками на их параметры без какого-либо дополнительного подбора или подгонки. При этом допуски на параметры деталей рассчитываются путем решения системы уравнений, в которой известными величинами являются производственные допуски на выходные параметры.

Методу полной взаимозаменяемости присущи следующие достоинства: 1) простота достижения требуемой точности выходных параметров сборочных единиц, так как их изготовление сводится к сборке и монтажу; 2) значительное упрощение ТП из-за отсутствия операций регулировки, что облегчает его нормирование и перевод на поточные методы производства, делает экономичным; 3) замена вышедшей из строя сборочной единицы производится без дополнительных регулировочных операций; 4) широкое кооперирование предприятий по изготовлению отдельных взаимозаменяемых элементов и сборочных единиц.

Границы применения метода полной взаимозаменяемости определяются экономикой производства.

**Метод неполной взаимозаменяемости.** Сущность этого метода заключается в том, что требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается путем установки более широких допусков на параметры комплектующих ЭРЭ. В результате этого получается некоторое количество изделий, у которых погрешности вы-

ходных параметров вышли за пределы заданного допуска. Так как процент брака невелик, то дополнительные затраты труда и средств на исправление брака меньше, чем затраты на изготовление ЭРЭ с более жесткими допусками на их параметры.

Основным преимуществом МНВ, по сравнению с МПВ, является использование более широких экономически выгодных допусков на параметры ЭРЭ, что особенно важно при жестких допусках на производственные погрешности выходных параметров сборочных единиц.

**Метод групповой взаимозаменяемости.** Сущность метода заключается в том, что требуемая точность выходных параметров достигается путем включения в конструкцию сборочных единиц одного или нескольких схемных элементов с узкими допусками на их параметры, полученными в результате селекции ЭРЭ. Селекции подвергаются элементы, погрешности которых сильнее других влияют на производственные погрешности выходных параметров изделий.

Расчет допусков на производственные погрешности параметров схемных элементов проводится в два этапа. Вначале определяют допуски на параметры элементов, но при этом полагают, что погрешности сильно влияющих элементов равны нулю. В этом случае допуск на выходной параметр будет меньше заданного даже при широких, экономически оправданных допусках на параметры рассчитываемых ЭРЭ. На втором этапе определяют допуски на параметры сильно влияющих элементов из равенства методом последовательного подбора.

Преимуществом МГВ, по сравнению с МПВ, является возможность получения повышенной точности выходных параметров сборочных единиц.

При применении МГВ следует помнить, что увеличение числа селектируемых элементов и установление очень узких допусков на них может привести к значительному снижению экономичности метода. Поэтому при достижении требуемой точности по указанному методу следует включать в сборочную единицу 1 – 2 селектируемых элемента и устанавливать допуски на их параметры, близкие к наименьшему производственному допуску на них.

**Метод подгонки.** Отличие этого метода от МГВ состоит в том, что требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается подбором одного или нескольких ЭРЭ с постоянными параметрами, находящимися в разных производственных партиях.

Постановка такого элемента в изделие обеспечивает частичную или полную компенсацию производственных погрешностей выходных параметров.

В качестве компенсирующего рекомендуется выбирать элемент, погрешность параметра которого оказывает наиболее сильное влияние на выходные параметры сборочной единицы.

Установление экономически оправданных допусков на параметры других элементов, входящих в изделие, приведет к значительному увеличению производственного допуска на выходной параметр.

Основным преимуществом метода подгонки является возможность получения высокой точности выходных параметров сборочных единиц при больших допусках на параметры ЭРЭ.

Недостатком метода являются необходимость дополнительных работ, связанных с измерениями и подгонкой параметров сборочных единиц, высокая стоимость этих операций.

**Метод регулировки.** Сущность метода заключается в том, что требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается путем изменения значения параметра специального регулировочного элемента. Наличие такого элемента с переменным параметром позволяет получить необходимую точность не только в период производства, но и при эксплуатации аппаратуры. Вторым достоинством метода регулировки является возможность достижения требуемой точности выходных параметров при широких допусках на параметры ЭРЭ и наличии больших значений паразитных монтажных параметров.

К недостаткам метода следует отнести следующее: 1) снижение надежности аппаратуры, так как надежность регулировочных элементов значительно ниже надежности элементов с постоянными параметрами ввиду наличия токосъемника, необходимости фиксации положения, трудности влагозащиты и т. д.; 2) усложнение ТП регулировочными операциями, повышение затрат на изготовление изделий.

## **6.5. Очистка и контроль печатных узлов после сборки и монтажа**

С точки зрения физики и химии абсолютно чистых поверхностей не бывает из-за явлений адсорбции. Свежеочищенная поверхность

имеет высокий уровень свободной энергии, что приводит к быстрому повторному загрязнению и увлажнению. Особенная опасность повторного загрязнения состоит в том, что его химический состав неизвестен и меняется. При выборе технологии очистки необходимо тщательно оценивать, какие вещества остаются на поверхности или в приповерхностном слое, не вредны ли они.

Необходимость очистки в производстве электронных аппаратов обусловлена требованиями, связанными с обеспечением стабильности параметров и надежности. Электронные аппараты загрязняются при выполнении различных технологических операций производства и в процессе эксплуатации изделий.

Низкое качество очистки приводит к резкому снижению качества аппаратуры. Снижается стабильность сопротивления между проводниками печатных плат, электрическая мощность собранных на плате электронных компонентов. Возрастают токи утечки, переходные контактные сопротивления. Медленно изменяется емкость между отдельными компонентами навесного монтажа, и возникают дополнительные паразитные емкости.

При длительном хранении аппаратуры с плохо очищенными узлами разложение загрязнений может вызвать нарушение электроизоляционных и влагозащитных покрытий, коррозию деталей и покрытий. Это сокращает гарантированный срок хранения и эксплуатации электронных аппаратов. Загрязнения в аппаратуре, не удаленные в процессе производства, содействуют ускоренному адсорбционному пылевому загрязнению в процессе эксплуатации. Это приводит к необходимости более частых ремонтно-профилактических работ, что значительно увеличивает эксплуатационные расходы и уменьшает общий срок эксплуатации изделий. Качественная же очистка не только повышает стабильность параметров и надежность изделий, но и значительно повышает общую культуру производства, улучшает товарный и эстетичный вид готовой продукции.

### **Виды загрязнений**

Загрязнения в электронных аппаратах имеют как неорганическое, так и органическое происхождение. Неорганические загрязнения, в свою очередь, делятся на растворимые и нерастворимые (твердые частицы). Они также различаются по способности противостоять ударным нагрузкам и прочности связей с очищаемой поверхностью, могут быть полярными (ионы соединений) или неполярными.

При производстве узлов на печатных платах необходимо очищать поверхность многократно – перед нанесением покрытий, травлением, удалять остатки хлорного железа, защитных красок, лаков, флюсов после лужения и продуктов их разложения, жировых загрязнений от инструмента, рук рабочих. Должны быть устранены остатки флюсов, жировых и масляных загрязнений после пайки, а также продукты их разложения.

Все вышеперечисленные загрязнения можно отнести к жидким. Кроме того, должны быть удалены сухие остатки флюсов, затвердевшая канифоль, продукты деструкции и окисления, твердые частицы, стружка и т. д. – твердые загрязнения. Необходимо удалять также смазки, консервирующие покрытия, а при ремонтно-профилактических работах очищать аппаратуру от пылевых адсорбционных загрязнений. В этом случае часто становится необходимой полная или частичная разборка изделия, а процесс очистки носит сложный и трудоемкий характер. Выбирая способ очистки и очищающие материалы, технологу следует прогнозировать результаты выполнения технологического процесса.

Печатный узел с поверхностным монтажом содержит внутренние полости, в том числе расположенные под электронными компонентами. Эти полости связаны с поверхностью очень малыми узкими вертикальными и горизонтальными зазорами между элементами конструкции или их выводами. Поэтому очистка от остатков паяльных флюсов представляет сложный, трудоемкий и ответственный технологический процесс, определяющий надежность, долговечность и другие эксплуатационные показатели электронных изделий.

Растворимые загрязнения могут удаляться водой, водными и органическими растворителями и смесями, содержащими добавки, повышающие эффективность очистки.

При использовании моющих растворов, которые легко гидролизуются и обладают высокой моющей способностью, разнообразных стиральных порошков с примесями серы и хлора, поверхностно-активных добавок следует учитывать возможность образования новых гидрофобных пленок, образуемых продуктами разложения и взаимодействия этих моющих растворов. Вновь образованная гидрофобная пленка может стать не меньшей помехой для нанесения необходимого защитного покрытия, чем пленка первоначальных загрязнений.

При использовании мыла для очистки или в составе флюсующих материалов (мыло представляет собой натриевые или калиевые соли жирных высокомолекулярных кислот, обладающих флюсующими свойствами) оно может взаимодействовать с солями кальция или магния, которые часто присутствуют в воде. При этом на очищаемой поверхности образовывается осадок кальциевых или магниевых солей жирных кислот.

Промывочная нефилтрованная вода может служить источником загрязнений в виде твердых частиц, так как в водопроводной воде их содержится с избытком: до 10 шт./см<sup>2</sup> размером в среднем 1 мкм. Поэтому для их устранения, а также для удаления растворенных в воде солей следует использовать бидистиляцию.

Следует учитывать, что при монтаже на поверхность очистка приобретает особое значение. Для узлов и блоков с поверхностным монтажом характерна повышенная плотность компоновки, меньшая высота столбиковых выводов и очень малые зазоры между ними, а это ухудшает условия теплового режима пайки. В процессе пайки таких узлов температура нагрева на 10 – 40 °С превышает температуру нагрева по традиционной технологии. Совместное действие повышенной температуры и остатков ионных загрязнений усложняет условия очистки и повышает вероятность отказа аппаратур. Промежуток времени между пайкой и очисткой должен быть минимальным.

К качеству очистки электронной аппаратуры, предназначенной для использования в быту и в профессиональных целях, от органических загрязнений предъявляются менее жесткие требования, чем к специальной аппаратуре (военного назначения). Однако большинство изготовителей электронных средств, особенно производители вычислительной техники, считают целесообразным производить полное удаление остатков флюса, что представляется экономически выгоднее ремонта функциональных узлов, вышедших из строя. Дорогая и сложная очистка печатных плат после сборки и монтажа проводится из-за катастрофических последствий, к которым могут привести неудаленные остатки флюсов в процессе эксплуатации аппаратуры.

В современной технологии монтажа наибольшее распространение получили флюсы канифольные слабо активированные или с низким содержанием твердых веществ на синтетической основе. Такие флюсы обычно не требуют удаления остатков при эксплуатации электронной аппаратуры в нормальных условиях. Однако существует ряд

причин, заставляющих производить удаление остатков «безотмывочных» флюсов после пайки. Среди основных можно назвать следующие.

1 – *Высокая температура.* Чистая специально обработанная канифоль и искусственные смолы примерно до температуры 100°C являются хорошими изоляторами. При повышении температуры свыше 100°C канифоль сначала размягчается, а потом начинает плавиться и оказывает диссоциирующее воздействие (приводит к образованию карбоксильных ионов). В результате возникающей ионизации изменяются электрические свойства, и канифоль становится проводником. Таким образом, возникает опасность возникновения повышенных токов утечки и коротких замыканий.

2 – *Повышенная влажность.* Столь малые токи утечки, как  $10^{-12}$  А, иногда оказывают существенное влияние на нарушение работы элементов логики. Токи утечки могут возникать за счет ионных компонентов. Однако даже канифольные остатки флюса могут стать проводником при наличии тонкого слоя влаги. Влага в сочетании с диоксидом углерода, адсорбированным из воздуха, формирует на поверхности канифоли карбоновую кислоту, которая имеет высокое содержание ионов. Наличие влаги также может способствовать росту дендритов.

3 – *Влагозащитное покрытие.* Для предохранения от воздействия влаги и агрессивных сред печатные узлы часто покрываются влагозащитными покрытиями. При этом особое внимание следует уделить совместимости влагозащитных материалов с остатками флюсов. В противном случае возможно ухудшение адгезии, отшелушивание и отслаивание влагозащитных покрытий.

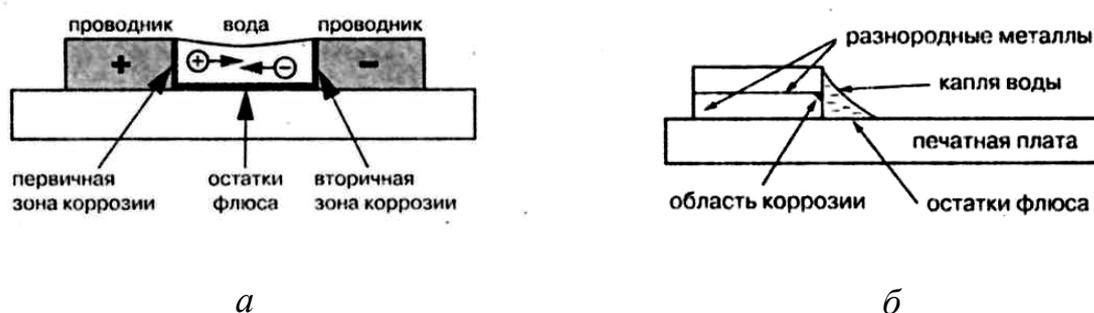
4 – *Внешний вид изделия.* Как правило, остатки флюсов, не требующих отмывки, малозаметны и незначительно ухудшают внешний вид печатного узла. В ряде случаев их приходится удалять по требованию заказчиков в косметических целях.

5 – *Внутрисхемный контроль.* Неудаленные остатки флюса могут покрывать тестовые площадки. Так как канифоль при комнатной температуре является хорошим изолятором, тестовые точки обладают высоким сопротивлением контактов, препятствуя обеспечению внутрисхемного контроля.

6 – *Ручная пайка.* Отечественные производители достаточно часто применяют жидкие «безотмывочные» флюсы для ручной пайки, полагая, что их остатки не требуют удаления. Однако большинство

жидких флюсов, не требующих очистки, специально разработаны для групповой пайки волной припоя, только этот способ обеспечивает полное выгорание и разложение активаторов флюсов, не требуя обязательного удаления остатков после пайки. Необходимость процесса удаления при ручной пайке вызвана частичным выгоранием активаторов.

Активаторы, входящие в состав флюсов, содержат ионные соединения (соли и кислоты), которые в свою очередь могут вступать в реакцию с влагой, влияя на уменьшение поверхностного сопротивления. Несмотря на то, что остатки флюсов очень редко приводят к отказам в процессе работы, последствия коррозии могут быть очень серьезными. Наиболее распространенный механизм коррозии – электрический. Механизм образования электрической коррозии приведен на рис. 6.21.



**Рис. 6.21.** Электрическая коррозия:

*а* – между смежными проводниками при наличии электрического поля и водной пленки; *б* – разнородных материалов проводников с разными потенциалами

В данном случае вовсе не обязательно приложение внешнего напряжения при контакте двух разнородных металлов с разными потенциалами, например, медного проводника (+0,34 В), покрытого оловянно-свинцовым припоем (-0,14 В), так при наличии влаги и небольшого количества ионных компонентов возникает напряжение короткого замыкания и начинает протекать ток.

Печатные узлы и компоненты, подвергаемые очистке, должны соответствовать определенным требованиям – быть пригодными к отмывке, то есть обеспечивать достаточные зазоры под корпусами компонентов и не содержать открытых сквозных переходных отверстий. Все электронные компоненты, устанавливаемые на печатные платы, должны быть герметичными. Особое внимание следует уделить подстроенным компонентам, переключателям и разъемам.

## Моющие среды

Для удаления как полярных, так и неполярных загрязнений используют очистные жидкости (моющие растворы). Выбор типа жидкости обусловлен составом и природой загрязнений. Находят применение два типа жидкостей:

- водные растворы моющих средств;
- органические растворители.

Последние могут быть разделены на три группы по очищающей способности:

1 – гидрофобные (не смешиваются с водой) – применяются для очистки от органических загрязнений, в незначительной степени – от полярных соединений;

2 – гидрофильные (смешиваются с водой) – растворяют как полярные, так и неполярные (хуже, чем гидрофобные жидкости) загрязнения;

3 – азеотропные – представляют собой в основном смесь гидрофобных и гидрофильных.

Жидкости для очистки должны соответствовать ряду требований:

- обладать высокой энергией по отношению к загрязняющим веществам;
- иметь возможно большее поверхностное натяжение для облегчения проникновения в зазоры и как можно меньшее поверхностное натяжение для циркуляции в ограниченных объемах;
- быть инертными по отношению к элементам конструкции изделия, оборудования, покрытиям и маркировочным отпечаткам;
- быть пожаровзрывобезопасными и нетоксичными;
- иметь минимальную стоимость, обладать возможностью регенерации;
- быть экологически-чистыми.

В связи с противоречивостью перечисленных требований выбор состава моющего раствора проводится на основе компромисса. Водорастворимые, а также физически адсорбированные загрязнения (пыль, волокна, абразив, металлические включения и т. д.), связанные с поверхностью силами физической адсорбции удаляют применением водных моющих растворов, в том числе с использованием поверхностно активных веществ (ПАВ). Для удаления полярных (олеиновая, стеариновая кислоты, канифоль, синтетические вещества и смолы), а также неполярных загрязнений органического происхождения (минеральных масел, вазелина, воска, нефтяных парафинов) используется целая гамма органических растворителей.

## Технологические процессы очистки

Все процессы удаления загрязнений можно свести к двум основным – удалению физических и химических загрязнений. В промышленности нашел широкое применение целый ряд типовых технологических процессов очистки. Каждый из методов обладает определенными достоинствами и преимуществами, имеет отдельные недосограничения.

Эффективность очистки определяется совокупностью сложных физико-химических процессов, зависящих от свойств моющих композиций, их взаимосвязи с типами удаляемых загрязнений, режимами технологической обработки и конструктивными особенностями изделий и технологического оборудования.

Очистка может производиться традиционными методами, а также их комбинацией:

- ручная очистка с использованием тампона или кисти, смоченной растворителем;

- механизированная очистка щетками – производится при вращении нейлоновых щеток и струйной подаче моющего раствора под давлением;

- окунание в ванну на определенный срок (замачивание) с последующей протиркой кистью, щеткой или тампоном;

- очистка в ванне с барботирующим моющим раствором – осуществляется продувка раствора воздухом, оказывающим механическое воздействие, перемешивающим раствор;

- очистка в ванне с механическим перемешиванием растворителя при помощи активатора либо центрифугированием изделия в растворе (по типу стиральных машин);

- виброочистка в ванне с низкой частотой вибрации (~100 Гц) растворителя – в установках, содержащих несколько последовательно установленных ванн, помещаются электромагнитные или электромеханические вибраторы, работающие с частотой 25 – 100 Гц; эффективность очистки зависит от частоты колебаний, положения очищаемой поверхности в ванне, температуры и давления паров очищающей жидкости и продолжительности очистки; вибрация ускоряет процесс растворения за счет нарушения пограничного слоя, перемещения свежих порций растворителя к очищаемой поверхности и удаления отделившихся частиц загрязнений и насыщенного загрязненными растворителя из зоны очистки; растворитель разрушает однородность загрязнений, что облегчает возможность их диспергирования из-за уве-

личения площади соприкосновения; недостатки – динамическое действие на очищаемые изделия, высокие шумовые характеристики установок;

– ультразвуковая очистка является наиболее эффективным методом, однако может повреждать активные электронные компоненты – полупроводниковые приборы и интегральные схемы; кроме того, оборудование для ультразвуковой очистки более дорогостоящее, сложное и при его эксплуатации значительные трудности представляет контроль допустимых режимов озвучивания; кроме механического разрушения одновременно ускоряется химическое взаимодействие моющей среды с загрязнениями за счет акустических течений, образующихся в жидкости; производится также интенсивное перемешивание моющей среды, и на поверхности создается защитная пленка, препятствующая коррозии; химическое взаимодействие моющей жидкости с загрязнениями усиливается возникающей кавитацией и радиационным давлением;

– очистка в парах растворителя обычно проводится в качестве финишной – изделие вводится в паровую зону установки, создаваемую кипячением моющего раствора; растворитель конденсируется на холодном изделии и, стекая, смывает загрязнения в раствор; для повышения эффективности очистки изделие поливают дистилатом, полученным на змеевиках охлаждения, улавливающих пары растворителя, то есть проводят ополаскивание;

– струйная очистка – производится направлением на изделие струи (струй) моющей жидкости под давлением;

– плазменная очистка основана на химическом взаимодействии загрязнений с вводимыми в камеру вакуумной установки газами, не прибегая к погружению в жидкость; можно использовать любой разряд низкого давления – тлеющий, дуговой, высокочастотный и сверхвысокочастотный; в настоящее время используется в полупроводниковой и тонкопленочной гибридной технологии.

Объединение нескольких методов очистки в одном технологическом процессе значительно повышает ее эффективность как по производительности, так и по качеству.

Среди перечисленных методов вне конкуренции находится ультразвуковой, который обеспечивает удаление 98 – 100 % загрязнений (и более – при оценке взвешиванием до и после очистки контролируемой массы загрязнений обнаруживается убыль массы изделия). Ручная и механизированная очистка удаляет 80 – 92 % загрязнений, вибрационная – 92 – 96 %.

Конструкция изделия также существенна для выбора метода очистки и сказывается на результатах. Так при очистке узлов, выполненных только монтажом на поверхность, возникают сложности, обусловленные изменением по сравнению со смешанными или с традиционным монтажом (где применяются компоненты со штырьковыми выводами). Сказывается повышение плотности компоновки и переход от припоев и флюсов к паяльным пастам.

Для технологии монтажа на поверхность в дополнение к традиционным разработаны свои методы очистки:

- погружение в кипящий растворитель – сначала изделие промывают струей жидкости, затем следует основной процесс очистки погружением в кипящую жидкость и окончательная промывка струей дистиллированного растворителя – метод позволяет удалять остатки флюса на печатных платах с узкими проводниками и зазорами между ними и при малых зазорах между платами и корпусами компонентов;

- погружение в кипящий растворитель со струей жидкости сверху ПП – для ПП с особо малым зазором между ПП и корпусом компонента – сопла для формирования струй жидкости над поверхностью кипящего растворителя расположены в начале и в конце зоны;

- погружение в кипящий растворитель с наложением ультразвука – один из наиболее эффективных методов – при этом озвучивание должно быть допустимым для компонентов;

- погружение в жидкость с наложением ультразвука и струей жидкости сверху ПП -жидкость нагрета;

- очистка погружением в кипящий растворитель струями жидкости сверху и снизу ПП; применяется для конструкций, где компоненты расположены с двух сторон ПП; над и под ПП распыляют дистиллированную жидкость, турбулентный поток вымывает загрязнения из труднодоступных мест;

- очистка струями жидкости на горизонтальном конвейере – сопла, расположенные снизу и сверху на расстоянии 50 – 150 мм от поверхности узла, имеют конструкцию, создающую плоские и веерные струи;

- очистка струями жидкости высокого давления и большой мощности – обеспечивает удаление остатков флюса при зазорах 0,125 мм и менее – плоскую струю («жидкий нож») направляют непосредственно в щель под корпуса компонентов, сопла реактивного типа создают веерообразную струю, которая обладает высокой скоростью взаимодействия с ПП;

– замкнутый цикл очистки узлов применяют для очистки узлов наиболее сложных конструкций, представляет комбинацию следующих методов: пропитка в парах жидкости (на входе установки); предварительная струйная очистка горячим растворителем; основная очистка погружением в кипящий растворитель струями жидкости сверху и снизу печатных плат, дополнительная очистка; окончательная очистка струями высокочистой жидкости; сушка (на выходе установки).

Для узлов с высоким уровнем загрязнений может быть добавлена очистка в ультратразвуковой ванне, а также струями высокого давления. Комбинированные методы очистки являются наиболее эффективными.

### **Оборудование для очистки**

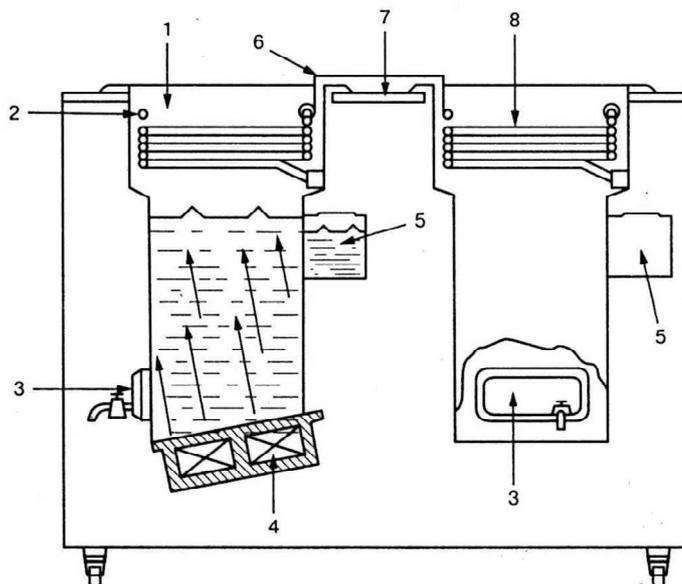
Для очистки от остатков флюсов, масел и других загрязнений используются установки и системы тупикового и проходного (конвейерного) типа. Конструкции оборудования определяются выбранным методом очистки или их комбинацией, а также составом моющего раствора. Выбор типа оборудования определяет необходимый уровень производительности, сложность и назначение очищаемых изделий.

При очистке вручную для моющего раствора СБС 1:1 (спиртобензиновая смесь) часто используют простейшие цеховые ванны. Тупиковые установки с ручной загрузкой, перемещением и выгрузкой печатных узлов предназначены для очистки в органических моющих растворах с использованием ультразвука, кипячения или обработки паром. При этом ванны с кипящим растворителем дополнительно выполняют функцию регенератора, очищая моющий раствор дистилляцией. Конвейерные линии очистки используют водные моющие растворы и струйную систему очистки.

Постоянная рециркуляция растворителя позволяет значительно увеличить число узлов, очищенных каждым его литром. Применение пожаровзрывобезопасных растворителей с высокой точкой кипения уменьшает вероятность возникновения пожара, а также опасность попадания растворителя на кожу оператора, так как он не вступает с ним.

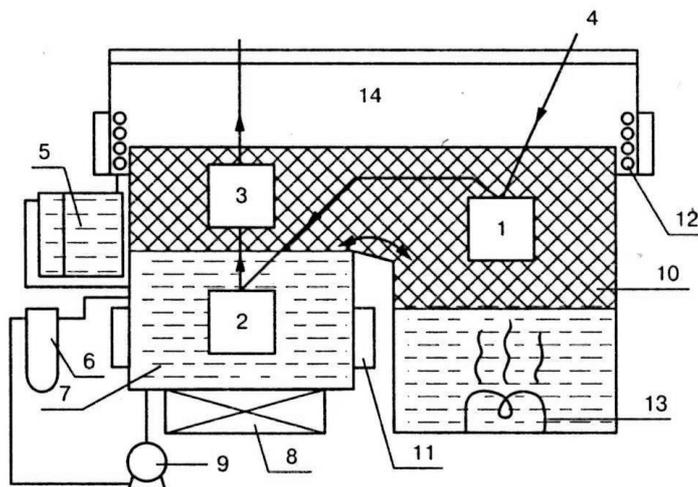
На рис. 6.22 – 6.24 приведены схемы отдельных установок очистки. Очистка и обезжиривание занимают всего несколько минут. Детали и узлы извлекаются из оборудования чистыми и сухими, готовыми

к следующей операции. При паровой очистке все время используется только чистый растворитель, нет никакого повторного осаждения или загрязнения.



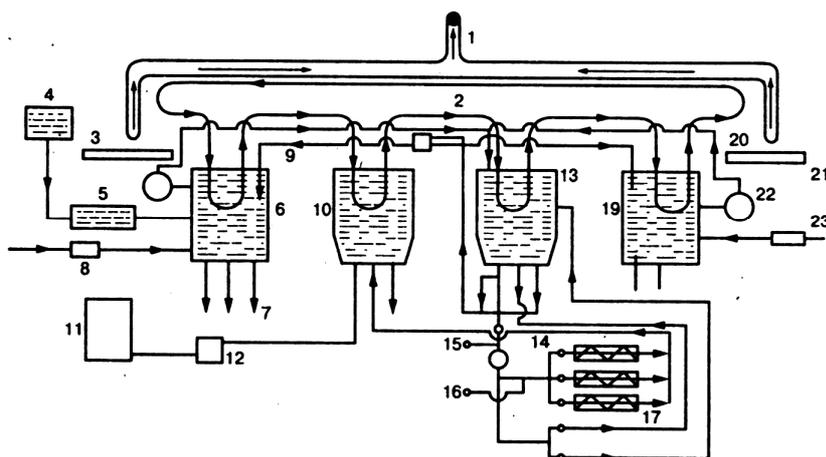
**Рис. 6.22.** Чертеж общего вида установки типа УЗО - 4М1

- 1 – ванна, полированная из нержавеющей стали;
- 2 – терморегулятор; 3 – дверца отстойника;
- 4 – преобразователи; 5 – переливная камера;
- 6 – щиток из нержавеющей стали; 7 – крышка;
- 8 – конденсирующие змеевики



**Рис. 6.23.** Технологическая схема установки фирмы Radyne

- 1, 2, 3 – стадии обработки; 4 – путь движения деталей;
- 5 – сепаратор воды; 6 – фильтр;
- 7 – отстойник; 8 – преобразователи; 9 – насос;
- 10 – паровая зона; 11 – рубашка охлаждения;
- 12 – конденсирующий змеевик; 13 – кипящий отстойник;
- 14 – объем над жидкостью и паром



**Рис. 6.24.** Схема установки ультразвуковой очистки поточного типа

- 1 – отсос вредных паров; 2 – конвейерная цепь;
- 3 – ленточный конвейер; 4 – коллектор растворителей;
- 5 – сепаратор воды; 6 – промывочная ванна; 7 – водосток;
- 8 – соленоидный вентиль; 9 – охлаждающие змеевики;
- 10 – ванна ультразвуковой очистки; 11 – генератор;
- 12 – трансформатор; 13 – ванна струйной промывки;
- 14 – насос; 15 – вакуумметр; 16 – датчик давления;
- 17 – теплообменник; 18 – фильтрующая установка;
- 19 – ванна паровой обработки; 20 – ленточный конвейер;
- 21 – разгрузка; 22 – сепаратор воды; 23 – источник пара

Для оборудования используют нержавеющей сталь, змеевики охлаждения изготавливают из меди, уплотнения из фторопласта. Модульное исполнение оборудования расширяет возможности выбора наиболее эффективного технологического процесса очистки.

### **Контроль качества очистки**

Контроль качества очистки может проводиться прямыми и косвенными методами. Прямые методы предусматривают оценку качества очистки печатного узла, при контроле косвенными методами определяется концентрация загрязнений в последней ванне.

В промышленности метод контроля выбирают так, чтобы он наиболее полно соответствовал требованиям, предъявляемым к конкретному изделию.

Визуальный контроль позволяет определить наличие загрязнений без идентификации количества и состава. Метод применяется наиболее широко ввиду простоты и доступности. Его эффективность можно повысить использованием ультрафиолетового излучения.

В производстве электронной аппаратуры применяется ряд методов контроля качества очистки:

– испытания на разрыв водной пленки – тонкая пленка воды не имеет разрывов, пока она не станет настолько тонкой, что испарение вызовет появление сухих мест, либо не появятся интерференционные цвета – критерий качества – время от извлечения из воды до разрыва водной пленки; метод позволяет обнаружить  $(0,2 - 0,5) \cdot 10^{-7}$  г/см<sup>2</sup> загрязнений;

– метод распыления на поверхность деионизованной (бидистиллированной) воды – чистая поверхность покрывается сплошным тонким непрерывным слоем, в местах загрязнения имеет место несмачивание – позволяет обнаружить  $1,6 \cdot 10^{-8}$  г/см<sup>2</sup> загрязнений;

– люминесцентный метод контроля основан на явлении флуоресцентного свечения веществ, входящих в состав флюсов (канифоли, салициловой кислоты, семикарбоната гидрохлорида) при освещении изделия лампами ультрафиолетового излучения – точность – до  $1 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>2</sup> загрязнений, которые определяют по видимому свечению – голубому для канифоли марки «А», желтому – для канифоли марки «В» и т. д.;

– метод нефелометрирования основан на изменении интенсивности оптической плотности водноспиртовых растворов канифоли в зависимости от концентрации в них канифольного флюса после контрольной отмывки узла;

– кондуктометрический метод основан на измерении сопротивления дистиллированной воды до и после контрольной отмывки в ней изделия;

– метод ИК-спектromетрии позволяет определить наличие и состав органических загрязнений на поверхности печатного узла – чувствительность метода  $1 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>2</sup>;

– метод поверхностного сопротивления основан на измерении поверхностного сопротивления печатной платы или узла с использованием специальных тестовых структур – при наличии на плате загрязнений (в том числе под корпусами) эта величина, особенно под воздействием влаги и тепла, резко снижается.

Таким образом, при определении загрязнения непосредственно на поверхности изделия либо экстрагировании загрязнения чистым растворителем и физико-химическом или химическом анализе экстрактов, применяемые прямые и косвенные методы позволяют оценить качество очистки как при исследованиях, так и в условиях производства.

## 6.6. Тест для проверки знаний

1. Какая схема сборки отражает последовательность процесса сборки:

- а) «веерного» типа;
- б) стационарная;
- в) с базовой деталью.

2. Какая схема сборки показывает, из каких деталей образуется сборка:

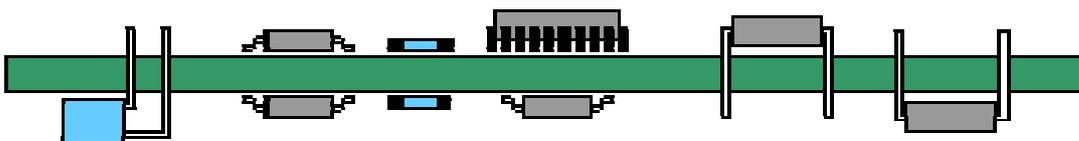
- а) «веерного» типа;
- б) стационарная;
- в) с базовой деталью.

3. К какому типу монтажа относится данная схема:



- а) выводной монтаж;
- б) поверхностный монтаж;
- в) смешанный монтаж.

4. К какому типу монтажа относится данная схема:



- а) выводной монтаж;
- б) поверхностный монтаж;
- в) смешанный монтаж.

5. Какой метод изготовления трафаретов обеспечивает наилучшую точность размеров:

- а) лазерная резка;
- б) гальванопластика;
- в) химическое травление.

6. Расположите основные операции поверхностного монтажа в правильном порядке:


- установка элементов;
- контроль;
- нанесение припойной пасты;
- оплавление припойной пасты;
- отмывка.

7. Моющие растворы, которые применяются для очистки от органических загрязнений, в незначительной степени – от полярных соединений:

- а) гидрофобные;
- б) гидрофильные;
- в) азеотропные.

8. Моющие растворы, которые растворяют как полярные, так и неполярные (хуже, чем гидрофобные жидкости) загрязнения:

- а) гидрофобные;
- б) гидрофильные;
- в) азеотропные.

9. Моющие растворы, которые представляют собой в основном смесь гидрофобных и гидрофильных:

- а) гидрофобные;
- б) гидрофильные;
- в) азеотропные.

10. Контроль качества очистки, который предусматривают оценку качества очистки печатного узла:

- а) прямой;
- б) косвенный.

11. Контроль качества очистки, который определяется концентрацией загрязнений в последней ванне:

- а) прямой;
- б) косвенный.

12. Метод, в котором требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается включением в их состав деталей с оп-

ределенными производственными допусками на их параметры без какого-либо дополнительного подбора или подгонки:

- а) метод полной взаимозаменяемости;
- б) метод неполной взаимозаменяемости;
- в) метод групповой взаимозаменяемости;
- г) метод подгонки;
- д) метод регулировки.

13. Метод, в котором требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается путем изменения значения параметра специального регулировочного элемента:

- а) метод полной взаимозаменяемости;
- б) метод неполной взаимозаменяемости;
- в) метод групповой взаимозаменяемости;
- г) метод подгонки;
- д) метод регулировки.

14. Метод, в котором требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается подбором одного или нескольких ЭРЭ с постоянными параметрами, находящимися в разных производственных партиях:

- а) метод полной взаимозаменяемости;
- б) метод неполной взаимозаменяемости;
- в) метод групповой взаимозаменяемости;
- г) метод подгонки;
- д) метод регулировки.

15. Метод, в котором требуемая точность выходных параметров сборочных единиц достигается путем установки более широких допусков на параметры комплектующих ЭРЭ:

- а) метод полной взаимозаменяемости;
- б) метод неполной взаимозаменяемости;
- в) метод групповой взаимозаменяемости;
- г) метод подгонки;
- д) метод регулировки.

16. Метод, в котором требуемая точность выходных параметров достигается путем включения в конструкцию сборочных единиц од-

ного или нескольких схемных элементов с узкими допусками на их параметры, полученными в результате селекции ЭРЭ:

- а) метод полной взаимозаменяемости;
- б) метод неполной взаимозаменяемости;
- в) метод групповой взаимозаменяемости;
- г) метод подгонки;
- д) метод регулировки.

## ОТВЕТЫ

раздел 1	раздел 2	раздел 3	раздел 4	раздел 5	раздел 6
1 б)	1 б)	1 б)	1 а) в) д)	1 б) г)	1 в)
2 а)	2 а)	2 б)	2 б)	2 б)	2 а)
3 б)	3 в)	3 а)	3 а)	3 б)	3 б)
4 а)	4 а)	4 в)	4 в)	4 б)	4 в)
5 в)	5 в)	5 в)	5 а)	5 а) в)	5 б)
6 а)	6 а)	6 в)	6 б)	6 г)	6 - 2; 4;
7 в)	7 в)	7 б)	7 а)	7 б)	1; 3; 5
8 б)	8 а)	8- 5; 1; 4; 2;	8 в)	8 в) г)	7 а)
9 а)	9 б)	6; 3	9 б)	9 б)	8 б)
10 а)	10 а); б)	9 - 2; 4; 1; 5;	10 а)	10 в)	9 в)
11 б)	11 б); в)	3;	11 а)	11 б) г)	10 а)
12 в)	12 а)	10 б)	12 б)	12 а)	11 б)
13 в)	13 г)	11 а)	13 б)	13 б)	12 а)
14 б)	14 б) г)	12 б)	14 а) г)	14 в)	13 д)
15 а)	15 - 3; 2; 1;	13 в)	15 б)		14 г)
16 б)	4	14 б)	16 в)		15 д)
17 а)	16 - 7; 1; 5;	15 в)	17 а)		16 в)
18 в)	2; 4; 6; 3.	16 а)			
19 б)		17 б)			
20 а)					
21 б)					
22 в)					
23 а) б)					
24 а)					
25 б)					
26 в)					

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев, А.А. Конструирование электронной аппаратуры на основе поверхностного монтажа компонентов / А.А. Грачев, А.А. Мельник, Л.И. Панов. – М.: НТ Пресс, 2006. – 384 с.
2. Единая система технологической документации: справочное пособие / Е.А. Лобода, В.Г. Мартынов, Б.С. Мендриков и др. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 325 с.
3. Журнал «Технологии в электронной промышленности» <http://www.tech-e.ru/>
4. Медведев, А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 302 с.
5. Медведев, А.М. Сборка и монтаж электронных устройств / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2007. – 255 с.
6. Медведев, А.М. Технология производства печатных плат / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 358 с.
7. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат / Е.В. Пирогова. – М.: изд-во: Форум, Инфра. – М, 2005. – 560 с.
8. Савельев, М.В. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: учебное пособие для вузов / М.В. Савельев. – М.: Высшая школа, 2001. – 319 с.
9. 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. Чапдарова. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.
10. Ушаков, Н.Н. Технология производства ЭВМ: учебник для студентов вузов / Н.Н. Ушаков. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.
11. Юрков, Н.К. Технология производства электронных средств / Н.К. Юрков. – Санкт-Петербург: изд-во «Лань», 2014. – 480 с. <http://e.lanbook.com/view/book/41019//>

Учебное издание

*Воронина Оксана Александровна*  
*Лобанова Валентина Андреевна*

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие

Редактор Е.В. Агейчева  
Технический редактор Т.П. Прокудина

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Подписано к печати 31.05.2016 г. Формат 60×90 1/16.

Усл. печ. л. 21,2. Тираж 100 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.