



# Технология производства РС

# Предмет, цель и содержание курса.

- **Технология** (греч. *techne* – искусство, мастерство, умение + *logos* – понятие, учение) – совокупность знаний о способах и средствах производственных процессов. Задача **технологии** как науки – выявление физических, химических, механических и других закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономичных производственных процессов.
- **Предмет курса** – технология радиоэлектронной аппаратуры и оснащение технических процессов ее изготовления. Радиоэлектронная аппаратура – это обобщенное понятие, относящееся к электронной, электронно-вычислительной и электросвязной аппаратуре. Под оснащением понимают оборудование, оснастку, средства механизации, автоматизации и управления техническими процессами (ТП), в том числе контроля и испытания.



## ***Цель курса:***

- изучение технологических процессов производства РЭА и методов их проектирования;
- изучение основ управления отдельными процессами, качеством изготавливаемой аппаратуры и всей технологической системой в целом;
- изучение средств автоматизации, в том числе гибких автоматизированных производств;
- изучение методов моделирования, оптимизации, анализа и синтеза технологических систем;
- изучение системы технологической подготовки производства;
- приобретение навыков работать с технологической документацией и проектировать технологические процессы.

## ***Объект технологии производства – конструкция РЭА.***

- **Конструкция** – совокупность деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной электрической, пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической взаимосвязи, обеспечивающей выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях внешних воздействий и предусматривающей возможность его повторения в условиях производства.

- Разработка, изготовление и эксплуатация РЭС должны быть оптимальны на всех стадиях и, следовательно, рассматриваться как единое целое. Для этого вводят понятие технологической цепочки.
- **Технологическая цепочка** – совокупность последовательных этапов, начиная с логического, проектирования и разработки конструкции РЭС, выпуска технологической документации и заканчивая изготовлением, испытанием и ремонтом деталей, узлов и блоков, а также сборкой, регулировкой и испытанием готового прибора.

# *Теоретические основы организации и функционирования технологических систем.*

## Основные понятия и определения технологических систем

- Технология должна обеспечивать заданные свойства изделия. Качество отдельной детали или изделия – совокупность свойств, обуславливающих способность отвечать определенным требованиям в соответствии с ее назначением.
- Основными показателями качества изготовленных изделий являются точность сформированных физических свойств, выполненных размеров и формы элементов деталей, надежность.

# Структура и характеристика технологических систем

- Технологические системы относятся к сложным системам.
- Сложная система - объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

# ***Основные понятия и определения технологических систем***

## **Роль технолога в производстве РЭА**

- Основной задачей технолога является разработка и внедрение технологических процессов, а также выпуск необходимой для этого технологической документации.
- Эта задача решается на базе типовых технологических процессов (ТПП).



# Основные понятия и определения технологии РЭА

- Технология должна обеспечивать заданные свойства изделия.
- Качество отдельной детали или изделия - совокупность свойств, обуславливающих способность отвечать определенным требованиям в соответствии с ее назначением.
- Основными показателями качества изготовленных изделий являются точность сформированных физических свойств, выполненных размеров и формы элементов деталей, надежность.

# Математические модели технологических процессов и методы их построения

- Основное требование к моделям технологических процессов - точность соответствия модели реальному ТП.
- Точность модели обеспечивается тщательным изучением и описанием взаимодействия параметров ТП, параметров внешних воздействий, режимов работы и т.д.
- Модель воспроизводит описание процесса с большими или меньшими упрощениями, зависящими от поставленной цели.
- Для ТП или операции целесообразно использовать не наиболее точную (наиболее сложную) модель, а набор моделей различной степени сложности и точности.

## Построение технологического процесса в зависимости от типа производства

- Проектирование ТП, выбор средств оснащения, контроля, испытаний в большой степени зависят от типа производства.
- Тип производства характеризуется коэффициентом закрепления операций за одним рабочим местом.

## ***Основные понятия и определения технологии РЭА.***

- **Производственный процесс (ПП)** - совокупность всех действий людей, орудий труда и естественных процессов, в результате которых поступающие на предприятие материалы и полуфабрикаты (заготовки) превращаются в готовую продукцию.
- Производственный процесс включает в себя не только изготовление деталей и их сборку, но и транспортировку и хранение материалов и заготовок, изготовление технологической оснастки и др.

- **Заготовка** - полупродукт производства, из которого изменением формы, состояния поверхности и физических свойств исходного материала изготавливают деталь.
- **Технологический процесс (ТП)** - часть ПП, содержащая действия по непосредственному изменению и последующему контролю состояния любого предмета производства (детали, узла РЭА, отдельного вида РЭА).
- Различают ТП *изготовления деталей, сборки, настройки, регулировки, контроля изделия.*
- Основу ТП изготовления деталей составляют действия направленного формирования радиотехнических, химических, механических и других свойств исходного материала заготовки

- **Этап технологического процесса** - группа операций, выполняемых последовательно и имеющих признак общности. Группирование операций в этапы позволяет лаконично описать сложный ТП, состоящий из десятков и сотен операций.
- **Операция** - законченная часть технологического процесса, выполняется на одном рабочем месте, одним или группой рабочих (а также в условиях безлюдной технологии) непрерывно над определенной деталью (группой деталей) или сборочной единицей (несколькими сборочными единицами).
- **Переход** - часть операции, включающая обработку определенной части объема (поверхности) детали одним и тем же инструментом (группой инструментов) или активными технологическими средами. Замена вида инструментов или технологической среды означает начало выполнения очередного перехода.

- **Установ** - часть операции в несколько переходов, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки или собираемого изделия.
- **Позиция** - каждое из различных фиксированных положений, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой совместно с приспособлением, относительно неподвижной части оборудования для выполнения части операции.
- **Надежность** - свойство выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в допустимых пределах в течение требуемого промежутка времени.

# Технологическая подготовка производства РЭА, ее основные задачи, положения и правила организации

- Рациональная организация производственного процесса невозможна без проведения тщательной технологической подготовки производства (ТПП), которая должна обеспечивать полную технологическую готовность предприятия к производству изделий РЭА высшей категории качества в соответствии с заданными технико-экономическими показателями, устанавливающими высокий технический уровень и минимальные трудовые и материальные затраты.



- Технологическая подготовка производства - совокупность современных методов организации, управления и решения технологических задач на основе комплексной стандартизации, автоматизации, экономико-математических моделей и средств технологического оснащения.

## Средства технологического оснащения производства РЭА, правила выбора и проектирования

- В соответствии с ГОСТ 14.301-83 средства технологического оснащения включают: технологическое оборудование (в том числе контрольное и испытательное); технологическую оснастку (в том числе инструменты и средства контроля); средства механизации и автоматизации производственных процессов.

- **Безотказность** - свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.
- **Ремонтопригодность** - свойство изделия, характеризующее его приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения техобслуживания и ремонта.
- **Сохраняемость** - свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после заданного срока хранения и транспортирования.
- **Долговечность** - свойство изделия длительно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния, долговечность количественно оценивается техническим ресурсом или числом циклов работы.

## Состав типового технологического процесса изготовления РЭА включает в себя:

- входной контроль технологического процесса,
- технологическая тренировка комплектующих ЭРЭ,
- сборка,
- электрический монтаж,
- технический контроль монтажа и сборки,
- защита изделия от влияния внешних воздействий,
- технологическая тренировка изделия,
- регулировка,
- испытание изделия,
- выходной контроль.

# ***Математические модели ТП и методы их построения***

*Модель является представлением ТП в некоторой форме, отличной от реальной.*

## **Классификация моделей ТП**

Модели ТП можно классифицировать следующим образом:

- статические - динамические;
- детерминированные - стохастические (вероятностные).
- вещественные – символические.

- **Статическая** модель отражает функциональные зависимости между технико-экономическими показателями ТП и его параметрами, независящими от времени. Она представляет из себя, как правило, системы алгебраических уравнений.
- **Динамическая** модель является результатом формализации ТП, параметры которого - функции времени или производные от времени. Они описываются дифференциальными уравнениями.

- **Детерминированная** модель отражает существование однозначной функциональной зависимости между показателями качества ТП и значениями технологических параметров.
- **Стохастическая** - модель, у которой соответствующий оператор - случайная функция. Выходная переменная в этом случае всегда случайна.
- **Стохастическая модель** - результат формализованного описания связей между вероятностными законами распределения технико-экономических показателей ТП и его параметров. Такую модель можно описать с помощью уравнений регрессии, автокорреляционных функций, статистических массивов и т.д.

- Детерминированные и стохастические модели находятся в тесной взаимосвязи, т.к. первые требуют экспериментальной проверки и статистической обработки данных, а вторые строятся с учетом теоретических предпосылок, отражающих физико-химические особенности конкретного ТП.
- Эта взаимосвязь ярко проявляется при использовании методов планирования эксперимента при поиске оптимальных режимов ТП.
- **Вещественная** модель представляется в виде прибора, макета, устройства, а **символическая** - в виде графиков, логических условий, операторов.


- Частный случай - математическая модель - совокупность соотношений (формул, уравнений, операторов...), определяющих характеристики функционирования ТП в зависимости от его параметров, входных переменных, времени и т. д.

- *Структура моделей*

Каждая модель представляет собой некоторую комбинацию компонентов, переменных, параметров, функциональных зависимостей, ограничений и целевых функций.



- **Компоненты** - составляющие, которые при соответствующем объединении образуют систему ТП.
- **Переменные** - величины, которые могут принимать значения, определяемые видом данной функции. В модели ТП различают *входные переменные*, являющиеся результатом внешних воздействий; *переменные состояния*, возникающие в результате внутренних воздействий и характеризующие состояние ТП; *выходные переменные*, определяющие качество изделия.
- **Параметры** - величины, которые выбирают произвольно, после чего они являются постоянными величинами, не подлежащими изменению.

- 
- **Функциональные зависимости** - описывают поведение переменных и параметров одного компонента или выражают связи между компонентами системы.
  - **Детерминированные зависимости** - устанавливают соотношения между определенными переменными и параметрами в тех случаях, когда выходные переменные процесса однозначно определяются заданной информацией на его входе.
  - **Стохастические зависимости** - такие соотношения, когда при заданной входной информации на выходе получают неопределенный результат.

- **Ограничения** - устанавливаемые пределы изменения переменных или ограничивающие условия проведения ТП, Искусственные ограничения большинство требований к системам. Естественные ограничения - обусловлены самой сущностью ТП.
- **Целевая функция** (функция критерия или критерий оптимизации) - точное отображение целей или задач. Можно указать два вида критериев оптимизации.
  1. Качественные или количественные характеристики ТП, выработанные практикой.
  2. Критерии оптимальности, положенные в основу аналитических, численных и машинных методов оптимизации.

- К первому виду относятся экономические, технико-экономические, технико-технологические показатели функционирования ТП (точность, надежность, стабильность и устойчивость).
- Для многих ТП общим фактором, с которым связаны различные технико-экономические показатели, является качество выпускаемой продукции.
- В общем случае критерии оптимизации при анализе ТП следует рассматривать как случайную величину.
- Нахождение их численных значений сводится к определению оценок математических ожиданий, корреляционных и дисперсионных функций отдельных показателей, выходных и входных переменных.

## ***Основные требования к моделям ТП***

- Основное требование - точность соответствия модели реальному ТП.
- Точность модели обеспечивается тщательным изучением и описанием взаимодействия параметров ТП, параметров внешних воздействий, режимов работы и т.д.
- Модель воспроизводит описание процесса с большими или меньшими упрощениями, зависящими от поставленной цели.
- Для ТП или операции целесообразно использовать не наиболее точную (наиболее сложную) модель, а набор моделей различной степени сложности и точности.
- Важным требованием является чувствительность модели.
- Высокая чувствительность существенно облегчает математический анализ конкретного ТП.

■ Требование непрерывности модели - ее справедливость во всем диапазоне изменения технологических режимов.

Модель также должна быть:

- удобной в управлении и обращении;
- адаптивной (позволяющей легко переходить к другим модификациям или обновлять имеющиеся, допускающей усложнения);
  - нетривиальной (описывающей физическую сущность явлений, невидимых при непосредственном наблюдении);
  - мощной (позволяющей решать различные технологические задачи);
  - изящной (имеющей достаточно простую структуру и алгоритм расчета на ЭВМ);
  - релевантной (позволяющей решать сложные задачи);
  - результативной (эффект от внедрения результатов превышает расходы на ее создание и использование).

# *Построение моделей техпроцессов*


При построении модели необходимо определить:

- назначение модели,
- компоненты, которые должны быть включены в состав модели,
- параметры и переменные, относящиеся к этим компонентам,
- функциональные соотношения между компонентами, параметрами и переменными.

## Создание модели включают в себя следующие основные этапы.

1. Оценка - определение, насколько хорошо ТП предполагаемой структуры соответствует выбранным конкретным критериям.
2. Сравнение - сопоставление конкурирующих ТП, рассчитанных на выполнение определенной функции, а также некоторых технологических режимов.
3. Прогноз - оценка качества ТП при некотором предполагаемом сочетании факторов.
4. Анализ чувствительности - выявление из большого числа действующих факторов тех, которые в наибольшей степени влияют на качество ТП.



- 
5. Оптимизация - выявление такого сочетания действующих факторов, при котором обеспечивается наилучшее качество ТП.
  6. Выявление функциональных соотношений - уточнение природы зависимости двух или нескольких действующих факторов и качества ТП.
- Построение модели следует начинать с общего качественного анализа, постепенной детализации и уточнения по мере расширения наших знаний об исследуемом процессе.
  - На этапе предварительного исследования получают информацию о входных и выходных переменных изучаемого ТП, различных его компонентах, соотношениях между ними как количественного, так и качественного характера.

## Известны следующие методы построения математической модели:

- аналитические, основанные на применении математического аппарата, а также законов физики и химии;
- статистические, основанные на математической обработке экспериментальных данных;
- комбинированный, объединяющий рациональное планирование эксперимента, статистическую обработку экспериментальных данных и основные физико-химические закономерности;
- автоматический, позволяющий строить модель с помощью ЭВМ, которая обрабатывает информацию от блоков ТП через систему датчиков и преобразователей.

Аналитические методы позволяют получить математическую модель ТП в широком диапазоне изменения его факторов. При этом построение модели состоит из следующих этапов:

1. Теоретический анализ явлений, происходящих в ТП;
2. Выбор явлений, наиболее существенных для ТП, и факторов, характеризующих каждое явление, а также описание их статического и динамического состояния;
3. Построение модели ТП в целом на основании описаний выделенных явлений.

Статистические методы позволяют установить зависимости между входными и выходными переменными исследуемого процесса. К ним относятся:

1. Методы получения статических моделей на основе пассивного эксперимента (регрессионный, корреляционный анализ и другие), активного эксперимента (например, факторный эксперимент);
2. Методы получения математических моделей, мало зависящих от времени;
3. Методы получения динамических моделей (например, корреляционные методы, динамический регрессионный анализ).

Наиболее эффективным методом считается комбинированный метод.

## ***Построение ТП в зависимости от типа производства***

Проектирование ТП, выбор средств оснащения, контроля, испытаний в большой степени зависят от типа производства.

Тип производства характеризуется коэффициентом закрепления операций за одним рабочим местом

$$***K = O/P,***$$

*где O - количество различных операций; P - количество рабочих мест для выполнения различных операций.*

Значение  $K$  (коэффициента серийности) принимается для планового периода (1 месяц) следующих типов производств:


- массового:  $K = 1$ ;
- крупносерийного:  $1 < K < 10$ ;
- среднесерийного:  $10 < K < 20$ ;
- мелкосерийного:  $20 < K < 40$ ;
- единичного:  $K$  не регламентируется специализацией рабочих мест или загруженностью рабочих мест одной и той же работой.

Массовое производство характеризуется узкой специализацией рабочих мест, за каждым из которых закреплено выполнение только одной операции. При массовом производстве изготовление одних и тех же изделий ведется непрерывно в большом количестве и в течение значительного промежутка времени. Его особенности:

- размещение рабочих мест непосредственно одно за другим по ходу ТП;
- непрерывная механизированная передача объекта обработки (сборки) без межоперационного складирования;
- синхронизация (согласование по длительности) операций;
- широкое применение специализированных станков, приспособлений, технологической оснастки;
- автоматизация оборудования;
- использование низкоквалифицированной рабочей силы;
- минимальная себестоимость и срок изготовления.

- Серийное производство характеризуется широкой специализацией рабочих мест и изготовлением различных изделий партиями, регулярно повторяющимися через определенные промежутки времени. За каждым рабочим местом закреплено несколько операций, выполняемых периодически.
- При крупносерийном производстве изделия изготавливаются большими партиями и без переналадки технологического оборудования в течение нескольких десятков рабочих смен. Период времени между переналадками оборудования при среднесерийном производстве составляет несколько рабочих смен, а при мелкосерийном - соизмерим со временем одной рабочей смены.






Единичное производство характеризуется универсальностью рабочих мест, за которыми нет закрепления операций. Изделия производятся в небольших количествах, и их изготовление может повторяться через неопределенное время. К особенностям единичного производства можно отнести:

- применение универсального оборудования и приспособлений, нормализованного рабочего инструмента и универсального измерительного инструмента;
- расположение оборудования группами по типам станков;
- высокую квалификацию рабочих;
- малую степень подробности разработки ТП;
- высокую степень концентрации ТП.

# ***Конструктивно-технологические особенности современной РЭА***

- Основные технологические задачи производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) могут быть сформулированы только на основе ее конструктивно-технологического анализа.
- Радиоэлектронная аппаратура представляет собой совокупность элементов, объединенных в сборочные единицы и устройства, предназначенные для преобразования и обработки электромагнитных сигналов в диапазоне частот колебаний от инфранизких до сверхвысоких (СВЧ).
- Элементы, рассчитанные на совместную работу в РЭА, различают по функциональным, физическим, конструктивно-технологическим признакам и типам связей.
- По конструктивно-технологическому признаку элементы РЭА делят на дискретные и интегральные, которые объединяют в сборочные единицы, выполняющие элементарные действия (усилитель, генератор, дешифратор, счетчик и т. д.).




- В зависимости от диапазона частот меняются и пассивные элементы, используемые в РЭА. В диапазоне высоких частот (ВЧ) используют индуктивности и емкости с сосредоточенными параметрами, изготавливаемые по любой технологии, а в диапазоне СВЧ применяют элементы с распределенными параметрами, например двухпроводные, полосковые линии и коаксиальные резонаторы. В курсе “Техническая электродинамика и проектирование устройств СВЧ” эти вопросы рассматриваются подробно.

- Устройства, составляющие РЭА (устройства управления, сопряжения, преобразователи аналог-код и др.), имеют определенное функциональное назначение.

- Радиопередающие устройства представляют собой автономную часть РЭА. Конструктивно-технологические требования, предъявляемые к ним, включают требования по массе, габаритным размерам, форме и т. д. Существенным здесь также является обеспечение теплоотвода, герметизации, влагозащиты, амортизации, управления, ремонта и защиты персонала от высоких напряжений и рентгеновского излучения. Теория, методы и способы реализации защиты аппаратуры от внешних климатических воздействий рассматриваются в курсе “Защита РЭА от дестабилизирующих воздействий”.

- Важным фактором, определяющим конструктивно-технологические особенности любой РЭА, является ее рабочий диапазон частот.
- В зависимости от диапазона частот устройства диктуются требования к его конструктивному оформлению и технологии изготовления.
- С ростом частот повышаются требуемые точность изготовления, качество обработки деталей, чистота применяемых материалов и т. д.
- В качестве примера можно выделить сверхбыстродействующие цифровые устройства, и, в первую очередь, устройства СВЧ.
- В этих случаях длина волны электромагнитного сигнала соизмерима или много меньше размеров изучаемого объекта.



Так, в СВЧ-диапазоне:

- теряют физический смысл обычные элементы с сосредоточенными параметрами, а все СВЧ-устройства являются устройствами с распределенными параметрами;
- конструкции линий передач строго определяются физическими процессами передачи СВЧ-энергии и имеют свои особенности для каждого поддиапазона частот;
- электрические токи протекают в очень тонком наружном слое металлических проводников, это явление поверхностного эффекта накладывает жесткие ограничения на чистоту обработки токонесущих поверхностей, на выбор защитных покрытий, появляется возможность применения технологии изготовления токонесущих проводников путем металлизации поверхности диэлектрических или керамических деталей;
- большой инерции электронов и длительной рекомбинации свободных носителей в СВЧ-диапазоне неприменимы обычные электровакуумные и полупроводниковые приборы;
- параметры и свойства материалов: диэлектриков, магнитодиэлектриков и проводников в СВЧ-диапазоне, существенно отличаются от их номинальных значений.

- Объективной тенденцией совершенствования конструкций РЭА является постоянный рост ее сложности, что объясняется расширением круга решаемых задач при одновременном повышении требований к эффективности ее работы.
- Конструктивно-технологические особенности РЭА включают функционально-узловой принцип конструирования, технологичность, минимальные габаритно-массовые показатели, ремонтпригодность, защиту от внешних воздействий.
- В понятие надежность функционирования входят: вероятность безотказной работы, среднее время наработки на отказ, среднее время восстановления работоспособности, долговечность и т. д.
- Специфические условия обеспечения высокой надежности РЭА и заданных характеристик в условиях эксплуатации обуславливают высокие требования к качеству используемых материалов, оборудования, а также к ТП изготовления РЭА.

- Кроме того, производство РЭА должно быть экономически эффективно. При проектировании ТП следует предусматривать сокращение длительности и трудоемкости этапа подготовки производства, капитальных затрат, численности сложных и трудоемких операций, использование минимального числа единиц оборудования, максимального числа стандартных, унифицированных и типовых сборочных единиц, функциональных узлов РЭА, а также предусматривать изготовление минимального числа сборочных единиц.
- **Сущность функционально-узлового принципа конструирования РЭА** заключается в объединении функционально законченных схем в сборочные единицы и их модульной компоновке. Базовые конструкции аппаратуры имеют несколько уровней модульности, предусматривающих объединение простых модулей в более сложные.

- **Микроминиатюризация** - это микромодульная компоновка элементов с применением интегральной и функциональной микроэлектроники. При микромодульной компоновке элементов осуществляют микроминиатюризацию дискретных ЭРЭ и сборку их в виде плоских или пространственных модулей. Такую компоновку применяют в специальной аппаратуре для объемного размещения ИС с планарными выводами, что повышает надежность как самих элементов, так и их межсоединений и обеспечивает условия механизированного производства и сборки.
- Трудоемкость производства сборочных единиц РЭА может быть представлена в таком соотношении:
  - механическая обработка - 8... 15,
  - сборка - 15...20,
  - электрический монтаж - 40.60,
  - наладка-20...25%.



Следовательно, основными конструктивно-технологическими задачами производства РЭА являются:

- разработка ИС на уровне ячеек и сборочных единиц РЭА с высокой степенью интеграции и совершенствование технологии их изготовления;
- повышение плотности компоновки навесных элементов на ПП и плотность печатного монтажа;
- совершенствование методов электрического соединения модулей первого, второго и третьего уровней;
- механизация и автоматизация сборки и электрического монтажа модулей второго, третьего и четвертого уровней;
- развитие автоматизированных и автоматических методов, а также средств наладки и регулировки аппаратуры сложных РТС;
- автоматизация операций контроля функциональных параметров;
- создание гибких комплексно-автоматизированных производств, функционирующих совместно с системами автоматизированного проектирования.

- Микроминиатюризация аппаратуры, повышение ее быстродействия и точности функциональных параметров требуют особого внимания к неразрушающим методам контроля и управлению качеством продукции. Производство печатных плат (ПП) основано на химическом (субтрактивном), аддитивном, электрохимическом (полуаддитивном) и комбинированном методах изготовления.
- Они различаются способами получения рисунка печатного монтажа и токопроводящего слоя.
- Промышленное применение нашли сеткографический способ офсетной печати, а также способ фотоформирования рисунка как наиболее перспективный в связи с повышением плотности печатного монтажа и уменьшением ширины проводников и расстояний между ними.
- Проводящий слой получают травлением, химическим или химико-гальваническим наращиванием.

Для указанных методов характерны следующие типовые технологические операции:

- механическая обработка,
- нанесение рисунка,
- травление,
- химическое или химико-гальваническое осаждение меди,
- удаление защитной маски.

Эти операции применяют в той или иной последовательности для изготовления одно-, двух- и многослойных ПП.

Производство сборочных единиц и модулей РЭА основано на сборке и электрическом монтаже, причем монтаж является более трудоемким. Электромонтажные работы по получению контактных соединений выполняют различными методами:

- пайкой,
- сваркой,
- склеиванием,
- накруткой,
- механическим контактированием, а также электрическим монтажом (печатным, жгутовым, проводным на платах, плоскими кабелями).

- **Производство ферритовых сердечников** основано на применении технологии изготовления деталей различной конфигурации из металлокерамических материалов. Особенность ее заключается в необходимости достижения и обеспечения стабильности магнитных параметров сердечников путем регулирования основных факторов ТП.
- Изготовление электромеханических узлов регистрирующей аппаратуры, печатающих устройств, накопителей на подвижных носителях информации осуществляют с помощью традиционных методов механической обработки и сборки.
- При разработке ТП необходимо учитывать принцип совмещения технических, экономических и организационных задач, решаемых в данных производственных условиях.
- В соответствии с ГОСТ 14.004-83 в зависимости от номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий современное производство подразделяется на различные типы:
  - единичное,
  - серийное,
  - массовое.

■ **Единичное производство** характеризуется широтой номенклатуры и малым объемом выпуска изделий. При этом под объемом, выпуска подразумевается количество изделий определенных наименований, типоразмера и исполнения, изготавливаемых предприятием или его подразделениями в течение планируемого интервала времени.

■ Предприятия единичного производства характеризуются следующими факторами:

- количество выпускаемых изделий и размеры операционных партий заготовок сборочных единиц, поступающих на рабочее место для выполнения технологической операции, исчисляются штуками и десятками штук;
- на рабочих местах выполняются разнообразные технологические операции, повторяющиеся нерегулярно или неповторяющиеся совсем;
- используется универсальное точное оборудование;
- специальные инструменты и приспособления, как правило, не применяют;
- взаимозаменяемость деталей и узлов во многих случаях отсутствует, широко распространена пригонка по месту;
- квалификация рабочих очень высокая, так как от нее в значительной мере зависит качество выпускаемой продукции;
- низкий уровень механизации;
- высокая стоимость аппаратуры.

- **Массовое производство** характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени.
- Коэффициент закрепления операции (ГОСТ 3.1108-74) для массового производства равен 1, т. е. на каждом рабочем месте закрепляется выполнение одной постоянно повторяющейся операции.
- Требуемая точность достигается методами автоматического получения размеров на настроенных станках при обеспечении взаимозаменяемости обрабатываемых заготовок и собираемых узлов.
- Только в отдельных случаях применяется селективная сборка, обеспечивающая групповую взаимозаменяемость.
- Средняя квалификация рабочих в современном массовом производстве ниже, чем в единичном, так как на настроенных станках и автоматическом оборудовании могут работать рабочие-операторы сравнительно низкой квалификации.


- **Серийное производство** характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в партии или серии и значения коэффициента закрепления операций различают мелко-, средне- и крупносерийное производство.
- Объем выпуска предприятий серийного типа колеблется от десятков и сотен до тысяч регулярно повторяющихся изделий. При этом в производстве используется универсальное и специализированное оборудование. Оборудование расставляется по технологическим группам с учетом направления основных грузопотоков цеха по предметно-замкнутым участкам. Технологическая оснастка в основном универсальная, однако, во многих случаях (особенно в крупносерийном производстве) используется специальная высокопроизводительная оснастка, необходимость в которой должна быть обоснована технико-экономическим расчетом.
- Требуемая точность достигается как методами автоматического получения размеров, так и методами пробных ходов и промеров с частичным применением разметки. Средняя квалификация рабочих выше, чем в массовом производстве, но ниже, чем в единичном, так как наряду с рабочими высокой квалификации, работающими на сложном универсальном оборудовании, и наладчиками используются рабочие-операторы, работающие на настроенных станках. В зависимости от объема выпуска и особенности изделий обеспечивается полная взаимозаменяемость, неполная, групповая взаимозаменяемость сборочных единиц, однако в ряде случаев на сборке применяется компенсация размеров и пригонка по месту.

# *Технологическая подготовка производства РЭА, ее основные задачи,*

## *положения и правила организации*

- Рациональная организация производственного процесса невозможна без проведения тщательной технологической подготовки производства (ТПП), которая должна обеспечивать полную технологическую готовность предприятия к производству изделий РЭА высшей категории качества в соответствии с заданными технико-экономическими показателями, устанавливающими высокий технический уровень и минимальные трудовые и материальные затраты.



- 
- **Технологическая подготовка производства - совокупность современных методов организации, управления и решения технологических задач на основе комплексной стандартизации, автоматизации, экономико-математических моделей и средств технологического оснащения.**
  
  - При этом решают следующие задачи ТПП:
    1. Отработка конструкции изделия на технологичность.
    2. Прогнозирование развития технологии.
    3. Стандартизация технологических процессов.
    4. Группирование технологических процессов.
    5. Технологическое оснащение.
    6. Оценка уровня технологии.
    7. Организация и управление процессом ТПП.
    8. Разработка технологических процессов.
    9. Проектирование средств специального технологического оснащения.
    10. Разработка норм.

# ***Средства технологического оснащения производства РЭА, правила выбора и проектирования***

- **Технологическое оборудование** - это орудия производства, в которых для выполнения определенной части ТП размещаются материалы (заготовки), средства воздействия на них и при необходимости источники энергии.
- **Технологическая оснастка** - это орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части ТП.
- **Средства механизации** - это орудия производства в которых ручной труд человека частично или полностью заменен машинным с сохранением участия человека в управлении машинами.
- **Средства автоматизации** - это орудия производства, в которых функции управления переданы машинам и приборам.

- Литейный цех, цех изготовления деталей из пластмасс имеют высокопроизводительные машины для литья и прессования, пресс-автоматы. Это оборудование позволяет получать заготовки с минимальными припусками на механическую обработку.
  
- Механизация и автоматизация в механических цехах развивается по следующим направлениям:
  1. максимальное использование токарных автоматов, холодновысадочных автоматов и токарно-револьверных станков, доведение их применения до 50 % от общей трудоемкости механической обработки цеха;
  2. внедрение станков с программным управлением и ЧПУ и создание на их базе автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) с использованием промышленных роботов для механизации вспомогательных операций;
  3. оснащение универсальных станков механизмами, работающими в качестве зажимных быстродействующих устройств, автоматических загрузочных, контрольно-измерительных и прочих устройств;
  4. организация для определенных групп деталей небольших поточных линий (микротоков) с замкнутым циклом обработки;
  5. механизация операций вспомогательного производства: транспортировки деталей, уборки стружки, складирования и выдачи полуфабрикатов, инструмента, технической документации, диспетчерского контроля работы оборудования.

- Гальванические цехи в зависимости от экономически целесообразного уровня механизации оснащаются различными видами оборудования:
  - 1) автоматами (автоматическими линиями), обеспечивающими без участия человека передачу деталей (подвесок, барабанов) с одной позиции обработки на другую и выдержку их в ваннах в соответствии с заданной программой обработки;
  - 2) автоматизированными системами управления ТП гальванопокрытий.
- Цехи по производству ПП оснащены универсальным оборудованием, разработанным специально для выпуска такого вида продукции.
- Это механизированные и автоматизированные линии химической, электрохимической обработки, установки для нанесения фоторезистов и сеткографии, станки с ЧПУ для механической обработки, автоматизированные стенды контроля плат.
- Оборудование с ЧПУ применяют для изготовления фотошаблонов и трафаретов, сверления монтажных отверстий и фрезерования ПП.

# **Технологические системы и особенности их организации**

- С позиций системного подхода ТП - это сложная динамическая система, в которой в единый комплекс объединены оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент или среды, находящиеся в постоянном движении и изменении, объекты производства (заготовки, полуфабрикаты, сборочные единицы, готовые изделия) и, наконец, люди, осуществляющие процесс и управляющие им.
- Указанную сложную динамическую систему называют технологической системой (ТС).
- Как и любая другая сложная (большая) система, ТС характеризуется следующими признаками:
  - возможностью разбиения системы на множество подсистем, цели функционирования которых подчинены общей цели функционирования всей системы;
  - наличием разветвленной информационной сети сложных информационных связей между элементами и подсистемами;
  - наличием взаимодействия системы с внешней средой;функционированием в условиях воздействия случайных факторов;
  - наличием иерархической структуры.

- Подсистемой называется часть системы, выделяемая по определенному признаку, отвечающему конкретным целям и задачам функционирования системы, например подсистема управления качеством продукции. В рамках этих задач подсистема может рассматриваться как самостоятельная система.
- Иерархическая структура ТС означает возможность разбиения системы на подсистемы различных уровней, когда подсистемы низших уровней входят составными частями в подсистемы высших уровней. Обычно сложная система входит в качестве составной части в еще более сложную систему, которая по отношению к рассматриваемой системе является метасистемой (рис. 1.1).

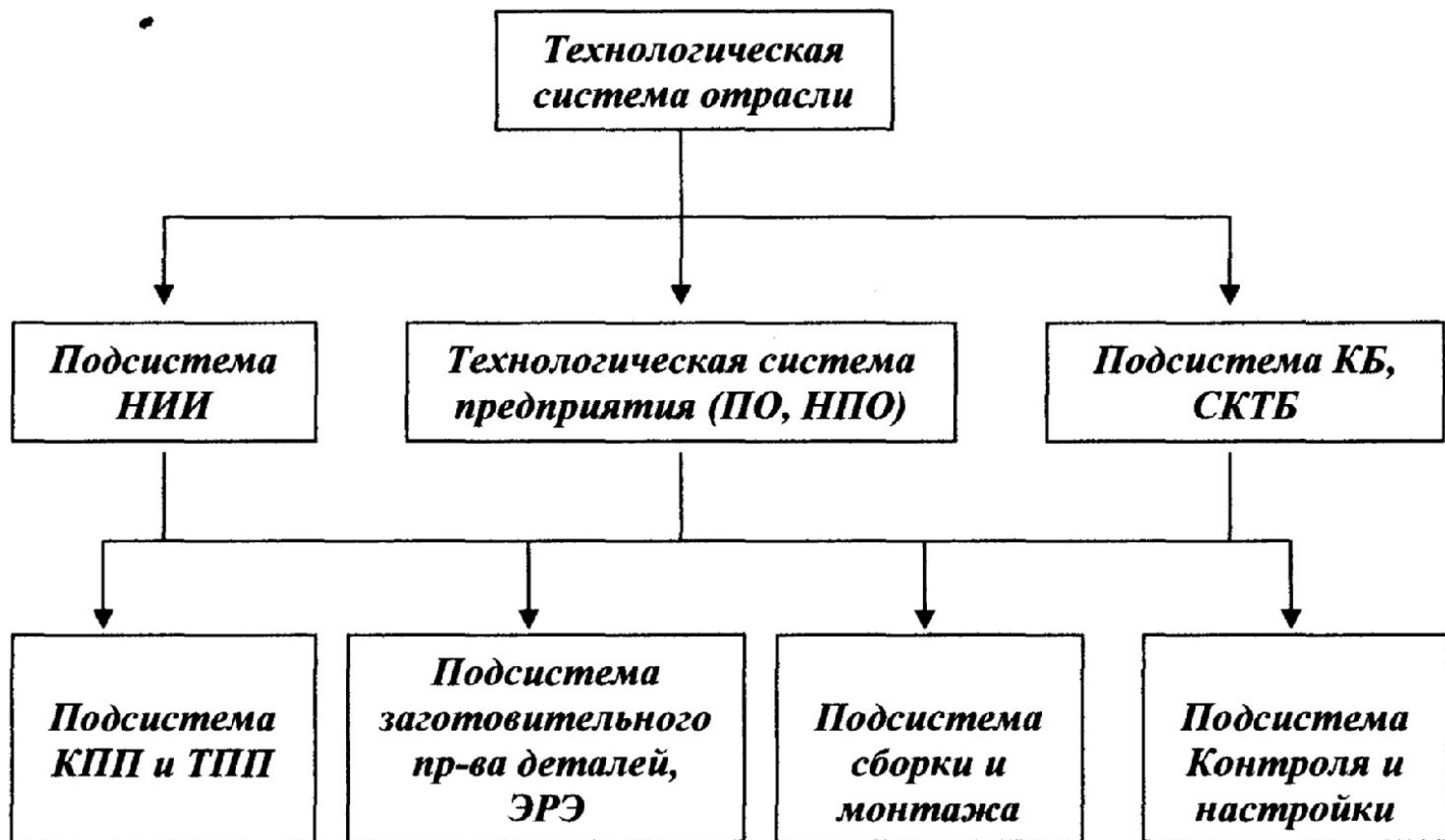



Рис.1.1. Организационная структура технологической системы



- Так, ТС предприятий (объединений), являющиеся сами сложными системами, входят составными частями в ТС отрасли народного хозяйства, которая по отношению к предприятию (объединению) является метасистемой.

- Показателями качества функционирования ТС являются:

- эффективность (способность к выполнению поставленной перед ней целью);
- надежность (способность к функционированию при отказе отдельных ее элементов);
- помехозащищенность (способность слабо реагировать на нежелательные внешние случайные воздействия);
- устойчивость (способность сохранять требуемые свойства в условиях воздействия различных возмущений).

- Технологические системы обладают свойствами, которые облегчают задачу обеспечения установленных показателей качества ее функционирования.



- Специализация производства приводит к тому, что части ТС обособляются в виде отдельных участков, цехов, предприятий, отраслей.
- При этом структура ТС усложняется, так как возникают дополнительные операции, например, связанные с транспортированием полуфабрикатов и продукции.
- Однако это усложнение, как и дополнительные затраты на управление, должны компенсироваться повышением производительности труда, связанным со специализацией производства.
  
- В ТС предприятия обычно выделяют следующие функциональные подсистемы:
  - технико-экономического планирования;
  - технической подготовки производства;
  - нормативного хозяйства;
  - материально-технического обеспечения;
  - оперативного планирования и управления основным производством;
  - вспомогательного производства;
  - сбыта готовой продукции;
  - кадров;
  - финансов;
  - бухгалтерского учета и статистической отчетности .

## Влияние внешних и внутренних факторов на функциональные характеристики технологической системы, пути его снижения


- Те изменения, которые происходят с течением времени в ТС приводят к ухудшению ее функциональных характеристик и даже к потере работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается

## Управление технологической системой, его алгоритмическое и программное обеспечение

- Управление ТС - это комплекс мероприятий, обеспечивающих повышение эффективности производства в соответствии с выбранным критерием (критериями) оптимальности при заданных технологических, экономических и других производственных ограничениях.
- Комплекс мероприятий состоит из сбора, обработки и анализа информации о ТП и осуществления на основе этой информации контроля и регулирования ТС с помощью средств автоматизации и методов организации и управления производством с использованием вычислительной техники

# **Общая характеристика, структура и показатели эффективности технологической системы**

- Анализ работоспособности сложной системы связан с изучением ее структуры и тех взаимосвязей, которые определяют ее надежное функционирование. Важную роль при этом играет выделение элементов, составляющих данную ТС.
- Под элементом будем понимать составную часть сложной системы, которая может характеризоваться самостоятельными входными и выходными параметрами.
- Элемент обладает следующими особенностями:
  - он выделяется в зависимости от поставленной задачи, может быть, достаточно сложным и состоять из отдельных деталей и сборочных единиц;
  - при исследовании надежности системы элемент не расчленяется на составные части, и показатели безотказности и долговечности относятся к элементу в целом;
  - возможно восстановление работоспособности элемента независимо от -других частей и элементов системы.



■ Условность расчленения сложной системы на элементы может быть продемонстрирована на примере автоматической линии подготовки ЭРЭ к монтажу.

■ С позиции надежности могут быть следующие структуры сложных систем:

1. Расчлененные, у которых надежность отдельных элементов может быть заранее определена, так как отказ элемента можно рассматривать как независимое событие;

2. Связанные, у которых отказ элементов является зависимым событием, связанным с изменением выходных параметров всей системы;

3. Комбинированные, состоящие из подсистем со связанной структурой и с независимым формированием показателей надежности для каждой из подсистем.


- Эффективность технологической системы - способность системы функционировать во всем диапазоне возможных условий и режимов и установленных предельных значений изменения ее выходных параметров.
- Эффективность функционирования ТС оценивают по четырем группам показателей эффективности:
  - технологическим (описывающим, например, количество выпущенной продукции за единицу календарного времени);
  - организационным (выражающим трудовые затраты персонала на производство продукции);
  - экономическим (отражают экономические результаты функционирования системы);
  - комплексным (одновременно оценивающим различные стороны функционирования, например технологическую и экономическую).
- Если ТП рассматривать как процесс функционирования ТС, то все компоненты ТП-метод обработки, применяемое оборудование, последовательность операций, режимы обработки, методы контроля - определяют ее выходные параметры и в первую очередь показатели качества изделия.

- Понятие стабильности характеризует ТП только с позиции сохранения в заданных пределах показателей качества продукции, не затрагивая вопросов об изменении с течением времени производительности. Кроме того, стабильным будет и такой ТП, при котором изготавливается продукция с отклонениями от требований технической документации. Другими словами, ТП может быть стабильным, но иметь низкую надежность. Поэтому надежность ТС систем должна оцениваться только по тем параметрам и показателям качества изделия, уровень которых зависит от технологии изготовления.
- Отказы ТС могут быть постепенными и внезапными. Постепенные отказы связаны с износом технологического оборудования, инструмента, оснастки и средств контроля, с температурными деформациями, химическими воздействиями и т.п. Внезапные отказы могут быть вызваны ошибками рабочих-операторов, наладчиков или быть следствием дефектов в заготовках и комплектующих изделиях при недостаточном входном контроле и т. п. Эти отказы сводятся к минимуму при организации эффективной системы управления качеством.

# ***Влияние внешних и внутренних факторов на функциональные характеристики технологической системы, пути его снижения***

Те изменения, которые происходят с течением времени в ТС приводят к ухудшению ее функциональных характеристик и даже к потере работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями, которым она подвергается. При этом имеются три основных источника воздействий:

- действие энергии окружающей среды, включая человека, выполняющего функции оператора или ремонтника;
- внутренние источники энергии, связанные как с ТП системы, так и с работой отдельных ее элементов (подсистем);
- потенциальная энергия, которая накапливается в материалах и деталях сборочных единиц технологических агрегатов в процессе их изготовления (внутренние напряжения в отливках, монтажные напряжения и т. п.).
- в процессе функционирования ТС наблюдаются следующие основные виды энергии, влияющие на ее функциональные характеристики.




- Механическая энергия, которая не только передается, но всем узлам технологического агрегата системы, но и воздействует на нее в виде статических и динамических нагрузок от взаимодействия с внешней средой. Силы, возникающие в узлах технологического агрегата, определяются характером ТП, инерцией перемещающихся частей, трением в кинематических парах, деформацией деталей при перераспределении в них внутренних напряжений, Эти силы являются случайными функциями времени. Природа их возникновения, как правило, связана со сложными физическими явлениями.

- Механическая энергия, действующая в звеньях станка-автомата для установки ИС с планарными выводами на ПП, приводит к возникновению процесса износа его звеньев. Это вызывает искажение начальной формы сопряжений (т. е. их повреждение), что приводит к потере станком-автоматом точности установки ИС в позицию, которая является его выходным параметром. При достижении определенной погрешности установки возникает отказ.

- Тепловая энергия действует на ТС при колебаниях температуры окружающей среды во время осуществления ТП. Например, снижение температуры окружающей среды изменяет температуру волны припоя, что ведет к ухудшению качества пайки ячеек РЭА с навесными элементами.



- Химическая энергия также оказывает влияние на функционирование ТС, так как химические воздействия вызывают процессы, приводящие к разрушению отдельных элементов и узлов технологических агрегатов системы. Так, химическая энергия вызывает процессы коррозии в резервуарах и ваннах в цехах производства ПП.
- Ядерная (атомная) энергия, выделяющаяся в процессе превращения атомных ядер, может воздействовать на материалы, изменяя их свойства.
- Электромагнитная энергия в виде электромагнитных колебаний пронизывает все пространства вокруг ТС и может оказать влияние на работу РЭА подсистемы управления. Вопросы влияния электромагнитной обстановки рассматриваются как составная часть проблемы электромагнитной совместимости.
- Биологические факторы также могут влиять на функционирование ТС. Например, в тропических странах имеются микроорганизмы, которые разрушают не только некоторые виды пластмасс, но даже могут воздействовать на металл.
- Таким образом, все виды энергии действуют на ТС и ее элементы, вызывают в ней целый ряд нежелательных процессов, создают условия для ухудшения ее функциональных характеристик.



Многоуровневая схема целей и задач ТС в производстве РЭА содержит следующие компоненты (**основная цель - максимизация технико-экономической эффективности технологической системы**):

- Максимизация показателей качества изделий
  - Точность
  - Временная и температурная стабильность
  - Надежность
  - Удельные характеристики
- Минимизация себестоимости изделия
  - Максимизация выпуска годных изделий
    - Максимизация производительности ТС
    - Максимизация процента выхода годных изделий
    - Уменьшение времени простоя оборудования
  - Минимизация производственных расходов
  - Оптимальная организация процесса производства

В свою очередь максимизация процента выхода годных изделий содержит следующие задачи:

- Задачи оптимального управления технологическим процессом
  - Оперативная перестройка режимов при изменении заданий на характеристики изделий
  - Минимизация отклонений среднего значения характеристик изделий от заданного значения
  - Минимизация разброса текущих значений характеристик изделий
  - Оптимизация управления процессом по быстродействию
  - Оптимизация управления процессом по производственным расходам
- Задачи контроля
  - Входной контроль материалов и комплектующих
  - Входной контроль готовых изделий
  - Работы оборудования
  - Качества выполнения отдельных операций
  - Состояния технологической системы по информации о характеристиках изделий

Анализ этих целей и задач позволяет определить основные пути повышения показателей эффективности и функциональных характеристик этих систем.

1. Повышение сопротивляемости ТС внешним воздействиям.
2. Изоляция ТС от вредных воздействий.
3. Создание самонастраивающихся и саморегулируемых ТС.
4. Оптимизация системы ремонта и технического обслуживания ТС. Поддержание и восстановление работоспособности ТС является сложным процессом, зависящим от многих факторов:
  - конструкции технологических агрегатов системы,
  - методов ее эксплуатации,
  - организации системы ремонта и технического обслуживания,
  - экономических факторов.

# **Физико-химические основы изготовления деталей и узлов РЭА**

## **Особенности построения и исследования пространственно-временной структуры сборки и монтажа аппаратуры**

■ Технология должна обеспечивать заданные свойства изделия. Качество отдельной детали или изделия - совокупность свойств, обуславливающих способность отвечать определенным требованиям в соответствии с ее назначением. Основными показателями качества изготовленных изделий являются точность сформированных физических свойств, выполненных размеров и формы элементов деталей, надежность

## **Физико-технологические основы электрических соединений**

■ Технологические системы относятся к сложным системам. Под сложной, системой будем понимать объект, предназначенный для выполнения заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из которых также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы. Большей сложностью, как правило, обладают автоматизированные ТС. Чем сложнее система, тем более разнообразны требования к ее функционированию и тем на большее число выходных параметров устанавливаются нормативы

# ***Основные понятия и принципы построения***


## ***технологических процессов сборки и монтажа***

- **Сборка** представляет собой совокупность технологических операций механического соединения деталей и ЭРЭ в изделии или его части, выполняемых в определенной последовательности для обеспечения заданного их расположения и взаимодействия.

- *Монтажом* называется ТП электрического соединения ЭРЭ изделия в соответствии с принципиальной электрической или электромонтажной схемой.

- **Стационарной** называется сборка, при которой собираемый объект неподвижен, а к нему в определенные промежутки времени подаются необходимые сборочные элементы.

- **Подвижная** сборка характеризуется тем, что сборочная единица перемещается по конвейеру вдоль рабочих мест, за каждым из которых закреплена определенная часть работы.



- **Сборка по принципу концентрации** операций заключается в том, что на одном рабочем месте производится весь комплекс работ по изготовлению изделия или его части. При этом повышается точность сборки, упрощается процесс нормирования.

- **Дифференцированная сборка** предполагает расчленение сборочно-монтажных работ на ряд последовательных простых операций.

- К монтажно-сборочным процессам предъявляются требования высокой производительности, точности и надежности. На повышение производительности труда существенное влияние оказывают не только степень детализации процесса и специализации рабочих мест, уровень механизации и автоматизации, но и такие организационные принципы, как **параллельность, прямоточность, непрерывность, пропорциональность и ритмичность.**

- Параллельность сборки – это одновременное выполнение частей или всего технологического процесса, что приводит к сокращению производственного цикла. Использование этого принципа обусловлено конструкцией РЭА, степенью ее расчленения на сборочные единицы.
- Наибольшими возможностями с технологической точки зрения обладают два вида обеспечения параллельности процессов:

1. Изготовление и сборка на многопредметных поточных линиях одновременно нескольких изделий;

2. Совмещение на автоматизированных поточных линиях изготовления деталей с их сборкой.



# В разработку ТП сборки и монтажа входит следующий комплекс взаимосвязанных работ

1. Выбор возможного типового или группового ТП и его доработка в соответствии с требованиями, приведенными в исходных данных;
2. Составление маршрута единичного ТП общей сборки и установление технологических требований к конструкции входящих в нее блоков и сборочных единиц;
3. Составление маршрутов единичных ТП сборки блоков (сборочных единиц) и установление технологических требований к входящим в них сборочным единицам и деталям;
4. Определение необходимого технологического оборудования, оснастки, средств механизации и автоматизации;
5. Моделирование и оптимизация техпроцесса по производительности;
6. Разбивка ТП на элементы;
7. Расчет и назначение технологических режимов, техническое нормирование работ и определение квалификации рабочих;
8. Разработка ТП и выбор средств контроля, настройки и регулировки;
9. Выдача технического задания на проектирование и изготовление специальной технологической оснастки;
10. Расчет и проектирование поточной линии, участка серийной сборки или гибкой производственной системы, составление планировок и разработка операций перемещения изделий и отходов производства;
11. Выбор и назначение внутрицеховых подъемно-транспортных средств, организация комплекточной площадки;
12. Оформление технологической документации на процесс в соответствии с ЕСТД и ее утверждение;
13. Выпуск опытной партии;
14. Корректировка документации по результатам испытаний опытной партии.

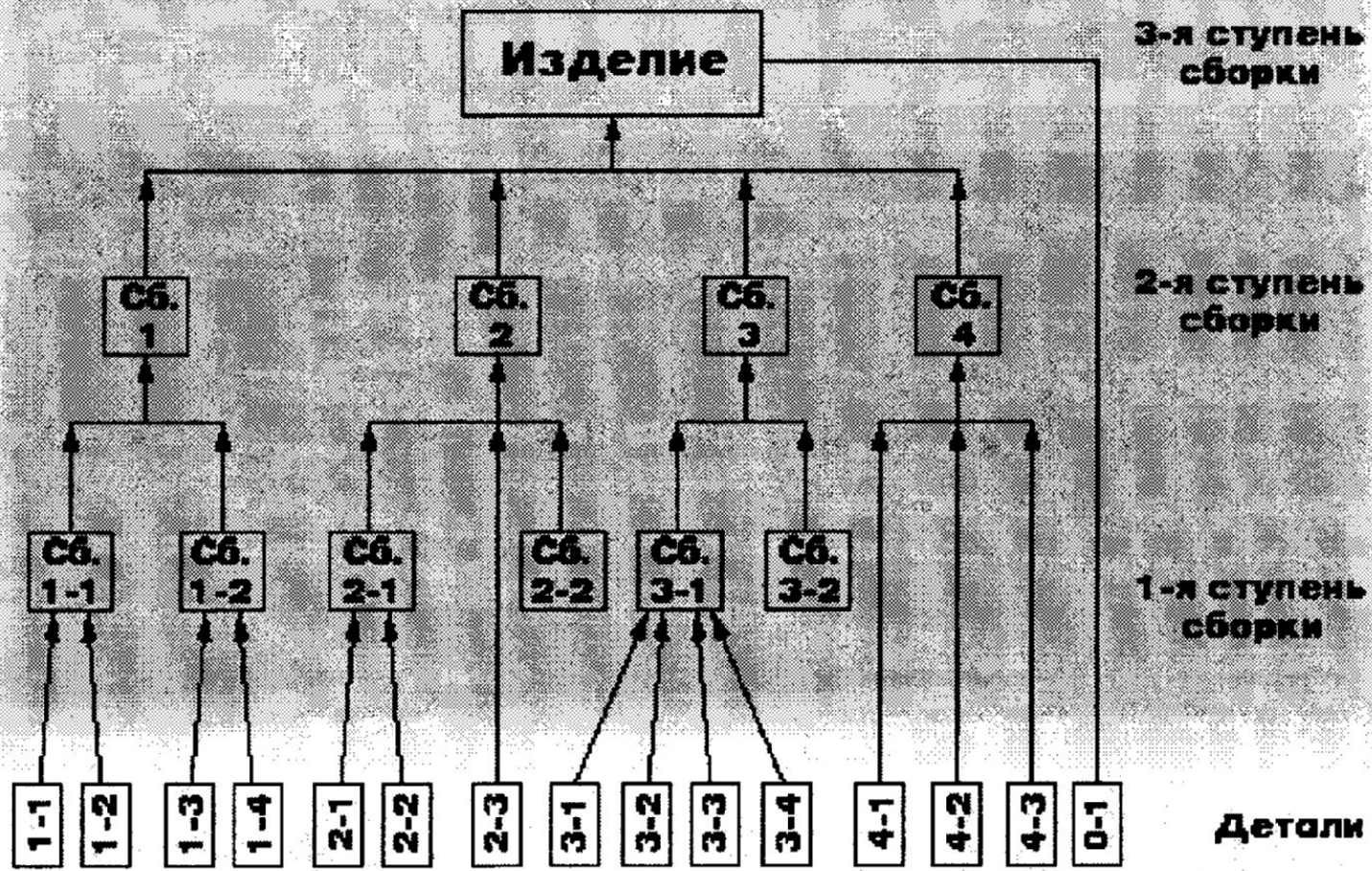



Рис.6.1. Схема сборки изделия 'вверхнего' типа



При непоточном производстве целесообразными технологическими границами дифференциации являются:

1. Однородность выполняемых работ.
2. Получение в результате выполнения операции законченной системы поверхностей деталей или законченного сборочного элемента.
3. Независимость сборки, хранения и транспортирования от других сборочных единиц.
4. Возможность использования простого (универсального) или переналаживаемого технологического оснащения.
5. Удобство планировки рабочих мест и участков.
6. Обеспечение минимального удельного веса вспомогательного времени в операции.
7. Установившиеся на данном производстве типовые и групповые операции.

- В поточном производстве необходимый уровень дифференциации операций в основном определяется ритмом сборки.
- Оптимальная последовательность технологических операций зависит от их содержания, используемого оборудования и экономической эффективности.
- В первую очередь выполняются неподвижные соединения, требующие значительных механических усилий.
- Каждая предыдущая операция не должна препятствовать выполнению последующих.
- На заключительных этапах собираются подвижные части изделий, разъемные соединения, устанавливаются детали, заменяемые в процессе настройки.
- Разработанная схема сборки позволяет проанализировать ТП с учетом технико-экономических показателей и выбрать оптимальный как с технической, так и с организационной точек зрения.

# ***Типовые и групповые технологические процессы сборки и монтажа***

■ Типовым ТП называется схематичный принципиальный процесс сборки и монтажа изделий одной классификационной группы, включающий основные элементы конкретного процесса: способ установки базовой детали и ориентации остальных, последовательность операций, типы технологического оснащения, режимы работы, приближенную трудоемкость для заданного выпуска изделий. По типовому процессу легко составляется конкретный процесс сборки изделия и при соответствующей его подготовке эти функции передаются ЭВМ.

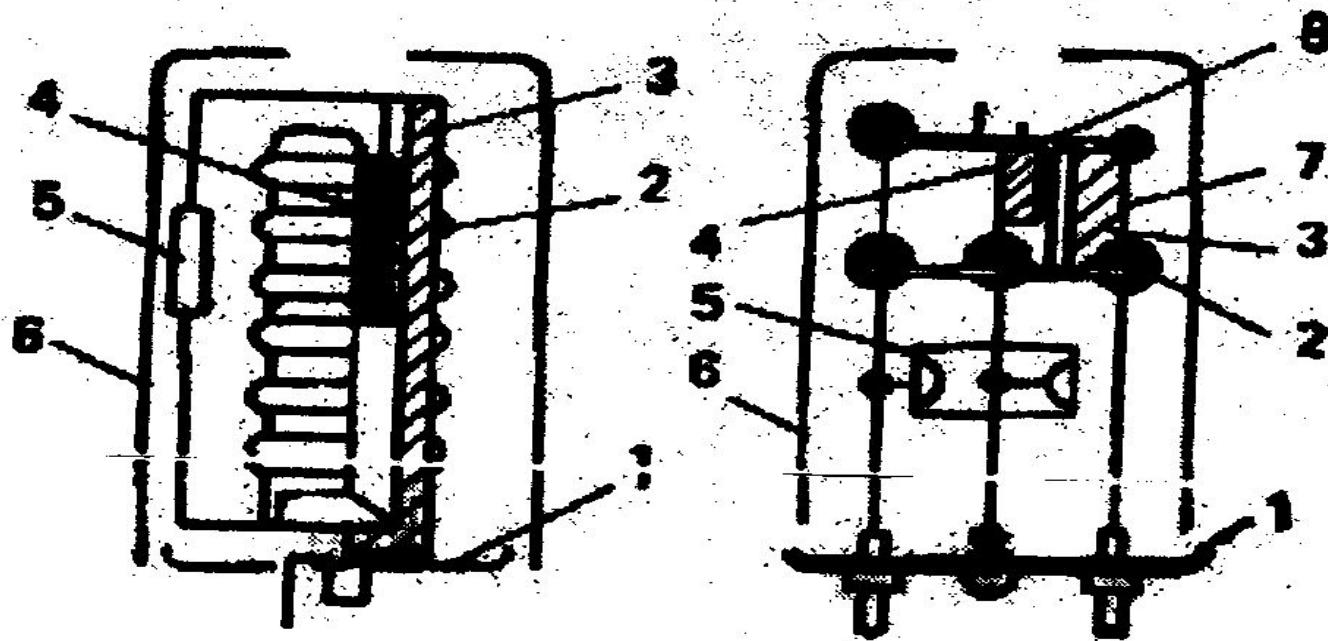
■ Предпосылкой типизации является классификация деталей, ЭРЭ, сборочных единиц и блоков по признакам конструктивной (размеры, общее число точек соединения, схема базирования и др.) и технологической (маршрут сборки, содержание переходов, оснащение) общности. При типизации приняты четыре классификационные степени: класс, вид, подвид, тип.

■ Классом называется классификационная группа сборочных единиц, имеющих общий вид сборочного соединения, например:

- свинчивание,
- пайка,
- сварка,
- склеивание и др.

- Вид - это совокупность сборочных единиц, характеризующаяся степенью механизации сборочного процесса: сборка ручная, с применением механизированного инструмента, автоматизированная.
- Виды разделяют на подвиды, отличающиеся друг от друга конструктивными элементами, например, клеевое соединение внахлестку, с накладками, стыковое, угловое и др.
- Типы объединяют сборочные единицы, которые имеют одинаковые условия сборки, расположение и число точек крепления.

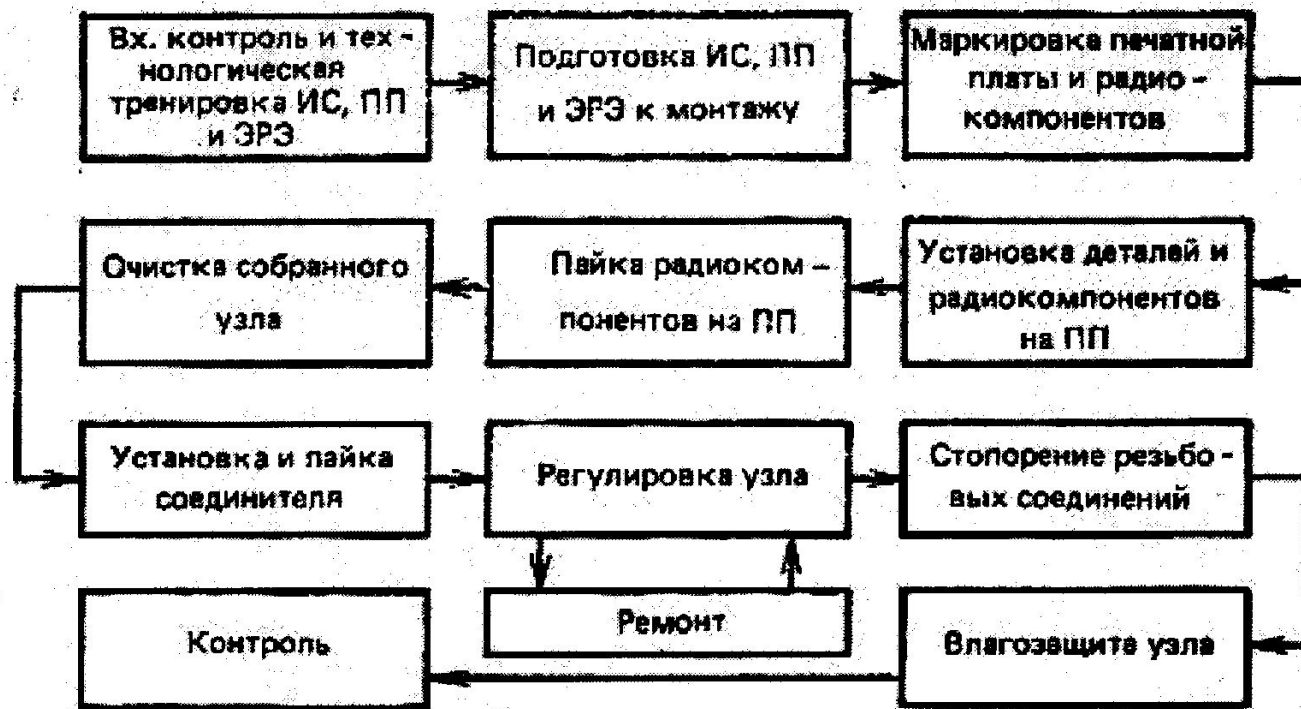
- По комплексности методы типизации ТП разбивают на три группы: простые (одной операции), условно простые (одного ТП) и комплексные.
- К первой группе относят методы непосредственной типизации без предварительной унификации собираемых элементов, основанные на общности технологического оснащения.
- Вторая группа объединяет методы типизации, связанные со способами соединения ЭРЭ и деталей, с использованием общих технологических решений для различных классов собираемых элементов, построения различных технологических маршрутов из набора нормализованных операций.



1-основание; 2- катушка; 3- каркас;  
4- сердечник; 5- конденсатор;  
6 - экран; 7-стойка; 8- ПЛВТ8



К третьей группе относят методы, использующие нормализацию элементов производственного процесса с дополнительной нормализацией ЭРЭ и деталей. На рисунке показана комплексная система типового технологического процесса сборки узла РЭА на печатной плате



*Комплексная схема ТПП сборки узла на ПП*

- Типизация ставит разработку ТП сборки и монтажа на научную основу;
- упрощает, ускоряет и удешевляет технологические разработки;
- позволяет внедрять передовые и экономичные методы труда, новое автоматизированное оборудование и поточные методы производства;
- улучшает использование производственных мощностей из-за сокращения числа наладок и переналадок оборудования;
- создает условия для автоматизации технологического проектирования монтажно-сборочных работ;
- позволяет обоснованно решать вопросы специализации и кооперирования предприятий.

- Групповые методы сборки и монтажа также разрабатываются для определенной совокупности сборочных единиц, имеющих одинаковые условия сборки, число точек крепления и характеризующихся общностью применяемых средств механизации и автоматизации.
- При классификации сборочных единиц в группы учитываются габаритные размеры базовой детали и остальных элементов, подлежащих сборке и монтажу, виды соединений, требуемая точность, технология осуществления этих соединений, характеристика оборудования, оснастки и контрольной аппаратуры, а также вопросы экономичности.

## Классификация завершается разбивкой сборочных единиц на следующие группы:

1. С начинающимся и заканчивающимся циклом сборки на одном и том же оборудовании;
2. С незаконченным циклом сборки, когда часть деталей и ЭРЭ собирается на одной групповой операции, а на остальных операциях детали и ЭРЭ входят в другие группы или их сборка выполняется по единичному процессу;
3. С одним общим групповым технологическим маршрутом, состоящим из набора групповых технологических операций, на каждом из которых используются групповые приспособления и наладки, позволяющие после небольшой перестройки производить сборку и монтаж очередной партии изделий. для того чтобы затраты времени на переналадку оснастки были минимальные, необходима определенная последовательность запуска партий изделий из одной классификационной группы.

- Разработка группового ТП в основном сводится к проектированию групповой технологической оснастки, созданию наладок для каждого изделия, входящего в классификационную группу, и установлению оптимальной последовательности запуска партий на сборку.
- Групповые методы сборки и монтажа наиболее эффективны в условиях единичного и мелкосерийного производства.
- Они позволяют сократить число разрабатываемых процессов, внедрить высокопроизводительную автоматизированную технологическую оснастку и оборудование, сконцентрировать технологически однородные работы и применить групповые поточные многопредметные линии сборки.

# Организация поточных линий сборки

- Основным направлением, которое позволит решить проблему существенного роста производительности труда в радиоаппаратостроении, является внедрение в производство механизированных и автоматизированных поточных линий сборки.
- Поточная сборка характеризуется непрерывностью процесса, построенного на дифференцированных операциях, и выпуском готовых изделий через определенный промежуток времени, называемый ритмом (тактом) выпуска и определяемый по формуле

$$tT = Fд/Нр,$$

*где:  $Fд$  - действительный годовой фонд работы линии с учетом числа смен и времени регламентированных перерывов;*

*$Нр$  - расчетная программа выпуска изделий, учитывающая возможные технологические потери.*

- Для обеспечения ритмичного выпуска изделий время, затрачиваемое на выполнение каждой операции, должно быть одинаковым и равным или кратным ритму.
- При массовой сборке, малых размерах сборочных элементов ритм выпуска единицы изделия получается весьма незначительным.
- С целью уменьшения вспомогательного времени, удобства сборки, транспортирования, планирования и учета работы линию рассчитывают и организуют не по штучному ритму, а по ритму условного объекта - пачки одноименных сборочных элементов:

$$t_T = (F_d/N_p)n_{тр} ,$$

*где  $n_{тр}$  - число изделий в пачке.*

- Технологической основой организации поточных линий служат типовые и групповые ТП сборки.
- Исходя из номенклатуры выпускаемых изделий, линии сборки разделяют на одно- и многопредметные.
- На однопредметной линии, применяемой в крупносерийном и массовом производстве, собирают изделия только одного наименования.
- За многопредметной поточной линией закрепляется сборка нескольких групп изделий, сходных по конструктивным и технологическим признакам.
- На этих линиях существуют следующие виды чередования изделий: последовательно-партионное, параллельное и смешанное.
- Выбор вида чередования определяется числом закрепленных за линией групп изделий и объемом каждой группы.



- Решение о возможности организации поточной линии сборки проводится на основании расчета необходимого числа рабочих мест исходя из программы выпуска изделий, их фактической трудоемкости и фонда времени работы линии.
- В случае многопредметной поточной линии возможны два варианта расчетов зависимости от трудоемкости собираемых на линии изделий.
- I вариант. Трудоемкости собираемых на линии изделий равны, т. е.  $T_A = T_B = T_V \dots T_M$ .
- Тогда расчет ритма проводится как для однопредметной линии

$$t_T = F_d / (N_{pA} + N_{pB} + N_{pV} + \dots + N_{pM})$$

- Число рабочих мест на линии

$$C_p = T_{оп} / t_T,$$

*где  $T_{оп}$  - оперативное время сборки любого изделия.*

- II вариант. При одинаковом маршруте трудоемкости собираемых изделий не равны.
- В этом варианте ритм выпуска определяется двумя способами.
- Первый способ применяют тогда, когда трудоемкость сборки изделий различна из-за разного объема работ по большинству или по всем операциям.
- Сохраняя постоянным число рабочих мест на линии для сборки всех изделий, определяют частные ритмы выпуска каждого изделия
- Проектирование ТП, выбор средств оснащения, контроля, испытаний в большой степени зависят от **типа производства.**

- Тип производства характеризуется коэффициентом закрепления операций за одним рабочим местом

$$K=O/P$$

*где O - количество различных операций;*

*P - количество рабочих мест для выполнения различных операций.*

- Значение K (коэффициента серийности) принимается для планового периода (1 месяц) следующих типов производств:

- массового:  $K = 1$ ;
- крупносерийного:  $1 < K < 10$ ;
- среднесерийного:  $10 < K < 20$ ;
- мелкосерийного:  $20 < K < 40$ ;
- единичного: K не регламентируется специализацией рабочих мест или загруженностью рабочих мест одной и той же работой.

- Массовое производство характеризуется узкой специализацией рабочих мест, за каждым из которых закреплено выполнение только одной операции.
- При массовом производстве изготовление одних и тех же изделий ведется непрерывно в большом количестве и в течение значительного промежутка времени.
- Его особенности:
  - размещение рабочих мест непосредственно одно за другим по ходу ТП;
  - непрерывная механизированная передача объекта обработки (сборки) без межоперационного складирования;
  - синхронизация (согласование по длительности) операций;
  - широкое применение специализированных станков, приспособлений, технологической оснастки;
  - автоматизация оборудования;
  - использование низкоквалифицированной рабочей силы;
  - минимальная себестоимость и срок изготовления.

- Серийное производство характеризуется широкой специализацией рабочих мест и изготовлением различных изделий партиями, регулярно повторяющимися через определенные промежутки времени.
- За каждым рабочим местом закреплено несколько операций, выполняемых периодически.
- При крупносерийном производстве изделия изготавливаются большими партиями и без переналадки технологического оборудования в течение нескольких десятков рабочих смен.
- Период времени между переналадками оборудования при среднесерийном производстве составляет несколько рабочих смен, а при мелкосерийном - соизмерим с временем одной рабочей смены.
- Кроме того, подтипы серийного производства отличаются степенью автоматизации и специализации применяемого оборудования и приспособлений, отработанностью режимов выполнения операций, подробностью разработки ТП и др.

- Единичное производство характеризуется универсальностью рабочих мест, за которыми нет закрепления операций. Изделия производятся в небольших количествах и их изготовление может повторяться через неопределенное время.
- К особенностям единичного производства можно отнести:
  - применение универсального оборудования и приспособлений, нормализованного рабочего инструмента и универсального измерительного инструмента;
  - расположение оборудования группами по типам станков;
  - высокую квалификацию рабочих;
  - малую степень подробности разработки ТП;
  - высокую степень концентрации ТП.

# ***Физико-технологические основы электрических соединений***

## **Классификация методов выполнения электрических соединений и технические требования к ним**

При сборке современной РЭА на ПП на поверхности платы устанавливают как дискретные элементы с двумя-тремя выводами, так и корпуса ИС с плотностью выводов порядка  $60 \text{ см}^{-2}$  и их числом до нескольких сот, а также безвыводные и снабженные выводами кристаллодержатели

## **Технология выполнения пайки**

Среди методов выполнения монтажных соединений в РЭА пайка занимает доминирующее положение. В зависимости от типа производства она выполняется индивидуально с помощью нагретого паяльника или различными групповыми методами.

## Физико-химические основы сварки

Процесс образования сварного соединения можно условно разделить на четыре стадии:

- *Образование физического контакта между поверхностями материалов.*
- *Активация контактных поверхностей.*
- *Объемное развитие взаимодействия.*
- *Кристаллизация.*

## Контроль качества и надежность монтажных соединений

Контроль при выполнении монтажных соединений включает наблюдение за соответствием ТП требованиям документации, в том числе материалов, режимов, а также оценку качества соединений.

Оценка внешнего вида производится в сравнении с эталонными образцами. Пайка должна быть гладкой и блестящей с правильно оформленными галтелями, а сварка—с заданной степенью обжатия выводов. Этому виду контроля подвергаются все соединения



## Электрическое соединение методом накрутки

Накрутка - это процесс создания электрического соединения путем навивки под натягом определенного числа витков одножильного провода на штыревой вывод с острыми кромками.

## Соединения проводящими клеями


Электропроводящие клеи (контактолы) применяют при создании монтажных соединений в тех случаях, когда другие методы оказываются неэффективными: в труднодоступных местах, при ремонте ПП, при низкой термостойкости компонентов.

# ***КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НИМ***

- При сборке современной РЭА на ПП на поверхности платы устанавливают как дискретные элементы с двумя- тремя выводами, так и корпуса ИС с плотностью выводов порядка  $60 \text{ см}^{-2}$  и их числом до нескольких сот, а также безвыводные и снабженные выводами кристаллодержатели.
- Расстояние между выводами составляет 2,54; 1,27; 1,02; 0,63; 0,51 мм и менее.

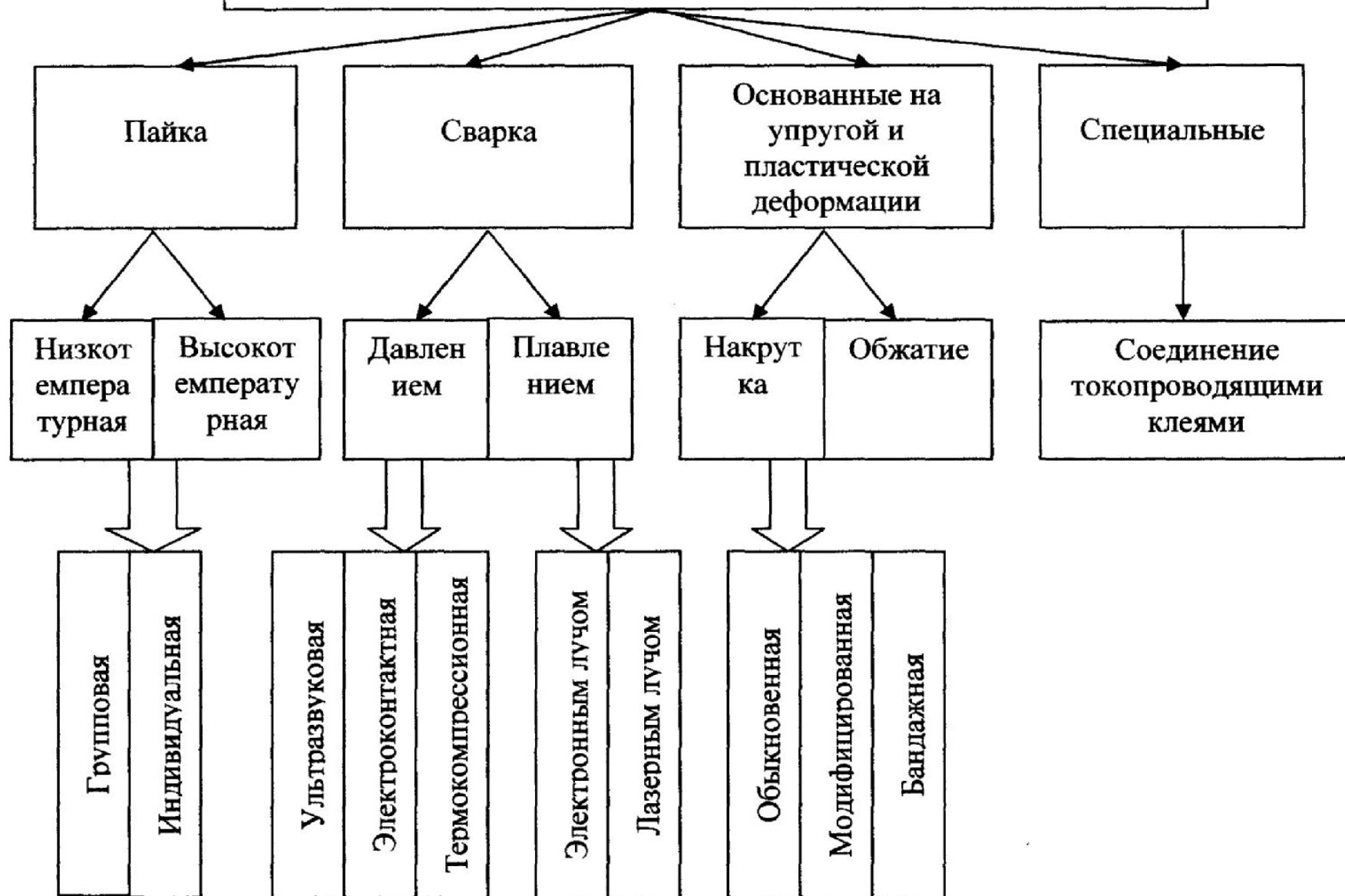
■ *Поэтому получение нескольких десятков на 1 см<sup>2</sup> многоконтактных соединений выводов корпусов с контактными площадками ПП предъявляет высокие требования:*

1. К выбору контактируемых материалов наибольшее распространение получили пленки (1...8 мкм) и проволоки из золота (диаметр 25...80 мкм), меди (диаметр 50...100 мкм), луженой меди (100...150 мкм), алюминия (5...100 мкм), палладия, никеля (10...50 мкм) и др.;
2. К геометрическим размерам выводов (25...100 мкм) и контактных площадок (>700 мкм<sup>2</sup>);
3. К методу (пайка, сварка, накрутка, обжимка, склеивание) и режимам формирования соединений (Т 150...350 °С, 0,5...10 с, Р<108 Н/м<sup>2</sup>);
4. К уровню автоматизации процесса подсоединения выводов;
5. К точности совмещения выводов элементов и контактных площадок плат (около 25 мкм).

- 
- 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 должны быть обеспечены:
    - высокие надежность и долговечность;
    - минимальное омическое сопротивление в зоне контакта и его стабильность при различных климатических воздействиях;
    - максимально достижимая механическая прочность;
    - минимальное значение основных параметров процесса контактирования (температуры, давления, длительности выдержки);

- возможность соединения разнообразных сочетаний материалов и типоразмеров;
  - стойкость к термоциклированию;
  - в зоне контактирования не должно образовываться материалов, вызывающих деградацию соединения;
  - качество соединения должно контролироваться простыми и надежными средствами;
  - экономическая эффективность и производительность процесса.
- Основные методы выполнения электрических соединений, которые применяются в производстве РЭА, приведены на рисунке:

# Методы выполнения электрических соединений



- **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 примеряют 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 металлов и флюсов, длительное воздействие высоких температур, коррозионная активность остатков флюсов, выделение вредных веществ.

- **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.

<b>Вид соединения</b>	<b>Переходное сопротивление, МОм</b>	<b>Механическая прочность, МПа</b>	<b>Интенсивность отказов <math>\cdot 10^{-9}</math>, 1/ч</b>	<b>Тепловое сопротивление контакта, град/Вт</b>
<u>Сварка</u>	0,01...1	100 60	0,1... 0,2	0,001
<u>Накрутка</u>	1 ...2	60 ... 80	0,2 ...0,5	0,0005
<u>Пайка</u>	2 ... 3	10 ...40	1 ...10	0,002
<u>Обжимка</u>	1 ...10	20 ...50	2 ...5	0,0008 ...0,001
<u>Соединение токопроводящими клеями</u>	1 ...10 Ом $\cdot$ м	5 ...10	10 ...50	5

# ***Физико-химические основы пайки.***

## ***Техпроцесс пайки***


■ Для образования качественного паяного соединения необходимо:

- подготовить поверхности деталей;
- активировать соединяемые металлы и припой;
- обеспечить взаимодействие на границе «основной металл — жидкий припой»;
- создать условия для кристаллизации жидкой металлической прослойки.

Подготовка включает удаление загрязнений органического и минерального происхождения, оксидных пленок, а в некоторых случаях также нанесение покрытий, улучшающих условия пайки или повышающих прочность и коррозионную стойкость паяных соединений.

- Удаление пленок, препятствующих смачиванию расплавленным припоем, проводят механическими или химическими (обезжиривание, травление) способами.
- При механической очистке удаляется тонкий поверхностный слой металла при помощи режущего инструмента (резца, шлифовального круга, шабера и др.), наждачной бумаги, проволочной щетки.
- Для повышения производительности при обработке протяженных и сложнопрофилированных изделий (например, ПП) применяют гидроабразивную обработку или очистку вращающимися щетками из синтетического материала с введенными в его состав абразивными частицами.

- Образование шероховатой поверхности после механической обработки способствует растеканию флюса и припоя, так как риски являются мельчайшими капиллярами.
- Обезжиривание изделий проводят в растворах щелочей или в органических растворителях (ацетоне, бензине, спирте, четыреххлористом углероде, фреоне, спиртобензиновых и спиртофреоновых смесях) путем протирки, погружения, распыления, обработки в паровой фазе или в ультразвуковой ванне.
- Современное оборудование для очистки имеет блочно-модульную конструкцию с программным управлением.

- 
- Обычно оно снабжается устройствами для регенерации моющих средств и сушки изделий.
  - Эффективным методом сушки является центрифугирование.
  - Удаление оксидных пленок осуществляют травлением в растворах кислот или щелочей.
  - Состав раствора определяется видом металла, толщиной окисной пленки и требуемой скоростью травления.
  - После операции травления детали тщательно промывают с применением нейтрализующих растворов.

- Очищенные детали необходимо немедленно направлять на сборку и пайку, так как сроки сохранения паяемости для меди 3...5 суток, для серебра —10...15 суток.
- В ряде случаев перед пайкой на поверхность соединяемых деталей наносят покрытия, которые улучшают процесс смачивания припоем и поддерживают хорошую способность к пайке в течение длительного межоперационного хранения.
- В качестве металла для таких покрытий используют различные припои (ПОС61, сплав Розе и др.), серебро, золото, палладий и их сплавы, которые наносят гальваническим или термовакуумным осаждением, а также горячей металлизацией.
- Использование технологического покрытия позволяет увеличить сроки сохранения паяемости до 3...6 мес.



- На алюминий и его сплавы технологические покрытия наносят с применением ультразвуковых (УЗ) колебаний.
- Для этого используют УЗ-паяльники, которые создают УЗ-колебания в расплаве припоя, нанесенном на основной металл, или используют УЗ-ванны, в которых УЗ-колебания передаются расплавленному припою через стенки сосуда при облуживании погружением.
- Кавитационные явления, возникающие в расплаве, приводят к разрушению оксидной пленки на поверхности металла и смачиванию его припоем.



- Увеличение срока сохранения паяемости деталей, подготовленных к пайке, достигается также путем нанесения специальных консервационных покрытий, большинство из которых не удаляется при выполнении монтажных операций, так как их состав согласуется с составом применяемого флюса.
- Такие покрытия разделяются на два вида:
  1. На основе канифоли (флюсы ФКСп, ФПЭт, ФКЭт);
  2. Консервационные, представляющие собой пленки щелочных металлов.
- Большинство консервационных покрытий вытесняет влагу, и их можно наносить на влажные, на успевшие окислиться детали путем погружения в раствор, кистью или пульверизацией.

- Образовавшаяся после испарения растворителя пленка надежно защищает поверхности металлов от проникновения влаги и окисления в течение 5...6 мес. хранения.
- После выполнения подготовительных операций и в процессе межоперационного хранения проводится контроль пригодности деталей к пайке путем оценки паяемости.
- В промышленности разработано большое число методов контроля паяемости:
  - определение площади облуживания поверхности после выдержки образцов в течение заданного промежутка времени во флюсе, а затем расплавленном припое; она должна составлять не менее 95 % от контролируемой поверхности;

- расчет коэффициента растекания  $K_p = S_p/S_o$  как отношение площади  $S_p$ , занимаемой навеской припоя после расплавления и растекания, к площади  $S_o$ , занимаемой дозой припоя в исходном состоянии, или отношение высот припоя до ( $h_o$ ) и после ( $h_p$ ) растекания;
- измерение краевого угла смачивания ;
- по высоте или скорости подъема припоя в капиллярном зазоре (например, в металлизированном отверстии ПП);
- измерение усилия, действующего на образец основного металла, погруженного в припой (по величине поверхностного натяжения).



- 
- 
- По критерию паяемости все многообразие современных паяемых материалов различной физико-химической природы можно разделить на следующие основные группы: легкопаяемые, среднепаяемые, труднопаяемые и непаяемые.
  - Эти группы приведены в таблице.

# Классификация материалов по паяемости

<b>Группа материалов</b>	<b>Материалы</b>	<b>Коэффициент растекаемости, <math>K_p</math></b>	<b>Краевой угол смачивания, <math>\Theta</math>, град</b>
Легкопаяемые	Олово, золото, серебро, <u>медь</u> и их сплавы	0,8...0,97	0 ...12
Среднепаяемые	Латунь, бронза, <u>никель</u> , <u>цинк</u> , сталь	0,6...0,82	5...20
Труднопаяемые	Нержавеющая сталь, магний, алюминий, <u>титан</u> , <u>молибден</u> и др.	0,5...0,6	20...40
Непаяемые	Керамика, стеклокерамика, ферриты, <u>полупроводники</u>	-	120...160

# *Активация соединяемых металлов и припоя*

- Нагрев основного металла и расплавление припоя приводят к тому, что их активность снижается вследствие взаимодействия с кислородом воздуха и образования оксидной пленки.
- Чтобы удалить образующуюся в процессе пайки оксидную пленку и защитить поверхности деталей от дальнейшего окисления, применяют **флюсы, газовые среды, самофлюсующиеся припои или способы физико-механического воздействия** (механические вибрации, ультразвуковые колебания и т. д.).

- 
- 
- **Пайка с флюсами** наиболее распространена и общедоступна, так как ее можно осуществлять в обычных атмосферных условиях без применения дорогостоящего оборудования.
  - Расплавленный флюс растекается по паяемой поверхности и припою, смачивает их и вступает с ними во взаимодействие, в результате которого удаляется оксидная пленка.

- Основными причинами удаления оксидов металлов являются:
  - химическое взаимодействие между флюсом и оксидной пленкой с образованием растворимого во флюсе соединения;
  - химическое взаимодействие между флюсом и основным металлом, в результате которого происходит постепенный отрыв оксидной пленки и перевод ее в шлак;
  - адсорбционное понижение прочности оксидной пленки под действием расплава припоя и диспергирование ее;
  - растворение оксидной пленки основного металла и припоя во флюсе.



- Применение флюсов нередко приводит к тому, что флюсовые остатки и продукты взаимодействия их с оксидными пленками образуют в паяном шве шлаковые включения, что снижает прочность и коррозионную стойкость, нарушает герметичность соединений.
- Этого можно избежать, если перейти на **бесфлюсовую пайку**, которая осуществляется в специальных газовых средах или вакууме.
- **Газовые среды**, применяемые при пайке, разделяются на нейтральные и активные.
- Наиболее типичными представителями газовых нейтральных сред являются азот, аргон, гелий, криптон, которые защищают паяемый металл и припой от окисления.

- Активные газовые среды (водород, оксид углерода, азотно-водородная смесь и др.) не только защищают от окисления детали и припой, но также удаляют с их поверхности уже образовавшиеся оксидные пленки.
- Однако газовые среды могут вступать во взаимодействие с паяемым металлом и припоем, образуя нежелательные продукты реакции (гидриды, нитриды, карбиды), которые ухудшают физико-механические свойства соединений.
- **При пайке в вакууме** наблюдается дегазация металла шва и, как следствие, более высокая его плотность.


- Вместе с тем в вакууме возможно испарение летучих компонентов припоя, таких как кадмий, индий, марганец, цинк и других, что приводит к пористости и изменению состава металла шва.
- Сущность **физико-механических методов удаления оксидных пленок** с поверхности паяемых металлов заключается в их разрушении под слоем жидкого припоя с помощью ультразвука (УЗ), трения деталей, режущего или абразивного инструмента, при этом припой защищает паяемую поверхность от воздействия кислорода воздуха и вступает с ней в физический контакт.
- В качестве инструмента используются УЗ-паяльник, металлические щетки, сетки, а материалом служит тонкоизмельченный асбест.

- В качестве инструмента используются УЗ-паяльник, металлические щетки, сетки, а материалом служит тонкоизмельченный асбест.
- Эти методы активирования поверхности характеризуются низкой производительностью, неравномерностью удаления оксидных пленок и включением их, а также частиц абразива в паяное соединение.
- Наряду с описанными методами для удаления оксидной пленки в процесс пайки применяют **самофлюсующие припой.**

- Они содержат компоненты, которые активно реагируют с оксидной пленкой паяемого металла и припоя, образуя легкоплавкие шлаки, защищающие поверхности основного металла и припоя от окисления.
- В самофлюсующих припоях высокой активностью обладают не только сами флюсующие компоненты, но и их оксиды.
- По составу и характеру действия самофлюсующие припои можно разделить на четыре группы: припои

## ***Взаимодействие на границе “основной металл - жидкий припой”***

- После расплавления припоя и достижения атомами металлов требуемого уровня энергии активации начинается взаимодействие, в процессе которого происходит смачивание поверхности твердого тела расплавом металла.
- **От того, насколько хорошо расплавленный припой смачивает поверхность основного металла, зависит прочность, коррозионная стойкость и другие свойства паяных соединений.**

- 
- При смачивании атомы металлов сближаются на расстояние менее 100 нм.
  - В поверхностных слоях взаимодействующих металлов возникают связи, которые, образовавшись в отдельных местах, очень быстро распространяются по всей площади контакта “основной металл - расплав припоя”.
  - Природа возникших связей - квантовая, а активность образования соединений между атомами металлов определяется конфигурацией внешнего электронного слоя.

- Следующей стадией взаимодействия поверхностного натяжения капли припоя на поверхности твердого тела является растекание припоя по плоской поверхности, которая продолжается до тех пор, пока не установится равновесие векторов сил поверхностного натяжения в точке на границе трех фаз, как показано на рисунке, в соответствии с уравнением:

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} \cos \Theta,$$

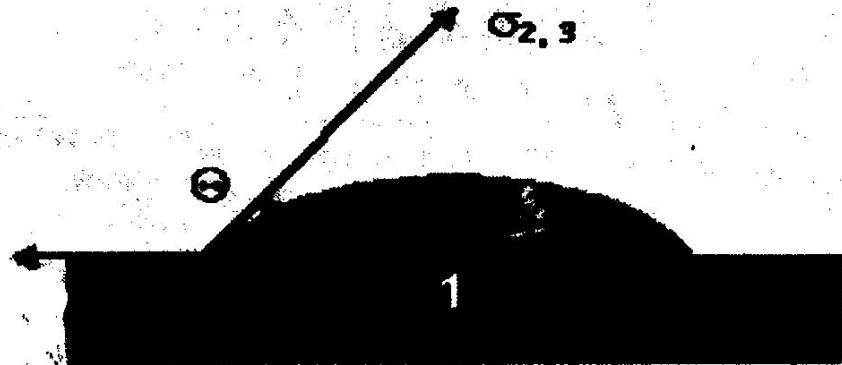
где  $\sigma_{1,2}$  - натяжение на границе твердой и жидкой фаз,  
 $\sigma_{1,3}$  - натяжение на границе твердой фазы и газа,  
 $\sigma_{2,3}$  - натяжение на границе жидкой фазы и газа,  
 $\cos \Theta$  - коэффициент смачивания.



- Из этого уравнения видно, что чем выше поверхностное натяжение припоя в расплавленном состоянии  $\sigma_{2,3}$ , тем хуже смачивает он основной металл.
- Однако, поверхностное натяжение металлов не характеризует однозначно способность их в расплавленном состоянии течь по поверхности твердого металла.
- Растекание припоя определяется соотношением сил **адгезии** припоя к поверхности основного металла и **когезии**, характеризуемой силами связи между частицами припоя:

$$K = \sigma_{2,3} (\cos \Theta - 1)$$

где  $K$  - коэффициент растекания.



- На процесс смачивания и растекания припоя оказывают влияние и **технологические факторы**: способ удаления оксидной пленки в процессе пайки, характер предшествующей механической обработки, режим пайки и др.
- Так, при флюсовой пайке флюсы действуют как поверхностно-активные вещества (ПАВ) и снижают поверхностное натяжение расплавленных припоев, что способствует улучшению смачивания паяемой поверхности.
- Применение газовых сред, наоборот, ухудшает смачивание вследствие того, что примеси в газовой среде взаимодействуют с основой, образуя различные соединения с кислородом, углеродом, серой.

- Под действием капиллярного давления припой поднимается по капилляру на высоту  $h$ :

$$h = 2 / (\gamma \Delta g),$$

где  $\Delta$  - суммарный зазор;  $g$  - ускорение свободного падения;

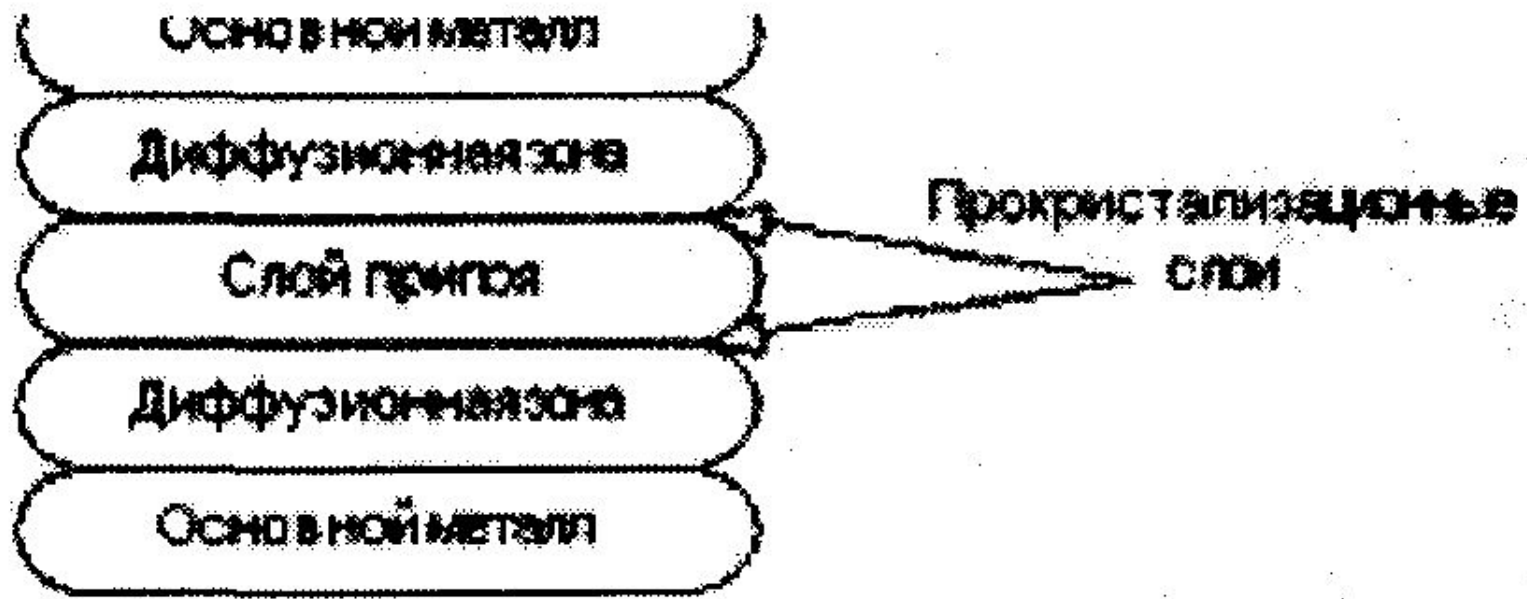
$\gamma$  - плотность припоя.

- В горизонтальном капилляре шириной  $\Delta$  для припоя с вязкостью  $\eta$  продолжительность затекания  $t$  на длину капилляра  $l$  приблизительно равна

$$t = 6 \eta l^2 / (\sigma_{2,3} \Delta \cos \Theta \Delta)$$

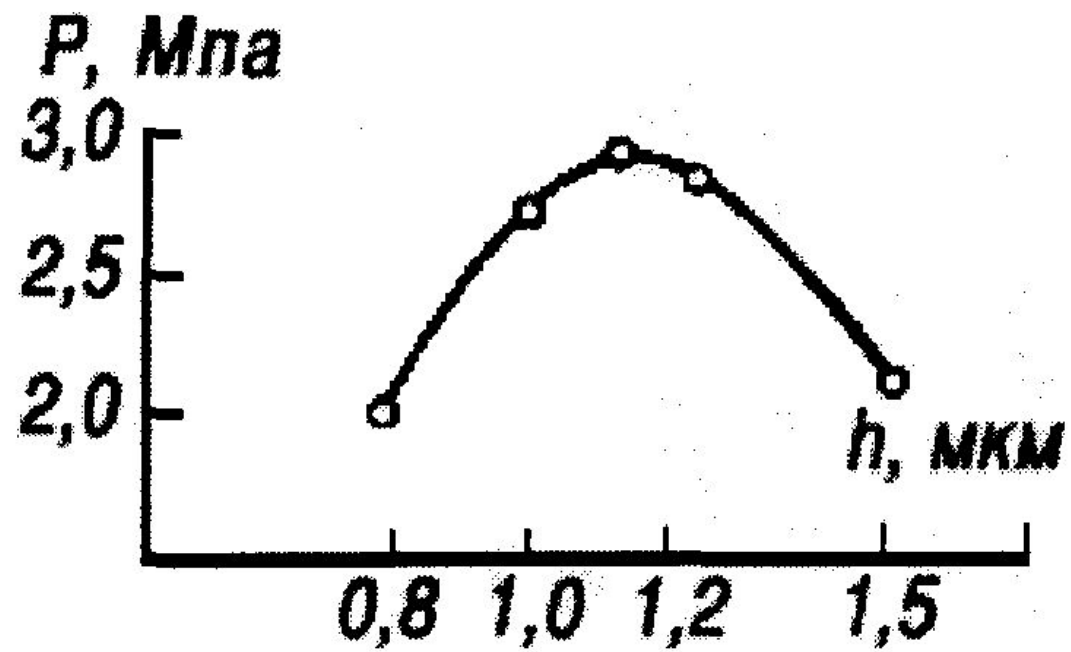
- Как показывает анализ приведенных формул, скорость затекания в горизонтальном капилляре и высота подъема в вертикальном уменьшаются при снижении поверхностного натяжения между припоем и флюсом.
- Эффективность пайки определяется также **величиной зазора** между паяемыми элементами, она находится в пределах от сотых до десятых долей миллиметра и зависит от пары “припой - основной металл”, применяемого флюса и способа пайки.
- В процессе растекания припоя происходит взаимодействие жидкой фазы припоя с основным металлом, проявляющееся в растворении и диффузии металлов.

- Скорость и глубина этих процессов зависят от природы взаимодействующих металлов, температуры, скорости и времени нагрева, напряжений в основном металле.
- Диффузионные процессы при пайке позволяют увеличить прочность соединений, однако эрозия основного металла расплавленным припоем, образование интерметаллидов являются отрицательными свойствами, так как вызывают хрупкость соединений.
- В результате диффузии и растворения образуется следующая схема строения паяного шва, показанная на рисунке.



- Ширина диффузионной зоны оказывает существенное влияние на прочность паяного соединения.
- Изменение прочности паяных соединений в зависимости от ширины диффузионной зоны показана на графике.
- Поэтому в каждом конкретном случае условия пайки должны быть подобраны таким образом, чтобы ширина диффузионной зоны находилась в пределах 0,9... 1,2 мкм





## ***Кристаллизация металлической прослойки***

- После удаления источника тепловой энергии наступает стадия кристаллизации металлической прослойки, которая оказывает большое влияние на качество паяных соединений.
- Кристаллизация в шве начинается на основном металле, который оказывает сильное ориентирующее воздействие на расплавленный припой, и на тугоплавких частицах.
- На структуру паяного соединения влияют зазор, так как он определяет температурный градиент расплава, величину и протяженность области концентрационного переохлаждения, а также скорость снижения температуры.

- При прочих равных условиях уменьшение зазора, а следовательно, толщины кристаллизующейся жидкости приводит к таким изменениям указанных факторов, что дендритная форма кристаллов (при 0,5 ... 2 мм) постепенно уступает место ячеистой (0,3 ... 0,4 мм), а ячеистая - преобладающему росту кристаллов с гладкой поверхностью (0,1 ... 0,2 мм).
- Характерным для кристаллизации при пайке является ярко выраженная ликвация шва, связанная с образованием зональных неоднородностей, дендритных образований, отличающихся меньшей прочностью.

# ***Выбор материалов для монтажной пайки.***

## ***Флюсы***

■ На качество паяных соединений оказывают существенное влияние не только технологические условия проведения процесса пайки, но и правильный выбор материалов:

- **флюсов,**
  - **припоев**
  - **очистных жидкостей.**
- Флюсы, образуя жидкую и газообразную защитные зоны, предохраняют поверхность металла и расплавленного припоя от окисления, растворяют и удаляют уже имеющиеся пленки оксидов и загрязнений с поверхностей, улучшают смачивание металла припоем и растекание припоя за счет уменьшения сил поверхностного натяжения.

- Выбор флюса производится исходя из требуемой химической активности, которая должна быть наибольшей в интервале температур, определяемом температурами плавления припоя и пайки.
- Он должен быстро и равномерно растекаться по паяемым материалам, хорошо проникать в зазоры и удаляться из них, легко вытесняться расплавленным припоем, быть термически стабильным, не выделять вредных для здоровья газов, не вызывать коррозии паяемых металлов и припоев, быть экономичным.
- Правильно выбранный флюс ускоряет процесс пайки при минимально возможных температурах, что важно при сборке термически чувствительных элементов РЭА.

- В зависимости от температурного интервала активности флюсы разделяются на **НИЗКО- И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ**.
- Для электромонтажных соединений в основном применяются низкотемпературные флюсы, которые по коррозионному действию разбиты на пять групп:
  1. Некоррозионные неактивированные;
  2. Некоррозионные слабоактивированные;
  3. Слабокоррозионные активированные;
  4. Коррозионные активные;
  5. Коррозионные высокоактивные.

- По своему составу флюсы разделяются на две группы. К первой относятся **смолодержащие флюсы** на основе канифоли или полиэфирных флюсующих смол (ПН-9, ПН-56).
- Они обладают широкой универсальностью, не снижают электрическое сопротивление подложек ПП, не вызывают коррозии соединяемых металлов.
- Однако флюсы этих групп обладают слабой химической активностью и предназначены для пайки легкопаяемых металлов.
- Канифольные флюсы, активированные 2 ... 3,5% органических кислот (бензойной, салициловой и др.), обладают повышенной активностью и используются при групповой и ручной пайке многослойных ПП.

- Сильное влияние этих флюсов - на сопротивление изоляции диэлектриков и коррозию проводников требует тщательной отмывки остатков флюса после пайки.
- Вторую группу составляют **коррозионные активные флюсы**, не содержащие смол. для повышения активности флюсов в их состав вводят активирующие добавки: анилин, гидразин, триэтаноламин, диэтиламин солянокислый.
- При введении активаторов стремятся, чтобы при пайке добавки со щелочными свойствами нейтрализовали остатки кислотных компонентов.
- Основное применение они нашли в процессах лужения и восстановления паяемости монтажных элементов после хранения в цехе и на складе.)



# **Выбор материалов для монтажной пайки.**

## **Припой**

- В качестве припоев используются различные цветные металлы и их сплавы, имеющие более низкую температуру плавления, чем соединяемые металлы.
- Исходя из температуры плавления припой разделяются на **низко-, средне- и высокотемпературные**.
- Для пайки монтажных соединений РЭА применяют преимущественно низко- и среднетемпературные припой ( $T_{пл}$  не более  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Основными компонентами низко- и среднетемпературных припоев являются **олово** и **свинец**, к которым для придания специальных свойств могут добавляться присадки сурьмы, серебра, висмута, кадмия.

- Так, серебро и сурьма повышают, а висмут и кадмий понижают температуру плавления и затвердевания припоя.
- Серебро задерживает снижение прочности при старении, уменьшает окисление олова.
- Сурьма также увеличивает прочность соединения, но делает его хрупким и ухудшает растекание по меди.
- Механическая прочность припоев повышается с увеличением содержания олова, при этом одновременно увеличивается и его стоимость, так как свинец приблизительно в 20 раз дешевле олова.

- Выбор марки припоя определяется назначением и конструктивными особенностями изделий, типом основного металла и технологического покрытия, максимально допустимой температурой при пайке ЭРЭ, а также технико-экономическими и технологическими требованиями, предъявляемыми к паяным соединениям.
- К техническим требованиям относятся достаточная механическая прочность и пластичность, заданные теплопроводность и электрические характеристики, коэффициент термического расширения (КТР), близкий к КТР паяемого металла, коррозионная стойкость, как в процессе пайки, так и при эксплуатации соединений.
- Припой должен быть экономичным и не содержать дефицитных компонентов.

- Технологические требования к припою предусматривают хорошую смачиваемость соединяемых им металлов, высокие капиллярные свойства, малый температурный интервал кристаллизации для исключения появления пор и трещин в паяных соединениях, возможность дозирования его в виде проволоки, трубок с наполнением их флюсом, шариков, таблеток и т. п.
- С появлением в технологии РЭА поверхностного монтажа начинают усиленно разрабатываться припои в виде **паяльных паст**.
- Паяльная паста представляет собой однородную суспензию порошка легкоплавкого припоя (диаметр частиц 5 ... 25 мкм) во флюсующей связке, в которую кроме флюса (обычно канифоль) входят активатор, растворитель, дефлокулянт, антиоксидант и др.
- Качество паяльной пасты определяется размерами частиц и степенью однородности гранулометрического состава. Чем меньше размеры шариков припоя, тем точнее паста будет нанесена через сетчатый трафарет на контактные площадки ПП.

# ***Выбор материалов для монтажной пайки.***

## ***Очистные жидкости***

- **Очистные жидкости** предназначены для отмывки изделий от флюса после пайки.
- При выборе очистной жидкости необходимо учитывать состав остатков, ее растворяющую способность, рабочую температуру, время и условия отмывки, влияние на элементы конструкции, токсичность и пожароопасность.
- Водорастворимые флюсы отмывают в проточной горячей (60 ... 80 °С) и холодной воде с помощью мягких щеток.
- Канифольные флюсы в процессе индивидуальной пайки промывают этиловым (изопропиловым) спиртом; при групповой пайке применяют ультразвуковую очистку или очистку щетками в спирто-бензиновой смеси (1:1); трихлорэтилене или хлористом метилене.

- Хорошие результаты получены при использовании фреона или смесей на его основе. Фреон характеризуется высокой чистотой (98,8%) и низким поверхностным натяжением, в результате чего он проникает в мельчайшие отверстия.
- Этот растворитель не воспламеняется, не ядовит (максимально допустимая концентрация в рабочей зоне 1000 см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), не разрушает резину, лаки, краски и большинство полимеров, легко генерируется путем дистилляции, но экологически опасен.
- Выбор конкретного материала для пайки производят в соответствии с отраслевыми стандартами.

# *Технология выполнения пайки.*

## *Основные операции*

- Среди методов выполнения монтажных соединений в РЭА пайка занимает доминирующее положение.
- В зависимости от типа производства она выполняется **индивидуально** с помощью нагретого паяльника или различными **групповыми методами**.
- **Индивидуальная пайка** эффективна при монтаже ПП в условиях единичного и мелкосерийного производства, для проводного монтажа, при запаивании элементов со штыревыми выводами на одной стороне ПП после выполнения пайки групповым способом на второй стороне, при макетных, ремонтных и регулировочных работах.

- К основным преимуществам **групповой пайки** относятся: строгое поддержание технологического режима, повышение производительности, увеличение надежности соединений, легкость автоматизации.
- Но с их применением повышаются требования к однородности и качеству подготовки поверхностей, возникает необходимость в разработке мер по предотвращению перегрева термочувствительных элементов и подбора конструктивно-технологических решений по устранению характерных дефектов (сосулек, наплывов и др.), усложняется процесс отмычки более активного, чем при индивидуальной пайке, флюса, который наносится в больших количествах.
- Выбор метода пайки зависит от программы выпуска изделий, особенностей конструкции, требований к качеству.



## Технологический процесс пайки состоит из следующих операций:

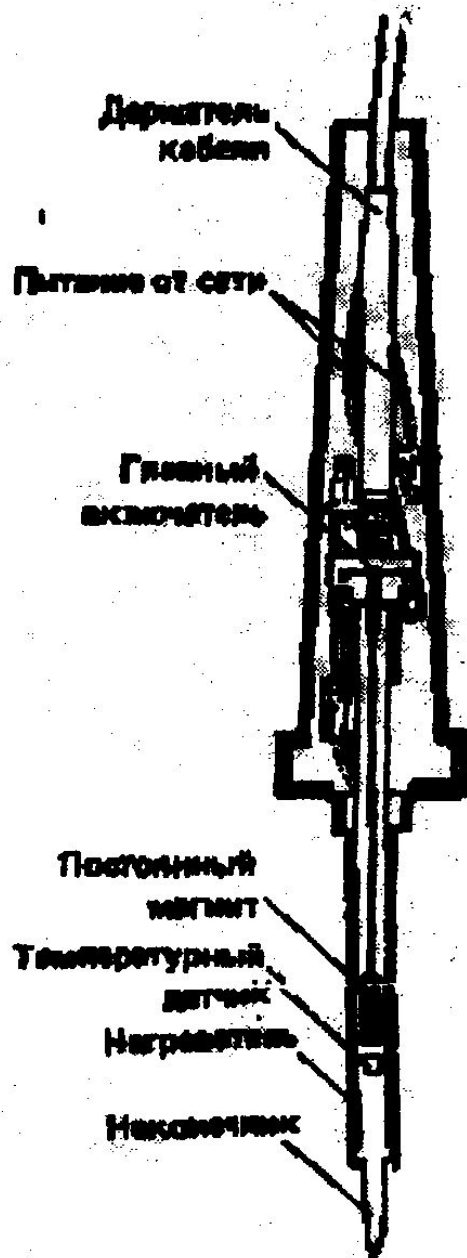
1. Фиксации соединительных элементов с предварительно подготовленными к пайке поверхностями;
2. Нанесение дозированного количества флюса и припоя;
3. Нагрев деталей до заданной температуры и выдержка в течение ограниченного времени;
4. Охлаждение соединения без перемещения паяемых поверхностей;
5. Очистка соединений;
6. Контроль качества.

## *Индивидуальная пайка паяльником.*

- Требуемый температурный режим при индивидуальной пайке обеспечивается теплофизическими характеристиками применяемого паяльника:
  - температурой рабочего конца жала;
  - степенью стабильности этой температуры, обусловленной динамикой теплового баланса между теплопоглощением при пайке, теплоподводом и теплозапасом в паяльном жале;
  - мощностью нагревателя и термическим КПД паяльника, определяющими интенсивность теплового потока в паяемые соединения и необходимую температуру пайки.

- **Температура рабочего конца жала**, измеряемая на холостом ходу, задается на  $30...100^{\circ}\text{C}$  выше точки ликвидуса припоя.
- Номинальное значение температуры определяется термической чувствительностью элементов.
- В процессе пайки температура жала паяльника снижается за счет теплоотдачи, что при малой мощности нагревателя ограничивает число последовательно выполняемых соединений, чтобы не выйти за нижнюю границу тепловой зоны.
- Рекомендуемые мощности паяльников для пайки микросхем 4, 6, 12, 18 Вт, для печатного монтажа 25, 30, 35, 40, 50, 60 Вт, при проводном (жгутовом) монтаже 50, 60, 75, 90, 100, 120 Вт. Выбор мощности паяльников с учетом КПД (25 ... 55%) производится в соответствии со средним теплопоглощением при многократной пайке элементов: ИС-1,5 ... 3 кал., ПП-9....10 кал., жгутов- 15 кал.

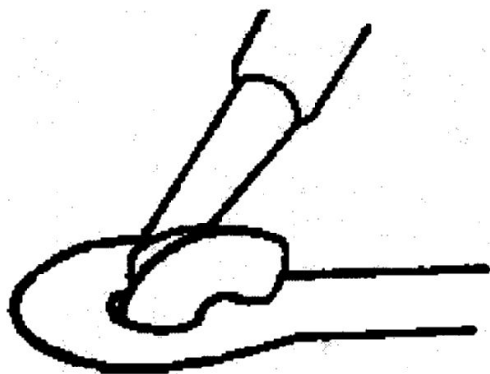
- Стабилизация температуры производится с помощью:
  - массивного паяльного жала (до 3 мм для микропаяльников) и близкого расположения нагревателя;
  - импульсного нагрева, который эффективно восполняет потери тепла в процессе пайки;
  - электронных регуляторов, работающих на основании информации специальных датчиков (термопар);
  - использования для нагревателей материала, изменяющего свое электрическое сопротивление (например, агломерат свинца и бария) или магнитные свойства.



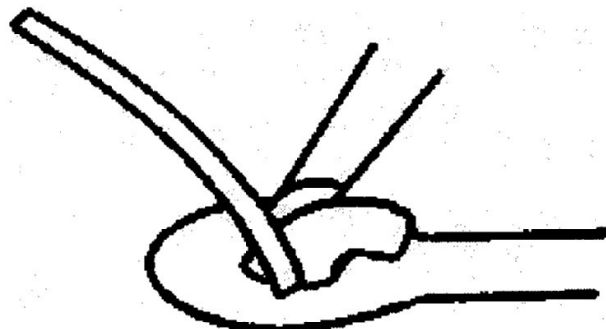
*Миниатюрный  
паяльник с  
термостабилизацией  
(фирма Weller, США)*

- В качестве материала для паяльных жал используют медь ввиду ее высокой теплопроводности.
- Но вследствие химического взаимодействия с расплавленным припоем и флюсом, термоударов, окисления кислородом воздуха и структурных изменений долговечность такого жала составляет 700... 1000 паяек, после чего его перезатачивают.
- Нанесение на жало химического никеля увеличивает период между заточками до 1500 паяек, а гальванический никель толщиной 90...100 мкм - до 2000 паяек.
- В качестве перспективных материалов для паяльных жал рекомендуются медные сплавы МХН1-4, спеченный порошок сплава Си-W, в котором износостойкость и термостойкость вольфрама сочетаются с электропроводностью меди.
- Гарантированная пористость материала улучшает смачивание жала припоем.

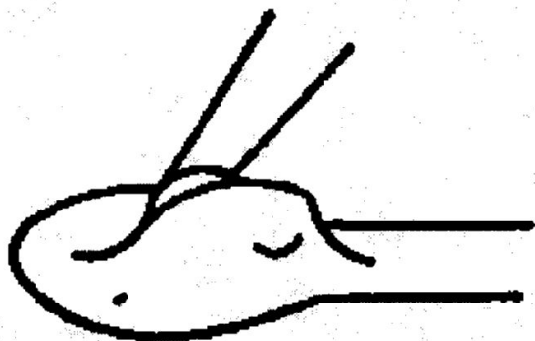
## Последовательность процесса пайки паяльником



а)



б)



в)



г)

**Последовательность процесса пайки паяльником:**

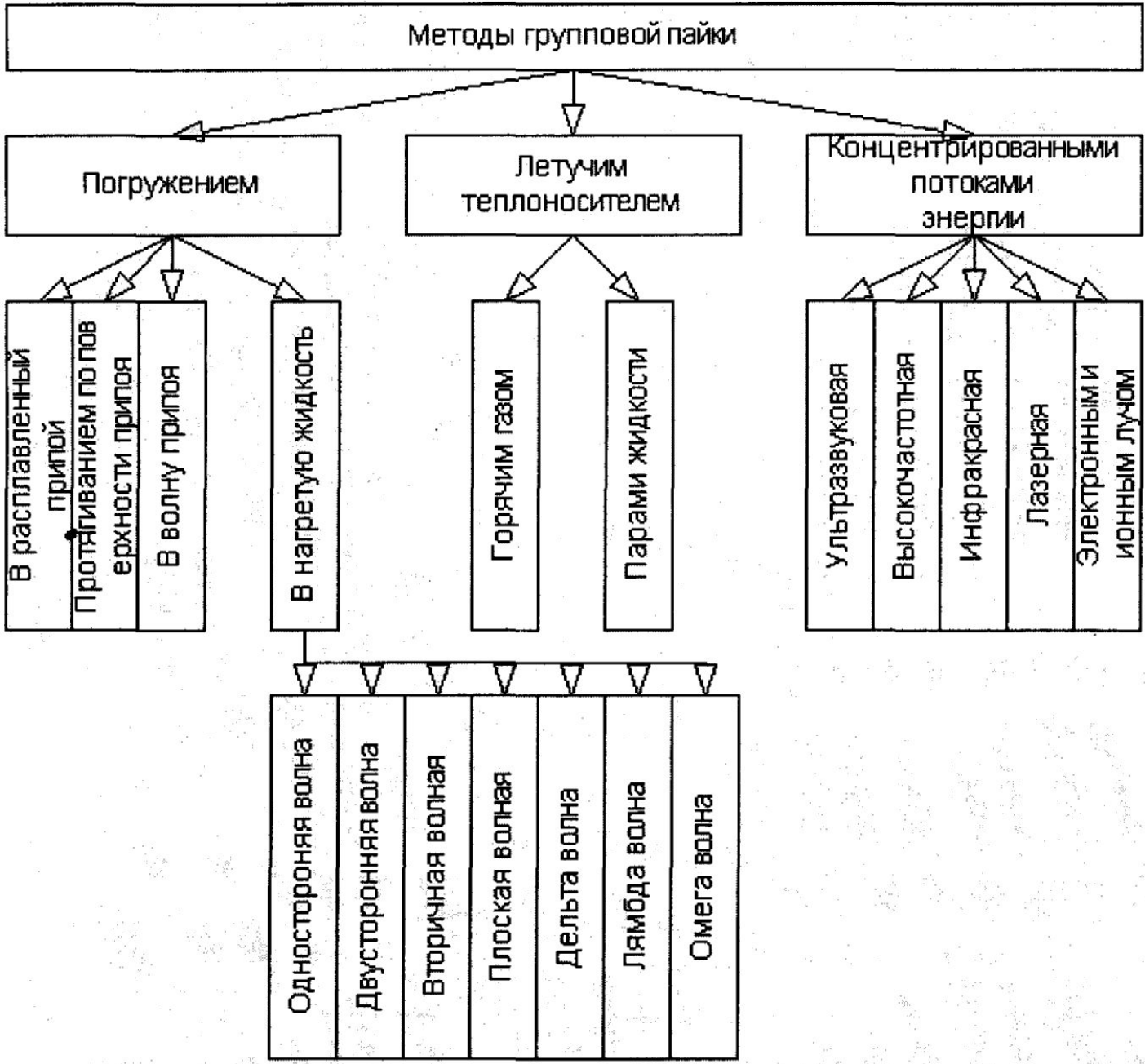
- а) нагрев вывода и контактной площадки;**
- б) введение припоя с флюсом в зону пайки;**
- в) кристаллизация**

- Режимы пайки являются температура, которая для наиболее широко распространенного припоя ПОС-61М составляет  $280 \pm 10^\circ\text{C}$ , и время пайки 1...3 с.
- Пониженная температура приводит к недостаточной жидкотекучести припоя, плохому смачиванию, образованию “холодной пайки”.
- Завышенная температура вызывает обугливание флюса, выгорание компонентов припоя. эрозию материала паяльного жала. детали во время пайки фиксируются скручиванием проводников, размещением элементов в монтажных отверстиях при помощи пинцета или аналогичного инструмента и т. д.
- Для охлаждения элементов во время пайки применяют испарительный метод (нанесение дозы испаряющегося вещества), обдув газом, специальные термоэкраны.
- Заканчивается процесс пайки очисткой соединения от остатков флюса и визуальным контролем качества.



## ***Групповые методы пайки.***

- Современные методы групповой пайки в производстве РЭА классифицируются по источникам тепловой энергии, являющимся главным фактором при формировании паяных соединений. Ниже представлена схема методов групповой пайки.
- Пайка элементов со штыревыми выводами, установленными на ПП, в условиях поточного производства проводится двумя основными методами: **погружением** и **волной припоя**.



Методы групповой пайки

Погружением

- В расплавленный припой
- Протягиванием по поверхности припоя
- В волну припоя

В нагретую жидкость

- Односторонняя волна
- Двусторонняя волна
- Вторичная волная
- Плоская волная
- Дельта волна
- Лямбда волна
- Омега волна

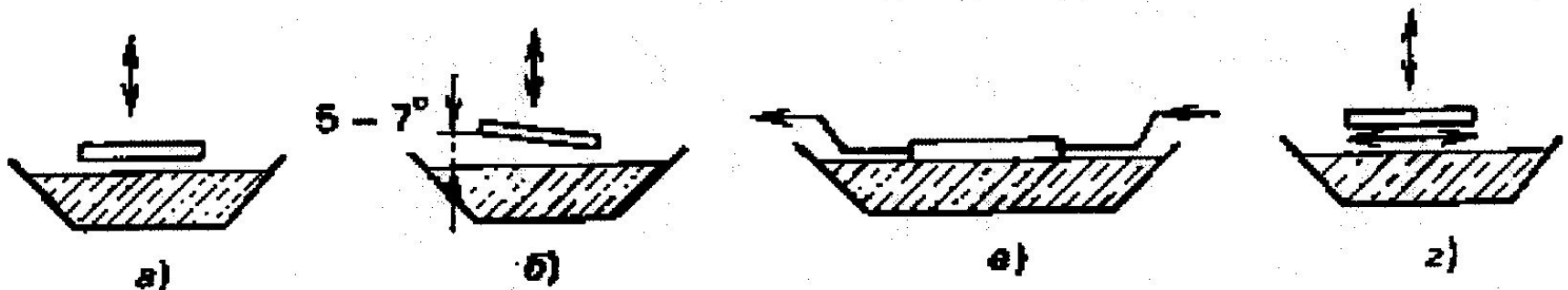
Летучим теплоносителем

- Горячим газом
- Парами жидкости

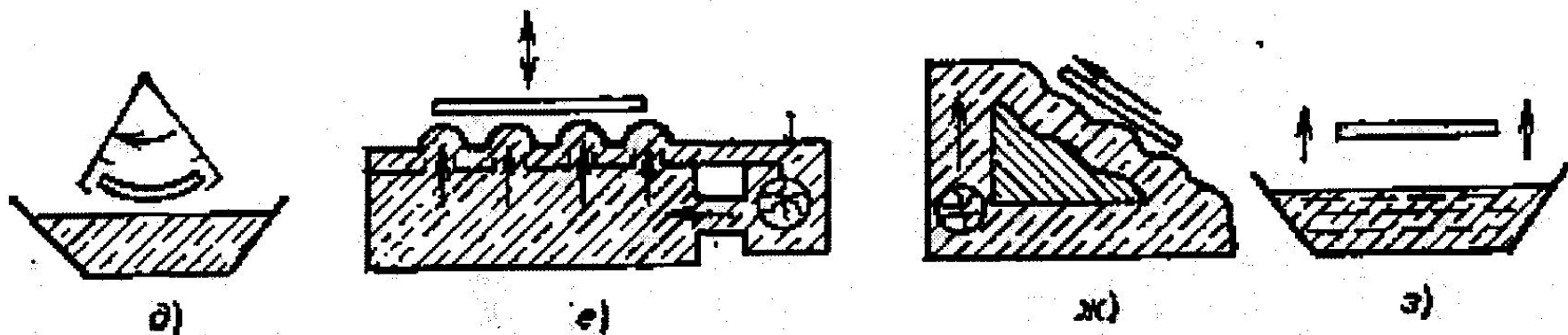
Концентрированными потоками энергии

- Ультразвуковая
- Высокочастотная
- Инфракрасная
- Лазерная
- Электронными и ионным лучом

# Пайка погружением.



*а - с вертикальным перемещением платы; б - с наклоном платы; в - протягиванием; г - с применением колебательных движений;*



*д - с маятниковым движением платы, е - избирательная, ж - каскадная, з - в ванну, заполненную сеткой.*

- При пайке с **вертикальным перемещением платы** ПП со смонтированными элементами на 2...4 с погружается в расплавленный припой на глубину 0,4...0,6 ее толщины, что приводит к капиллярному течению припоя и заполнению им монтажных отверстий (вариант а).
- Одновременное воздействие температуры на всю поверхность платы приводит к ее перегреву и термоудару. Это вызывает повышенное коробление ПП, что ограничивает их максимальный размер 150 мм с соотношением сторон 1:2.
- Чтобы ограничить зону действия припоя, на плату с монтажной стороны наносят специальную защитную маску (бумажную, эпоксидную), в которой предусмотрены отверстия под контактные площадки.

- С этой же целью температуру пайки выбирают более низкой, что также уменьшает потери припоя из-за окисления.
- Продукты окисления скапливаются на поверхности, и перед каждой пайкой их удаляют металлическим скребком.
- Частицы растворителя флюса, попавшие в припой, интенсивно испаряются, что приводит к локальным непропаям. для уменьшения числа непропаянных соединений применяют **пайку погружением с наклоном** ( $5 \dots 7^\circ$ ) платы (вариант б) или **на плату подают механические колебания** частотой  $50 \dots 200$  Гц и амплитудой  $0,5.. 1$  мм (вариант г).

- Наиболее совершенным способом реализации пайки погружением является **пайка протягиванием** (вариант в), при которой ПП укладывается в держатель под углом около  $5^\circ$ , погружается в ванну и протягивается по зеркалу припоя.
- Впереди держателя имеется закрепленный скребок, который очищает поверхность зеркала.
- Создаются благоприятные условия для удаления флюса и излишков припоя. Время пайки протягиванием увеличивается до 10 с.
- **Избирательная пайка** (вариант е) обеспечивает выборочную подачу припоя к паяемым контактам через специальную фильеру, изготовленную из нержавеющей стали. Между платой и фильерой зажимается слой термостойкой резины.

- При избирательной лайке уменьшается температура платы, снижается нагрев радиоэлементов и расход припоя.
- Применяют ее в условиях массового производства, когда изготовление специальной фильеры экономически целесообразно.
- Высокое качество пайки обеспечивает **способ погружения платы в заполненную сеткой** (например, из никеля с размером окон 0,2x0,2 мм) ванну (вариант 3), которая превращается в капиллярный питатель.
- При соприкосновении платы с сеткой припой выдавливается через ее ячейки и под давлением капиллярного эффекта заходит в зазор между выводами и металлизированными отверстиями.
- При обратном движении ванны избыток припоя затягивается капиллярами, сеточного набора, что предотвращает образование сосулек.
- Различие в длине выводов не сказывается на качестве пайки из-за гибкости сетки.

## *Пайка волной припоя*

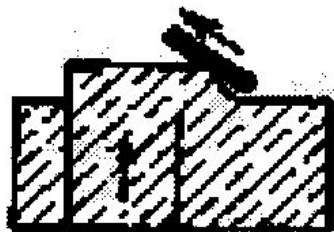
- Пайка волной припоя является самым распространенным методом групповой пайки. Она заключается в том, что плата прямолинейно перемещается через гребень волны припоя.
- Ее преимуществами являются: высокая производительность, возможность создания комплексно-автоматизированного оборудования, ограниченное время взаимодействия припоя с платой, что снижает термоудар, коробление диэлектрика, перегрев элементов. **Главным условием высокой разрешающей способности пайки волной припоя, позволяющей без перемычек, мостиков и сосулек припоя паять платы с малыми зазорами между печатными проводниками, создание тонкого и равномерного слоя припоя на проводниках.**



# При пайке волной припоя применяются различные профили волн.



а)



б)



в)

а - односторонняя;  
б - дельта - волна;  
в - отраженная;



г)

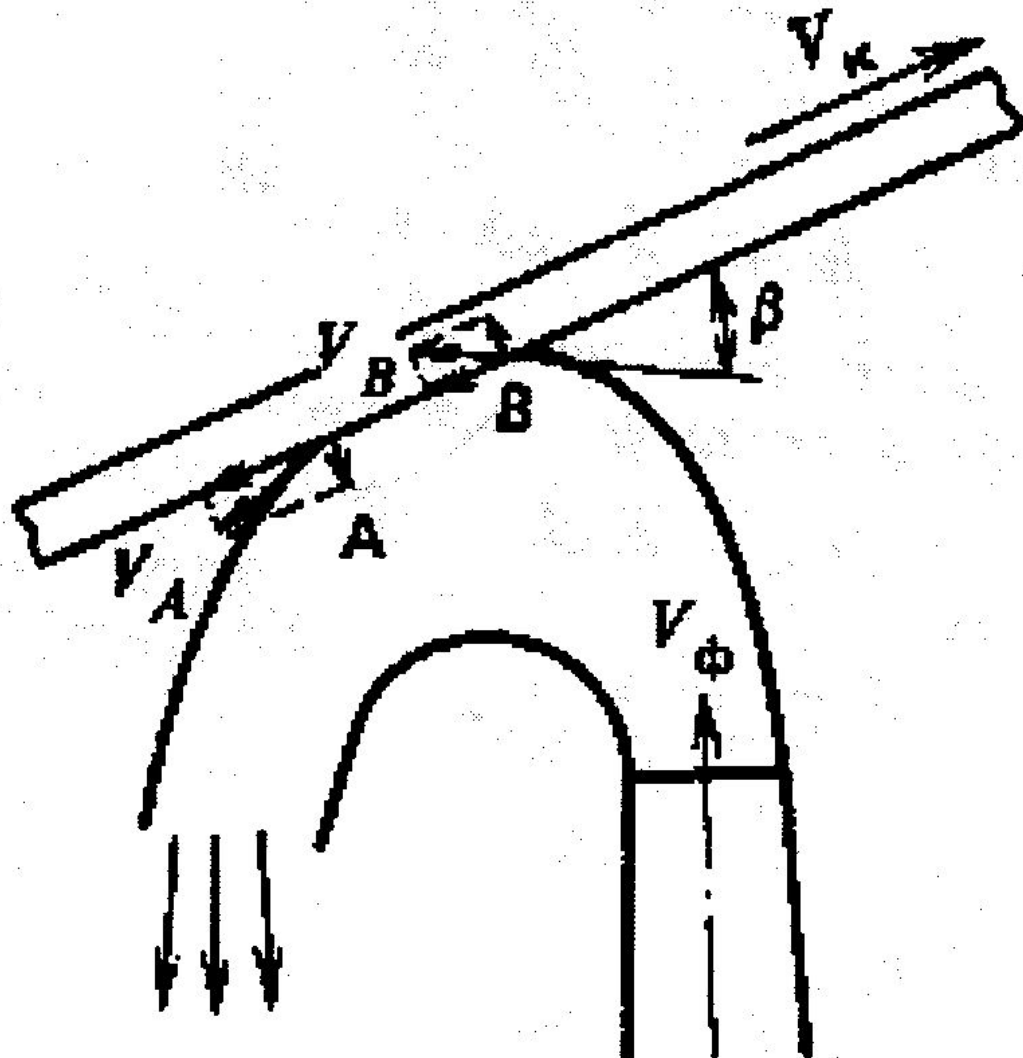


д)



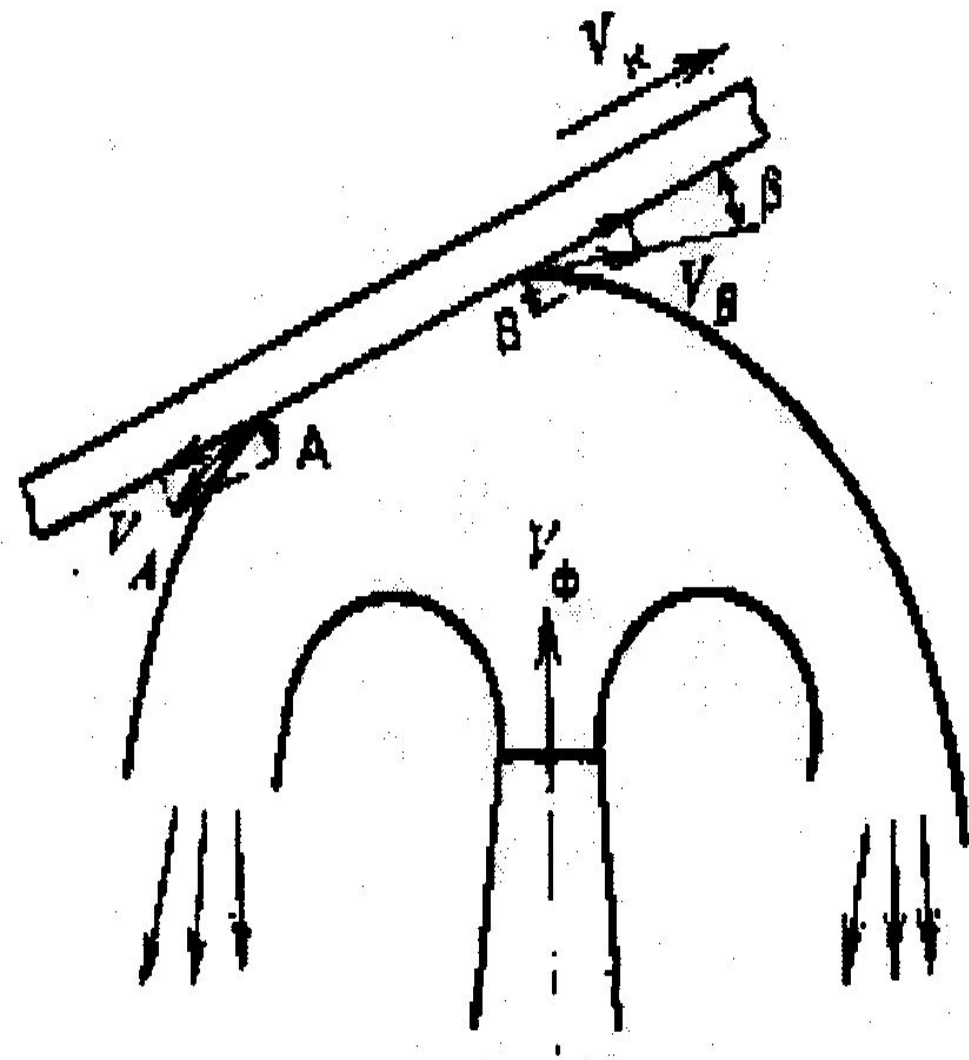
е)

г - плоская;  
д - лямбда-волна;  
е - вторичная.



Процесс пайки состоит из трех этапов: входение в припой (точка **A**), контактирование с припоем (отрезок **AB**) и выход из припоя (точка **B**). На первом этапе направление скорости фонтанирования волны **VA** способствует удалению паров флюса из зоны реакции как при симметричной двусторонней, так и при направленной односторонней параболической волне.

- На втором этапе полоса растекания припоя по плате **AB** в сочетании со скоростью конвейера **VK** определяет время пайки.
- При двусторонней волне это время больше за счет достижения более полного заполнения припоем металлизированных отверстий. Увеличение времени взаимодействия, однако, повышает толщину припоя на печатных проводниках до некоторого предела.
- Окончательное формирование толщины слоя происходит на выходе платы из волны припоя в точке **B**.
- При этом в односторонней волне предельная составляющая скорости фонтанирования **VB** вычитается из скорости конвейера, смывает излишки припоя и утоньшает оставшийся слой припоя.



В двусторонней волне скорость  $V_B$  складывается со скоростью конвейера  $V_K$  и способствует образованию наплывов.

Таким образом, в двусторонней волне необходимо стремиться к повышению угла наклона, увеличению крутизны волны и уменьшению скорости истечения припоя  $V_\Phi$ .

- При односторонней волне более благоприятными являются горизонтальное положение конвейера, пологая форма и возможно большая скорость циркуляции припоя.
- Глубина “ныряния” обычно составляет 0,6 ... 0,8 толщины платы, но может достигать 1,5 ... 2 толщины с носовым козырьком в передней части кассеты.
- Для образования волны припоя в установках преимущественно используют механические нагнетатели, давление воздуха или газа, ультразвуковые колебания и электромагнитные нагнетатели.

## ***Дельта-волна***

- Дельта-волна характеризуется стоком припоя в одну сторону, для чего одна стенка сопла выполнена удлиненной.
- Это уменьшает окисление припоя, однако делает чувствительным изменение высоты волны от напора нагнетателя припоя. Более целесообразна в этом отношении “отраженная” волна.
- Здесь за счет применения наклонного отражателя с одной стороны сопла обеспечивается удержание большего количества припоя, чем при дельта-волне, а его сток регулируется изменением угла наклона отражателя и зазором между соплом и отражателем.

- Поскольку увеличение ширины волны в направлении движения платы дает положительный эффект, то применяют плоскую, или широкую волну протяженностью до 70 ... 90 мм.
- Подобная конфигурация волны позволяет добиться получения качественных соединений при меньшей температуре припоя, чем при пайке с волной параболической формы.
- Такое конструктивное решение использовано в установке пайки фирмы Hollis (США). Это позволило увеличить скорость пайки с 0,6 ... 1,2 до 3 м/мин по сравнению с пайкой волной параболической формы.
- Иногда вместо плоской волны используют вторичную волну несколько меньшей высоты для оплавления образующихся сосулек.
- Температура во вторичной волне меньше, чем в основной. Однако увеличение открытой поверхности расплава способствует образованию оксидных пленок в нем.

## *Лямбда-волна*

- Лямбда-волна получается при использовании насадки сложной формы.
- Форма волны и ее динамика позволяют получить на входе платы в припой ускоренный поток припоя, обладающий хорошим смачивающим действием.
- В зоне выхода достигается нулевая относительная скорость платы и припоя, а постепенное увеличение угла между платой и поверхностью припоя исключает образование наплывов и сосулек.
- Такая форма волны позволяет вести качественную пайку многослойных плат с плотным монтажом.




- Концепция лямбда-волны предложена фирмой Elektrovert (Канада).
- На базе лямбда-волны указанной фирмой получена вибрирующая волна припоя - омега-волна за счет размещения вибрирующего элемента в окне сопла, через которое подается припой.
- Вибрация элемента создается с помощью электромагнитного преобразователя, работающего на промышленной частоте с изменяемой амплитудой до 3 мм.
- Омега-волна при скорости конвейера 1,2 м/мин обеспечивает заполнение металлизированных отверстий ПП на уровне 99%.

## *Перспективные методы*

- В настоящее время широкое применение в технологии РЭА получают методы пайки концентрированными потоками энергии, достоинством которых являются высокая интенсивность, бесконтактное воздействие источника нагрева на зону контактирования, ограниченная зона теплового воздействия.
- Разработанные методы активируют не только систему «припой-паяемый материал», но и процессы их физико-химического взаимодействия, что приводит к интенсификации процессов пайки.
- Пайку элементов с планарными выводами проводят следующими методами: нагретым У-образным инструментом, горячим газом, в парах специальной жидкости, ИК-излучением, токами высокой частоты, лазерным излучением и др.

# *Физико-химические основы сварки*

- Процесс образования сварного соединения можно условно разделить на четыре стадии:
  1. Образование физического контакта между поверхностями материалов.
  2. Активация контактных поверхностей.
  3. Объемное развитие взаимодействия.
  4. Кристаллизация.
- **На первой** стадии сближаются материалы на расстояние порядка 10 ... 100 нм, при котором между частицами начинает проявляться физическое взаимодействие, обусловленное силами Ван-дер-Ваальса.

- 
- Под действием этих сил в жидких фазах происходят дальнейшее самопроизвольное уменьшение расстояний между атомами и их поляризация на фазовых границах раздела с изменением орбит части внешних электронов, которые приводят к снижению потенциальной энергии атомов.
  - При некоторой критической величине начинается перекрытие стабильных электронных оболочек и появляются силы отталкивания. достижение минимума потенциальной энергии соответствует физической адсорбции и завершает первую стадию образования соединения.

- При твердофазной сварке, вследствие шероховатости реальных поверхностей, физическое взаимодействие протекает не по всей площади, а только в местах контакта микровыступов с наибольшей суммой высот.
- В процессе последующего пластического деформирования этих выступов в контакт будут вступать новые выступы, обладающие меньшей суммой высот.
- В начальный момент процесс формирования контакта двух поверхностей сопровождается ростом числа единичных пятен касания и схватывания, площадь каждого при этом увеличивается незначительно.

- **На второй стадии** происходит образование на поверхности более твердого из соединяемых материалов центров, активных в химическом отношении.
- Активный центр упрощенно - это частицы со свободными валентностями, которые могут возникнуть при разрыве связей в кристалле, в местах образования дефектов. для активирования поверхностей вводится дополнительная энергия: тепловая, деформации, ультразвуковая.
- При сварке плавлением цепная реакция растекания с выделением энергии поверхностного натяжения увеличивает площадь контакта вокруг каждой точки взаимодействия.

- Отдельные контактные пятна начинают сливаться в более крупные очаги схватывания, происходит коллективизация валентных электронов, которая приводит к образованию металлической связи между контактирующими поверхностями.
- Активирование с помощью энергии деформации приводит к тому, что все большая часть сопрягаемых поверхностей в зоне контакта включается в соприкосновение друг с другом, очищается от оксидных и адсорбционных пленок.
- Одновременно происходит размножение и выход дислокаций на контактную поверхность, а также химическое взаимодействие с образованием прочных связей.

- При воздействии УЗ-колебаний наблюдается упрочнение поверхностных слоев в зоне сварки, что приводит к деформированию более глубоких слоев твердого тела с одновременным интенсивным тепловыделением, вызванного трением сжатых контактирующих поверхностей.
- В результате осуществляется релаксация напряжений вблизи поверхностных слоев, вовлечение в деформацию все больших объемов металла, разрастание мостиков схватывания.
- С момента образования на контактных поверхностях активных центров наступает третья стадия, при которой развивается взаимодействие соединяемых материалов как в плоскости, так и в объеме зоны контакта.



- В плоскости контакта оно заканчивается слиянием очагов взаимодействия, что является необходимым условием возникновения прочных химических связей между материалами.
- Но оно может оказаться недостаточным для получения прочного сварного соединения, так как к моменту слияния очагов взаимодействия не произойдет релаксации напряжений.
- Увеличение времени сварки приводит к развитию гетеродиффузии, которая может упрочнить соединение при образовании твердых растворов замещения или разупрочнить при образовании хрупких интерметаллидных фаз.
- Характерной особенностью **кристаллизации** сварного соединения является образование зональной структуры, состоящей из ядра, переходной зоны и неизменяемой зоны основы.

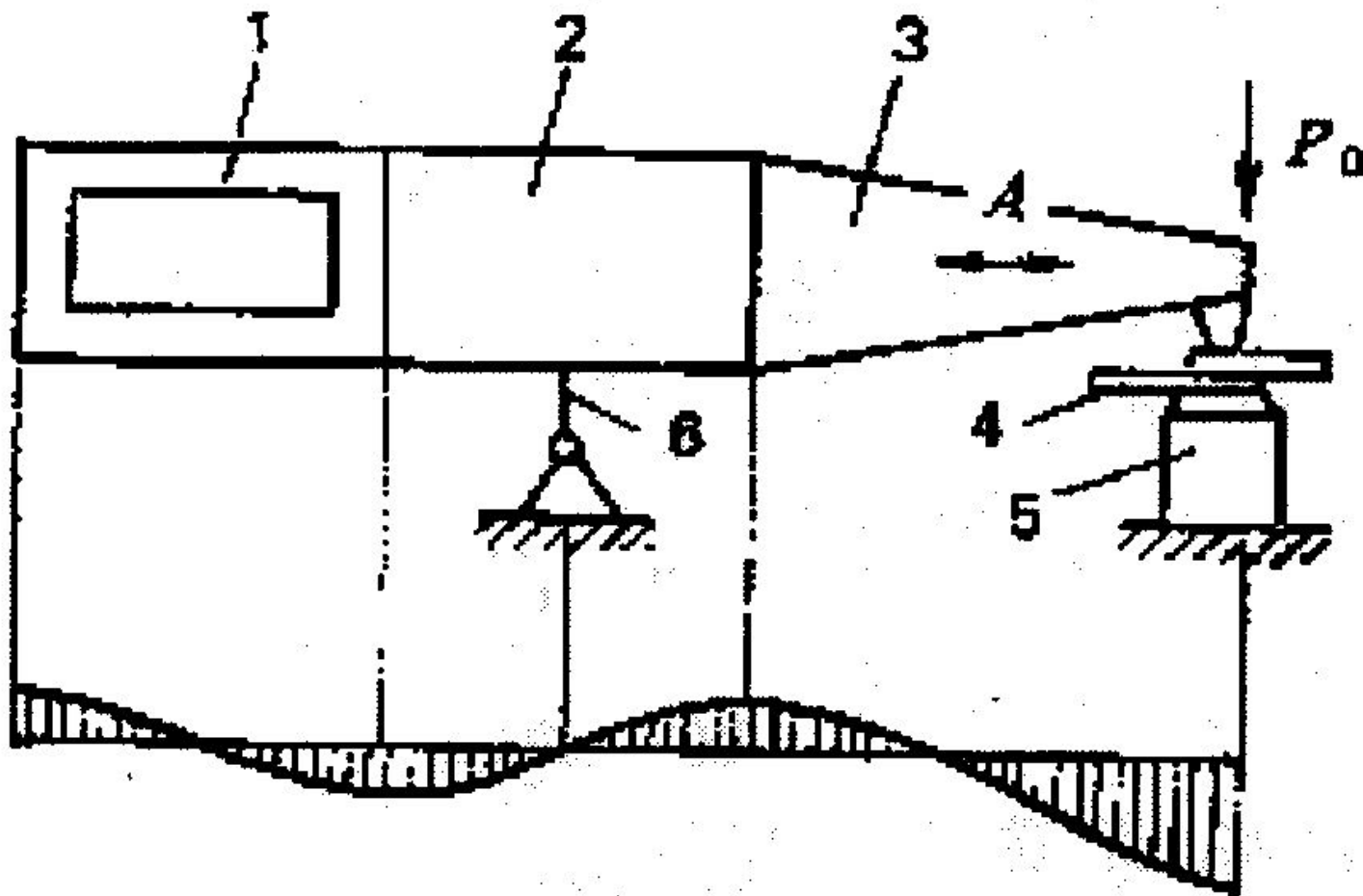
- Ядро при сварке плавлением представляет закристаллизовавшуюся жидкую фазу, которая может состоять из гомогенных кристаллов, твердого раствора замещения или внедрения, интерметаллидов, механической смеси кристаллов и примесей.
- Структура ядра определяет качество и надежность соединения.
- Поэтому при контактировании необходимо стремиться к идеальному гомогенному кристаллическому переходу путем подбора материалов с одинаковыми физико-механическими свойствами, строением кристаллической решетки и электронной структуры или таких, для которых выполняется условие образования твердых растворов в широком диапазоне концентраций.
- В переходной зоне, которая в зависимости от метода сварки колеблется в широких пределах, происходит диффузионное легирование основы, ее рекристаллизация.

# **Методы выполнения сварных монтажных соединений**

*(ультразвуковая сварка - термокомпрессионная сварка - сварка сдвоенным электродом - сварка взрывом)*

- Ультразвуковая сварка выполняется за счет возбуждения в свариваемых деталях упругих колебаний УЗ-частоты при одновременном создании определенного давления.
- Схема ультразвуковой колебательной системы приведена на рисунке.

# Схема ультразвуковой колебательной системы



1 - преобразователь; 2- волновод; 3- концентратор; 4 - свариваемые детали; 5- УЗ-опора-отражатель; 6 - акустическая развязка

- Для УЗ-микросварки используют оборудование с частотами 22, 44, 66, 88 кГц.
- При УЗ-сварке температура нагрева непосредственно в зоне контакта не превышает 30...50% от температуры плавления соединяемых материалов, что позволяет использовать этот метод для соединения чувствительных к нагреву материалов.
- Прочность сварного соединения в основном определяется амплитудой колебаний на рабочем торце инструмента и давлением, приложенным к соединяемым деталям.
- При малой амплитуде в плоскости контакта происходит замедленное образование активных центров соединения.

- Чрезмерное увеличение амплитуды увеличивает напряжения среза, приводящие к разрушению части узлов схватывания.
- Экстремальный характер имеет зависимость прочности сварного соединения от давления: его занижение замедляет пластическую деформацию в контактной зоне соединения и снижает плотность дислокаций, необходимых для активирования поверхности.
- Завышение давления увеличивает трение и снижает амплитуду колебаний рабочего торца инструмента. Оптимальное значение давления колеблется от 0,5 до 20 Н/мм<sup>2</sup>.
- Повышение частоты колебаний инструмента в некоторых случаях ускоряет процесс соединения.

- Время сварки, подбирается экспериментально с целью получения максимальной прочности соединения.
- Основным элементом установок УЗ-сварки является инструмент, форма и размер рабочей части которого имеют важное значение для получения качественных соединений.
- Распространенной конструкцией является стержень с конической частью, размеры торца которого выбираются в зависимости от диаметра привариваемого проводника ( **$d_{\text{гор}}=3...4d_{\text{пр}}$** ).
- В ряде случаев на торце инструмента делают поперечные и продольные канавки, которые обеспечивают эффективную передачу УЗ-колебаний и обжатие выводов.

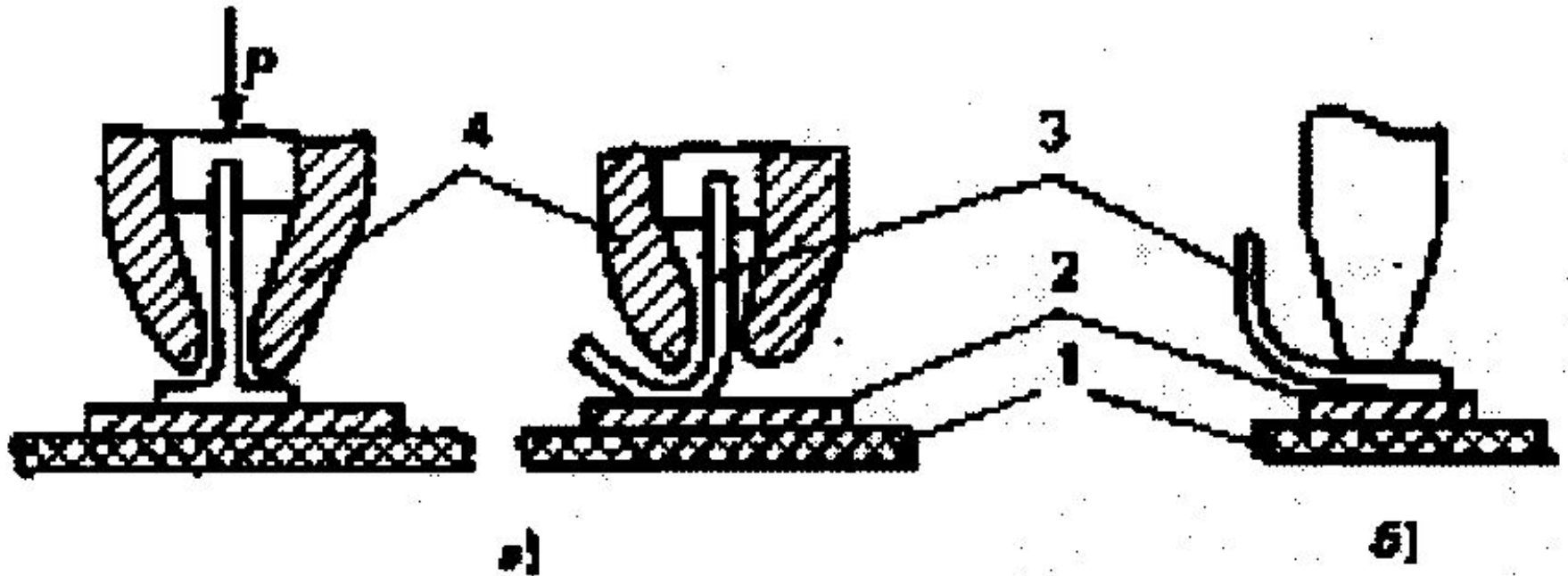
- Материал инструмента для УЗ-сварки должен обладать:
  - высокой износостойкостью,
  - иметь незначительные акустические потери,
  - малую склонность к адгезии с привариваемым материалом,
  - высокую прочность,
  - хорошую обрабатываемость.
- Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют твердые сплавы на основе **карбида вольфрама**. Инструмент из этого сплава выдерживает до 50000 сварок.
- Значительное повышение стойкости достигается химико-термической обработкой инструмента. Насыщение рабочей поверхности марганцем увеличивает стойкость инструмента в 2 раза, а нанесение покрытия из титана - в 3 - 4 раза.




# ***Термокомпрессионная сварка***

- Термокомпрессионная сварка - это сварка, которая проводится при невысоких давлениях с подогревом соединяемых деталей.
- **Достоинства:** стабильность сварочного инструмента и его высокая стойкость, малая чувствительность к изменению режима, простота контроля основных параметров процесса.
- **Недостатки:** ограниченное число сочетаний свариваемых материалов (только пластичные), необходимость весьма тщательной подготовки соединяемых деталей.

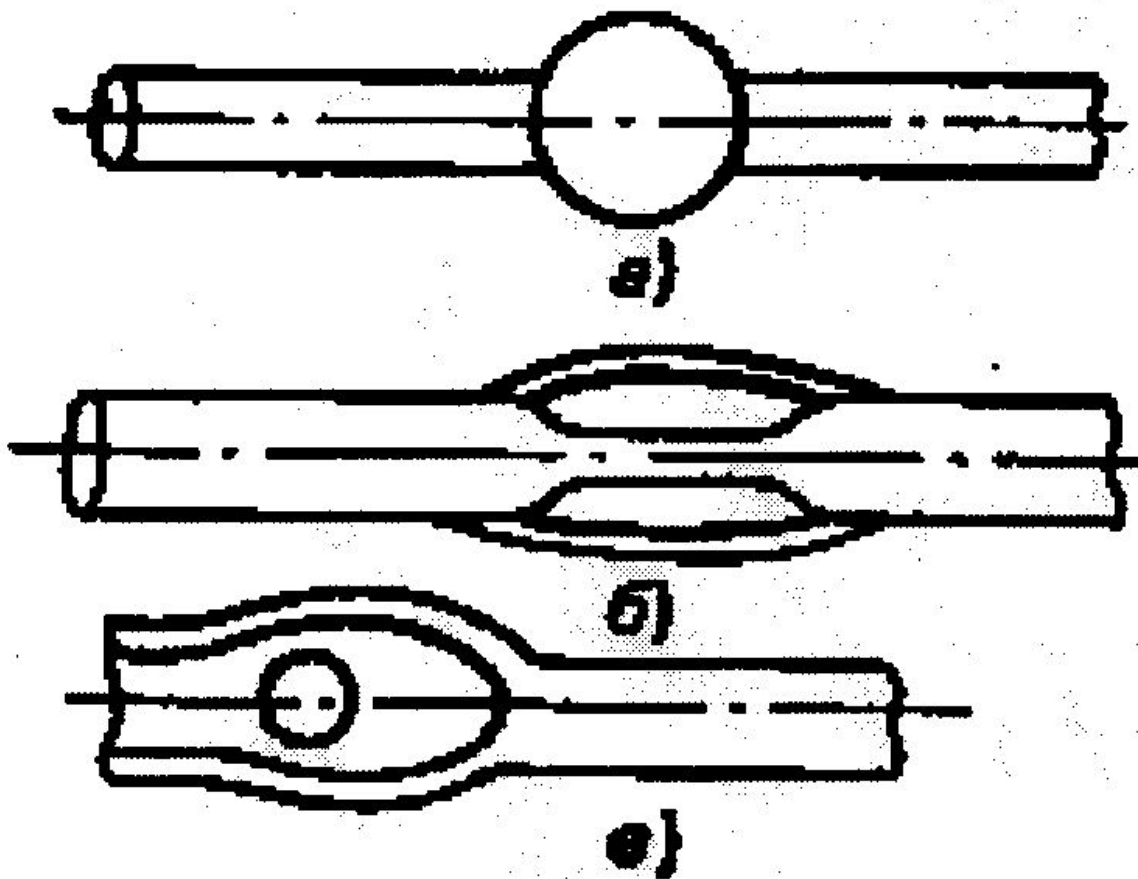
# Схема термокомпрессионной сварки



*а — сварка капилляром; б — сверка клином;  
1 — печатная плата; 2 — контактная площадка;  
3 — микропровода; 4 — рабочий инструмент*

- 
- При приложении температуры и давления в момент осадки в результате течения пластичного металла вдоль поверхности другого металла происходит очистка места соединения от оксидных плёнок, сближение поверхностей и образование между ними плотного контакта.
  - После сварки за счет развития процесса диффузии между свариваемыми материалами полученное соединение упрочняется.

# Типы термокомпрессионных соединений



а—обычное; б—ребром жесткости; в— «типа рыбий глаз»

- По способу соединения термокомпрессия выполняется «внахлестку» и «встык».
- Тип образующегося соединения определяется формой инструмента, среди которых основными являются: капилляр (а) и клин (б,в). Наиболее высокая прочность обеспечивается при использовании соединений с ребром жесткости или типа «рыбий глаз», но для этого требуется сложная форма инструмента.
- Основными параметрами режима термокомпрессии являются усилие сжатия  $P$ , температура нагрева инструмента или соединения  $T$ , длительность выдержки под давлением  $t$ .

- Выбор давления определяется допустимой деформацией присоединяемого проводника или максимально допустимым давлением на присоединяемую деталь. деформация для золотой проволоки составляет 50...70%, для алюминиевой - 60 ... 80%.
- Температура нагрева не должна превышать температуру образования эвтектики соединяемых материалов и колеблется для различных материалов от 250 до 450 °С.
- Длительность выдержки устанавливается в зависимости от сочетания свариваемых материалов и определяется экспериментально путем оценки прочности соединений.

- 
- Весьма важным фактором при термокомпрессионной сварке является правильный выбор материала инструмента.
  - Он должен иметь низкую теплопроводность, высокую прочность при периодических колебаниях температуры, высокую стойкость против окисления и износа, низкую склонность к схватыванию со свариваемыми материалами.
  - Больше других перечисленным требованиям удовлетворяет инструмент, изготовленный из твердых сплавов (карбиды вольфрама и титана) и керамики (оксид бериллия, алюмокерамика).

- Термокомпрессионная сварка применяется для присоединения выводов к полупроводниковым кристаллам, сварки микропроводов и проволок между собой, приварки жил плоского кабеля к выводам соединителя и др.
- ( $T=250...450^{\circ}\text{C}$ ,  $P=40...100\text{ МПа}$ ,  $t=1 \dots 10\text{с}$ ).
- **Сварка давлением с косвенным нагревом** в отличие от термокомпрессии проводится инструментом, который импульсно нагревается проходящим по нему током.
- Вследствие кратковременности процесса нагрева металлический проводник в месте контакта нагревается до более высоких температур, чем при термокомпрессии.
- Это позволяет приваривать проводники из относительно малопластичных металлов к тонким пленкам на керамических подложках.

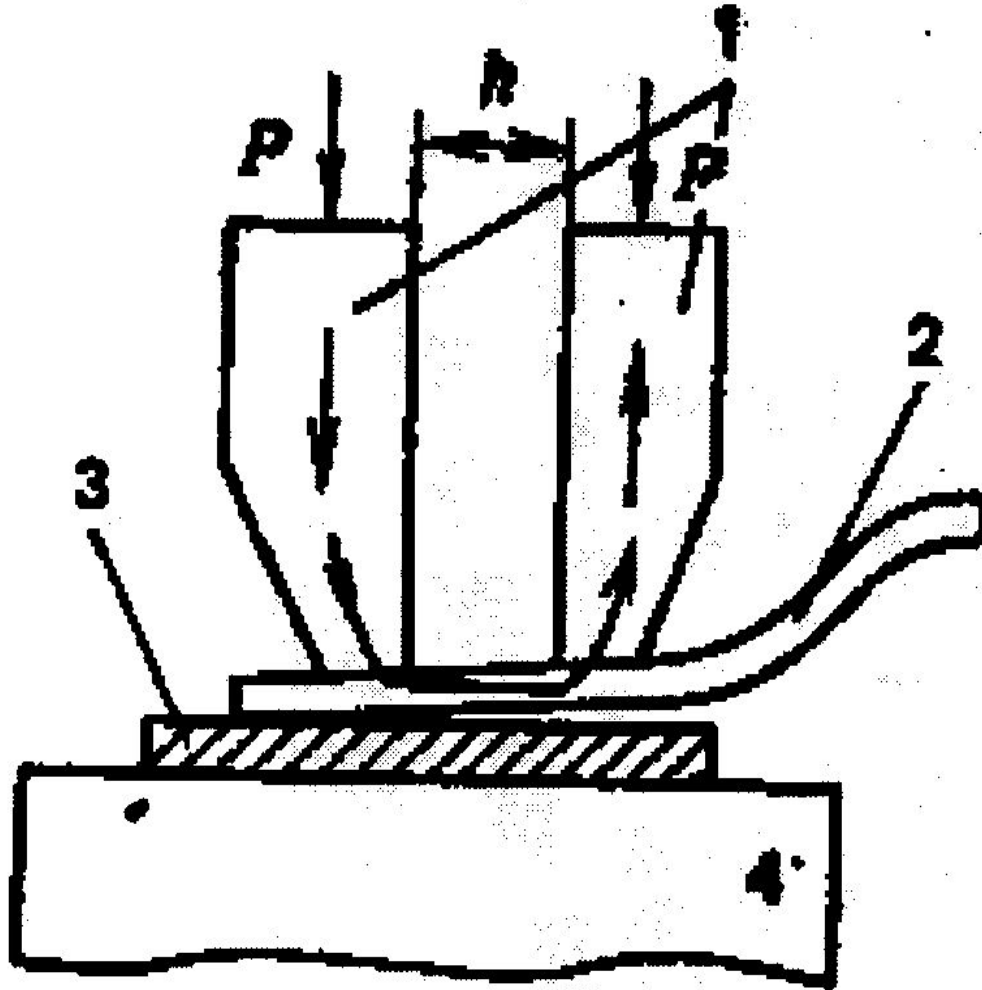


- Высокая точность поддержания температуры и малая инерционность обеспечиваются при нагреве инструмента током с частотой следования импульсов 0,5 ... 1,5 кГц.
- Данный метод применяется при монтаже навесных элементов, имеющих гибкие выводы ( $T = 300 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 80 \dots 200 \text{ МПа}$ ,  $t = 0,1 \dots 0,5 \text{ с}$ ).
- Сочетание термокомпрессии с косвенным импульсным нагревом и наложения УЗ-колебаний позволяют в 1,5- 2 раза снизить усилие сжатия деталей (15 ... 50 МПа) и увеличить прочность соединения.

# ***Сварка сдвоенным электродом***

- Сварка расщеплением (сдвоенным) электродом применяется в технологии электрического монтажа, в частности при получении контактных соединений планарных выводов ИС и ЭРЭ с контактными площадками плат, жестких ленточных проводов с выводами печатных соединителей и др.
- Свариваемыми материалами являются медь, серебро, золото, алюминий, никель толщина их составляет 0,03 ... 0,5 мм.

# Схема сварки сдвоенным электродом



1— электрод; 2— провод; 3 — контактная площадка; 4— основание

- Подготовка свариваемых поверхностей заключается в предварительном отжиге материалов для снятия внутренних напряжений и увеличения пластичности, в обезжиривании поверхностей химическими растворителями.
- Сварку осуществляют инструментом - электродом, изготовленным из вольфрама или молибдена в виде двух токопроводящих частей, разделенных зазором 0,02 - 0,25 мм в зависимости от толщины или диаметра привариваемых выводов. Для повышения жесткости инструмента между электродами устанавливают диэлектрическую прокладку.
- Зазор между электродами оказывает значительное влияние на глубину проникновения тока и на термическую нагрузку печатного проводника в месте соединения с диэлектриком.

- Сварку проводят одним или несколькими импульсами конденсаторного разряда с регулировкой длительности, мощности и интервалов между импульсами.
- Это обеспечивает предварительный нагрев зоны сварки без резкого подъема температур в начале сварочного цикла и отжиг материалов.
- Усилие прижима электродов при сварке (0,2...1,5 Н) создается в момент нагрева до максимальной температуры и снимается до окончания действия импульса тока.
- Качество сварки сдвоенным электродом определяется сочетанием температур плавления соединяемых металлов, соотношением размеров выводов и толщины печатных проводников, термостойкостью платы.

■ Медные печатные проводники вследствие высокой тепло- и электропроводности плохо свариваются, поэтому их предварительно покрывают электролитическим способом слоем никеля или золота.

■ Сварку сдвоенным электродом осуществляют на установках типа «Контакт-3А» (производительность 250 сварок в час), ЭМ-425А, ЭМ-440, 441 (800 ... 2300 сварок в час) при длительности сварочного импульса 0,02...0,8с. При этом ИС и ПП получают незначительную термическую нагрузку.


■ Недостатками рассмотренного метода являются необходимость никелирования плат и золочение выводов ИС, точное позиционирование выводов, трудность группового контактирования, более высокая стоимость по сравнению с пайкой.



## ***Сварка взрывом***

- Как показывает анализ, большинство методов сварки обеспечивает индивидуальное выполнение каждого соединения, что сказывается на их производительности.
- Интересное решение при создании групповых методов представляет подсоединение выводов *сваркой взрывом*.
- При этом можно выделить два основных процесса: локальное нанесение взрывчатого вещества (ВВ) на выводы и непосредственно сварка.
- Нанесение ВВ осуществляется методом сеткографии через металлические или шелковые сетки.

- Паста, содержащая ВВ, обладает хорошей текучестью и адгезией к поверхности вывода.
- Заряды на поверхности выводов формируют из первичных инициирующих ВВ, имеющих очень малые критические диаметры заряда и чувствительных к температуре или лучистому излучению.
- В качестве ВВ можно использовать азид свинца, азид серебра и др. При взрыве скорость пластины (вывода), ускоренная детонационной волной, зависит от конструктивных размеров, плотности ВВ, металла, толщины слоя ВВ и составляет примерно 2000 ... 5500 м/с.
- В месте соударения сварка может происходить и в твердой фазе, и с образованием слоя расплава между соединяемыми металлами либо с образованием локальных зон расплава.



- 
- Присоединению выводов сваркой взрывом присущи следующие достоинства:
  - возможность сваривать трудносоединяемые материалы,
  - прочность соединений не ниже прочности основных материалов, так как сварка может быть проведена ниже температуры плавления,
  - локализованное действие сил взрыва исключает воздействие на окружающие участки соединяемых материалов,
  - несложное технологическое оборудование.



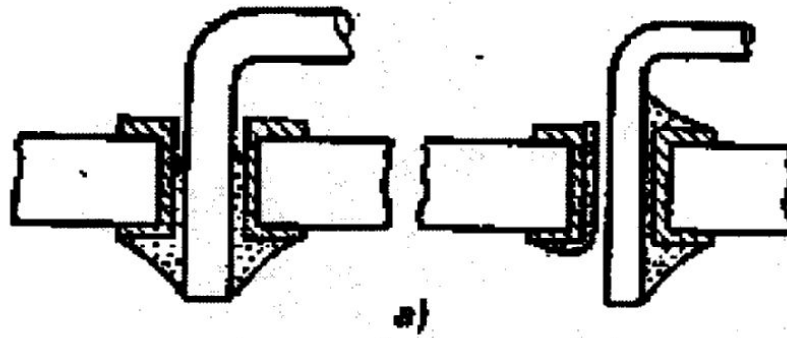
- Однако методу присущи существенные недостатки:

- требуется особая осторожность в обращении с ВВ,
- предъявляются специфические требования к помещениям, оборудованию, материалам, непосредственно контактирующим с ВВ,
- необходима точная дозировка ВВ,
- специальная подготовка операторов.

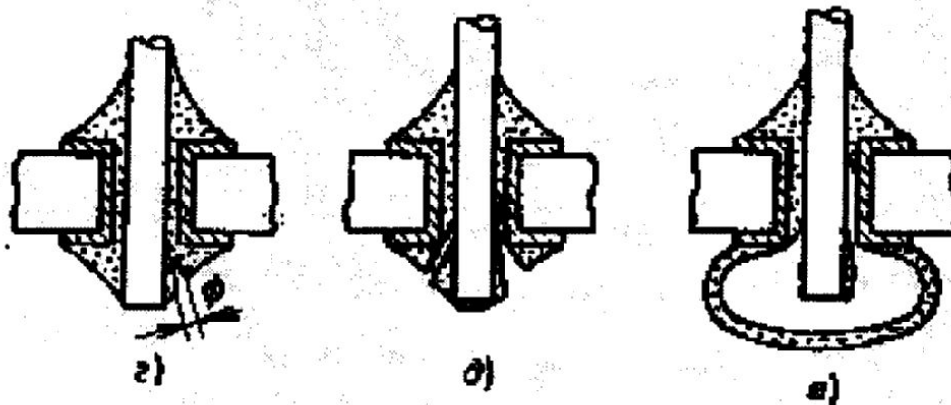
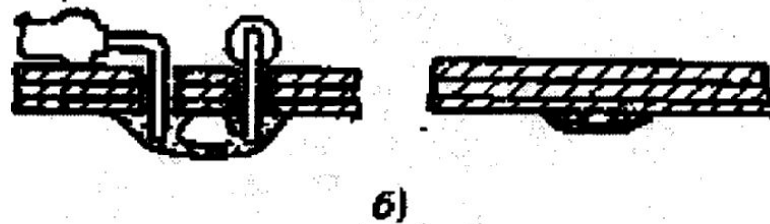
## ***Контроль качества и надежность монтажных соединений***

- Контроль при выполнении монтажных соединений включает наблюдение за соответствием ТП требованиям документации, в том числе материалов, режимов, а также оценку качества соединений. Оценка внешнего вида производится в сравнении с эталонными образцами.
- Пайка должна быть гладкой и блестящей с правильно оформленными галтелями, а сварка — с заданной степенью обжатия выводов. Этому виду контроля подвергаются все соединения.
- Визуальным осмотром могут быть выявлены такие дефекты паяных соединений, как непропай, переемычки, сосульки, натеки припоя, холодная пайка, прилипание припоя к поверхности платы, трещины, белый и темный осадки на плате.

# Вид дефектов паяных соединений



а — непропаи;  
б — перемычки;



в — сосульки;  
г — поры;  
д — трещины;  
е — наплывы

■ Непропай чаще всего возникает из-за **несоблюдения соотношения размеров** между диаметром вывода **dв** и отверстием в плате **dотв**:

$$(T-T_{пл})=15...17,$$

*где T—температура припоя в ванне; T<sub>пл</sub> - температура плавления припоя, значения диаметров - мм.*

■ Увеличение температуры припоя увеличивает его теплосодержание и обеспечивает проникновение в более узкие зазоры.

■ Минимальный зазор (**dотв-dв**) для металлизированных отверстий составляет 70 ... 100 мкм, для неметаллизированных - 0,25мм.

- Другой причиной непропаев является **наличие оксидов** в припое и **истощение олова** в ванне.
- Скорость окисления в перекачиваемой ванне в 18 раз выше, чем в спокойной.
- Так как олово имеет большее сродство к кислороду, чем свинец, то оксидный слой обогащается оловом, а ванна обедняется им.
- Поэтому в паяльную ванну должен добавляться припой, обогащенный оловом.
- В системах с волновой пайкой применяются кремнийорганические масла (ТП-22) для подачи на волну с целью восстановления окислов.
- Третьей причиной непропаев является **загрязнение ванны** примесями таких металлов, как цинк, алюминий, кадмий, которые не могут быть устранены коррекцией.

- Эти примеси увеличивают вязкость припоя, замедляют проникновение припоя в зазоры и вызывают непропаи.
- Полная замена припоев в ванне проводится при превышения содержания кадмия более 0,005 %, а цинка и алюминия - 0,001 %. Медь допускается в количестве не более 0,5 %.
- *Белый осадок* на платах может возникнуть из-за **несовместимости флюса и материала ПП.**
- Удаляется он промывкой в подогретой воде с применением щеток.
- Темный осадок является результатом **неправильного использования флюса.**
- Сильный предварительный подогрев плат вызывает потемнение остатков канифольных флюсов.

- Кислотные флюсы при их плохой отмывке вызывают также потемнение на поверхности плат, которые потом невозможно удалить.
- Поэтому нужна тщательная промывка плат сразу же после пайки, иногда с применением веществ, нейтрализующих кислотные флюсы.
- *Сосульки* - типичный дефект при пайке ПП, вызванный чаще всего **низкой температурой припоя** или **недостаточным временем пайки**.
- Их устраняют путем регулировки параметров пайки, изменением угла выхода платы из припоя, применением обдува горячим воздухом («воздушный нож»).




- *Холодная пайка* - дефект, образующийся при **смещении выводов ЭРЭ** при кристаллизации припоя или отсутствии сплавления припоя с поверхностью паяемой детали. Указанный дефект можно исправить вторичной пайкой соединений.
- *Натеки* вызваны **избытком припоя** в местах соединений, что увеличивает расход припоя.
- Целесообразно повысить температуру пайки, увеличить плотность флюса или увеличить угол выхода платы из волны припоя.
- **Оценка структуры** проводится выборочно для образцов-свидетелей.

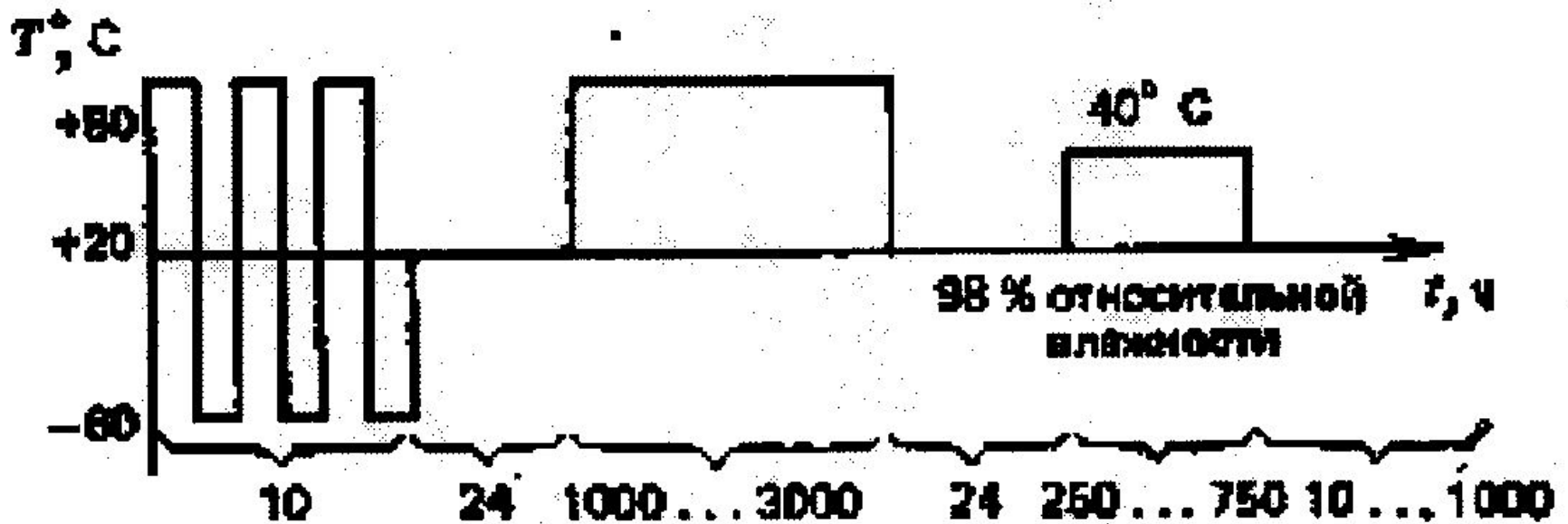
- Качественное соединение не должно иметь трещин, пор и других дефектов; ширина диффузионной зоны рекомендуется в пределах 0,9 ... 1,1 мкм. для оценки соединений используют телевизионно-рентгеновский микроскоп МТР-3 либо металлографическое исследование на микрошлифах.
- **Прочность на отрыв** проверяется при выборочном контроле на образцах-свидетелях с помощью разрывных машин.
- **Переходное сопротивление** контакта измеряют миллиомметром методом вольтметра и амперметра.
- Для различных размеров проводников, соединенных пайкой, переходное сопротивление имеет значение: при диаметре 0,6 мм - 2..3 мкОм, при диаметре 0,14 мм - 4..5 мкОм.

- **Оценка по модуляции электрического сигнала** позволяет выявить до 60 % общего числа дефектов.
- Контролируемая схема подключается к генератору сигналов, настроенному на определенную частоту (например, 2...3 кГц), и через двухкаскадный усилитель к осциллографу или динамику.
- При вибрации или тряске аппаратуры в дефектных соединениях возникает сигнал с частотой, отличающейся от частоты настройки.
- **Оценка по температурному перепаду** является одним из самых перспективных методов для объективного контроля паяных соединений.

- Предварительный нагрев платы может быть различным, но чаще всего используют нагрев электрическим током.
- Контролируемую плату подключают к источнику питания и после установления теплового равновесия ее со стороны соединений сканируют инфракрасным датчиком специального устройства для визуализации и сравнения с температурой аналогичной точки эталонной платы.
- Дефектные соединения имеют температуру на  $1...5^{\circ}$  выше номинальной.
- Контрольная операция легко автоматизируется при применении микропроцессорных систем управления.

- 
- **Даже 100 %-й контроль монтажных соединений может выявить только явные дефекты исполнительского характера, а скрыты дефекты, например микроскопические неоднородности, которые только.**
  - **В процессе эксплуатации развиваются до опасных пределов, принципиально могут быть обнаружены лишь при долговременной работе системы.**

# Временной график испытаний монтажных соединений на надежность



- Анализ сварных соединений показывает, что потенциально более подвержены усталости соединения, выполненные термокомпрессионной сваркой и сваркой сдвоенным электродом, чем соединения, выполненные с помощью лучевых методов и УЗ-микросварки при одинаковых условиях испытания.
- На переходное сопротивление сварного соединения оказывают наибольшее влияние особенности структуры и напряженного состояния шва.
- С этой точки зрения наилучшие результаты получены при УЗ-сварке, исключая образование хрупких интерметаллидов с пониженной электропроводностью (при соединении разнородных металлов).

- Перспективны также лучевые методы, снижающие толщину интерметаллидов.
- Правда, отрицательно влияющее на стабильность переходного сопротивления поле внутренних остаточных напряжений имеет наибольшую протяженность в соединениях, выполненных не только сваркой сдвоенным электродом и термокомпрессионной, но и УЗ-сваркой.
- При планировании производства необходимо исходить из оптимальных значений надежности монтажных соединений: для паяных соединений: интенсивность отказов должны быть не менее  $10^{-9}$ , 1/ч, для сварных –  $10^{-10}$ , 1/ч.



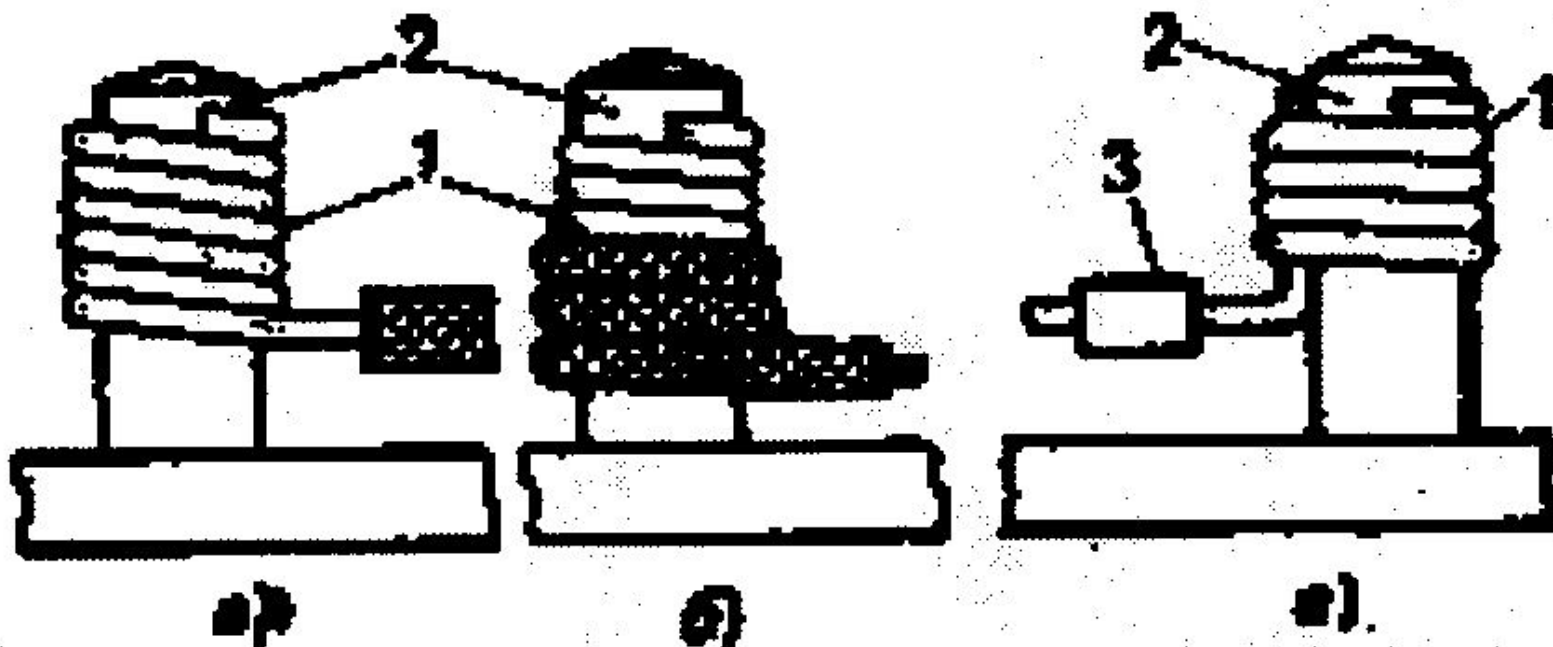
# Надежность монтажных соединений

<b>Метод соединения</b>	<b>Интенсивность отказа, ч<sup>-1</sup></b>	<b>Метод соединения</b>	<b>Интенсивность отказа, ч<sup>-1</sup></b>
Пайка	$2 \cdot 10^{-9}$	Электронно-лучевая сварка	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Сварка сдвоенным электродом	$1,8 \cdot 10^{-9}$	Лазерная сварка	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Термокомпрессионная сварка	$1,3 \cdot 10^{-9}$	Микросварка с помощью ультразвука	$4,5 \cdot 10^{-10}$

# **Электрическое соединение методом накрутки**

- **Накрутка - это процесс создания электрического соединения путем навивки под натягом определенного числа витков одножильного провода на штыревой вывод с острыми кромками.**
- Под действием приложенного усилия происходят разрушение оксидных пленок на соединяемых поверхностях и врезание острых граней вывода в провод.
- Образовавшееся газонепроницаемое соединение удерживается благодаря упругим напряжениям, возникшим в этих элементах.
- Концентрация напряжений в зоне контакта и среднее давление порядка 15 ... 20 МПа обуславливают взаимную диффузию металлов, что способствует повышению надежности соединения.

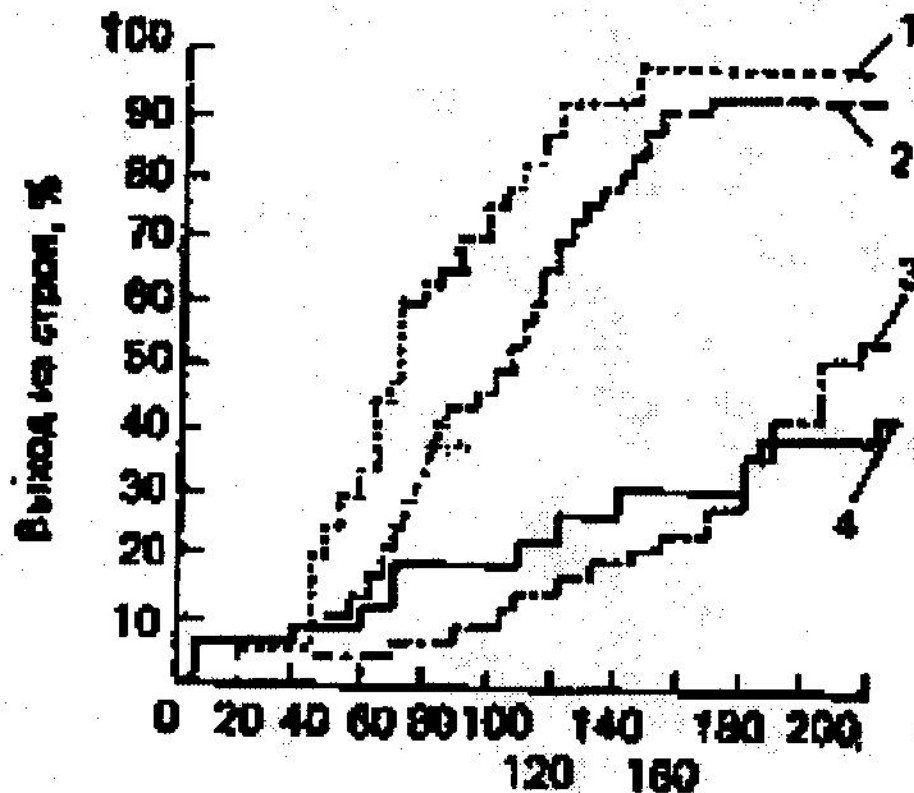
## *Виды соединений накруткой*



*1— электрод; 2— провод; 3 — контактная площадка; 4— основание*

- При монтаже накруткой применяют три вида соединения: немодифицированное, модифицированное и бандажное.
- Модифицированное соединение (б) от немодифицированного (а) отличается тем, что кроме витков оголенного провода на выводе имеется 1. ..2 витка провода в изоляции, которая демпфирует воздействие знакопеременных нагрузок на элементы контакта и уменьшает усталостные напряжения.
- Это обеспечивает высокую надежность соединений при вибрационных нагрузках.
- В бандажном соединении (в) соединяемый элемент (провод, вывод ЭРЭ, шина и пр.) располагается вдоль широкой поверхности граненого вывода и на них накручивается несколько витков бандажной проволоки (не менее восьми).

# Результаты сравнительных испытаний соединений



1— пайка одножильным проводом; 2— накрутка немодифицированная;  
3— накрутка модифицированная; 4— пайка многожильным проводом

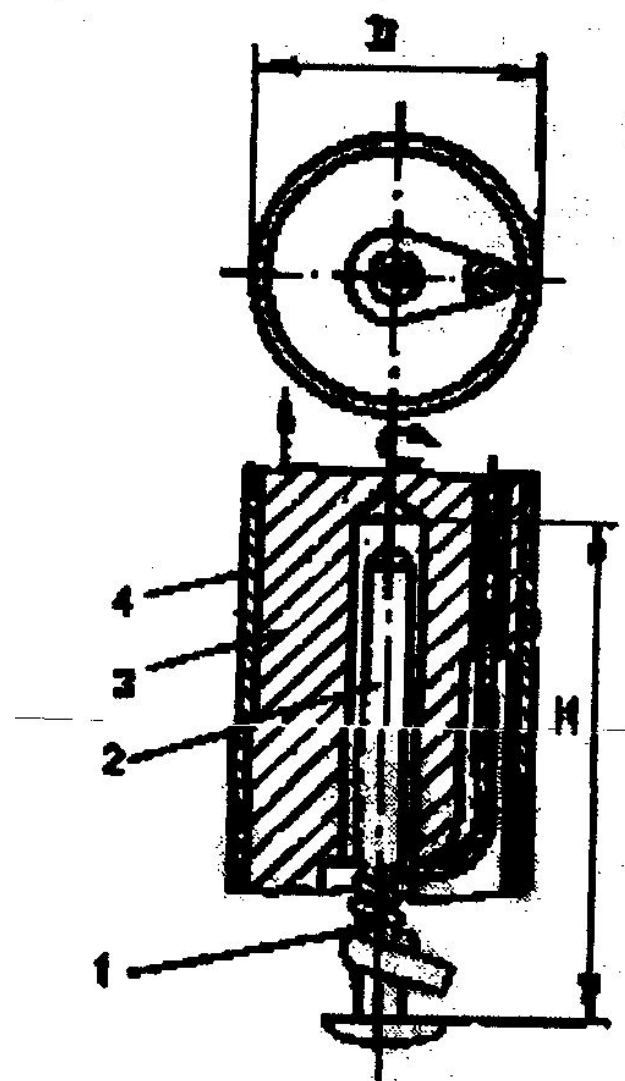
- Для электромонтажа методом накрутки применяются одножильные медные провода диаметром 0,17...1,2 мм, имеющие относительное удлинение не менее 20%.
- Жила провода облуживается для повышения коррозионной стойкости.
- Кроме меди используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.
- Материал выводов помимо пластичности, высокой электропроводности и коррозионной стойкости должен еще обладать определенной упругостью и прочностью для обеспечения сопротивления скручивания его в процессе навивки.
- Для изготовления выводов методом холодной обработки давлением применяют медь, латунь, бериллиевую, марганцовистую и фосфористую бронзы, никель-серебряные и медно-бериллиевые сплавы.

- На выводы наносят гальванические покрытия из серебра (6.. .9 мкм по никелевому подслою), золота (3.. .6 мкм с предварительным серебрением), олова или сплава олово-свинец толщиной до 40 мкм.
- Вывод должен иметь не менее двух острых кромок, чтобы получить надежное соединение.
- Исходя из этого условия применяют выводы, форма которых приведена в таблице.
- Наибольшее распространение получили прямоугольные и квадратные выводы.
- Выводы U- и V-образные обладают повышенной упругостью по сравнению с прямоугольными при одинаковой площади поперечного сечения.
- Их используют для монтажа аппаратуры, работающей при температуре 120... 180 °С.

- Длина выводов определяется диаметром провода, числом витков в соединении и числом соединений на выводе.
- Для обеспечения сопротивления скручиванию при навивке длина вывода не должна превышать 45...50 мм, а площадь его поперечного сечения должна в 1,5... 1,7 раза быть больше площади сечения провода.
- Число витков в соединении определяется из требований равенства суммы площадей зон контакта и поперечного сечения провода.
- Это условие обеспечивается при 20 ... 24 точках контакта, т. е. 5...6 витков при накрутке на прямоугольный вывод.



# Схема инструмента для соединения накруткой



- Накрутку получают с помощью специального инструмента — валика навивки при его вращении с проводом и продольном перемещении вдоль вывода (см. рисунок).
- Приводом служит электрический или пневматический двигатель. Валик 3 имеет два отверстия: центральное для размещения вывода 2 и боковое ступенчатое для размещения монтажного провода 1.
- На торце валика выполнена выточка, форма которой влияет на условия навивки и качество соединения.
- На валик в осевом направлении действует пружина, сила которой определяет однородность и плотность накрутки.

- Наружный диаметр  $D$  втулки 4 выбирают в зависимости от размеров выводов, диаметра провода и условий получения соединения.
- Для регулировки глубины накрутки изменяют высоту  $H$ , используя набор валиков навивки.
- Сила натяжения провода, которая определяет механические и электрические параметры соединения, зависит от конфигурации выточки на торце валика навивки, радиуса округления стенки бокового отверстия и шероховатости рабочей кромки.
- Оптимальное значение силы натяжения провода находится в пределах 5.. .30 Н и подбирается экспериментально путем определения усилия стягивания накрутки с вывода.

- Электромонтаж методом накрутки состоит из трех этапов:
  - подготовительного,
  - собственно накрутки,
  - контроля.
- **Первый этап** включает получение соединителей с выводами, электромонтажного провода и их проверку, установку и закрепление блока с разъемами на подставке для монтажа, нарезку мерных перемычек, снятие изоляции с их обоих концов механическим или термомеханическим способом на заданную длину.
- Подготовка проводов в зависимости от типа производства выполняется вручную или с помощью автоматов.

- **Второй этап** начинается с заправки провода в боковое отверстие валика навивки.
- После этого валик навивки ориентируют относительно вывода, совмещая ось центрального отверстия с осью вывода, и надвигают на вывод, преодолевая сопротивление пружины.
- Вращение валика от двигателя обеспечивает получение соединения в течение 0,3 ... 0,8 с. Производительность процесса составляет 30 ... 50 соедин./ч.
- Для механизации электромонтажа методом накрутки и уменьшения числа ошибок применяют установки с числовым программным управлением (полуавтоматические и автоматические).

- Полуавтоматические установки состоят из координатного стола, на котором крепится приспособление с целеуказателем, перемещающимся над столом с высокой точностью по двум координатам, монтажного пистолета, электрифицированной кассетницы с набором подготовленных проводов, стойки управления и питания.
- Поиск вывода, на котором образуется очередное соединение, осуществляется автоматически по программе, записанной на перфоленте.
- Одновременно происходит индикация кассеты с необходимым монтажным проводом.
- После установления целеуказателя в положении над нужным выводом рабочий извлекает монтажный провод из указанной кассеты, вставляет его в валик навивки, насаживает через целеуказатель на вывод и производит накрутку.

- Производительность такого оборудования составляет 200...500 соединений/час с точностью 0,01...0,001 %.
- Автоматические установки (например, робототехнологический комплекс «Эверест», СССР; модель 14РУ и 14Р5 фирмы Gardner Denver, США и др.) для монтажа накруткой управляются от ЭВМ.
- Работа оператора сводится к установке держателя с соединителями на стол, заправке монтажного провода в специальную головку, пуска автомата и контроля за его работой.
- Изоляция с определенного участка провода удаляется в процессе работы автоматически. Производительность установок составляет 500...1200 соединений/час с точностью 0,0001...0,0005 %.

- Погрешность позиционирования при этом не превышает 0,05...0,08 мм.
- **На третьем этапе** проверяют визуально правильность монтажа и качество накрутки.
- На контрольных образцах измеряют с помощью щупов плотность накрутки, проверяют миллиомметром переходное сопротивление, динамометром — усилие стягивания.
- Испытания на раскрутку заключаются в демонтаже соединения специальным приспособлением.
- **Накрутка** нашла широкое применение при выполнении межблочного монтажа, электрического соединения блоков на рамах и стойках.



## ***Соединение проводящими клеями***

- Электропроводящие клеи (контактолы) применяют при создании монтажных соединений в тех случаях, когда другие методы оказываются неэффективными: в труднодоступных местах, при ремонте ПП, при низкой термостойкости компонентов.
- Особенно широко используют контактолы при изготовлении гибридных ИС, микросборок и присоединении их подложек к корпусам микроблоков.
- Клеепроводящие композиции изготавливают на основе эпоксидных смол холодного и горячего отверждения, полиуретана, силикона и неорганических соединений.
- В качестве наполнителя используют мелкодисперсный (1...2 мкм) порошок золота, серебра, палладия, никеля, меди, алюминия, графита.

# Токопроводящие клеи

Марка	Основные компоненты	Режим отверждения		Объемное сопротивление, Ом.см	Рабочая температура, °С	Контакти-рующие поверхности
		°С	ч			
ТПК-34	Эпоксидная смола и серебро	—	—	$1 \cdot 10^{-4}$	100	Палладиевые, серебряные, медные поверхности, покрытые припоем ПОС-61
ТПК-250	→	—	—	$1 \cdot 10^{-4}$	60...250	То же
ВК-20Т	Модифицированный полиуретан, серебро	—	—	$3 \cdot 10^{-5}$	350...400	-.-
К-8	Лак ЭП-96, этилцеллозольв, серебро	120	3	$3,5 \cdot 10^{-6}$	-60...+125	-»-
К-135	Лак АК-113, циклогексанол, серебро	70	7	$5 \cdot 10^{-6}$	-60...+100	—»—
ТПКК-3	Клей БФ-4, этанол, серебро	60	7	$1,7 \cdot 10^{-4}$	-60...+80	-»-
К-17	Лак ПЭ-933, этилцелло-зольв, серебро	160	4	$5 \cdot 10^{-6}$	-60...+155	-»-
ЭНКС-2	Смола ЭД-20, полиамид, никель посеребранный	80...90 затем 110...120	2 1	$1 \cdot 10^{-4}$	-60...+100	Диэлектрические, металлические
ТПК-2, КН-1, КН-2	Эпоксидная смола, никель карбонильный	-	-	$10^{-3}$	-	То же
КМ-2	Эпоксидная смола, медь	—	—	$5 \cdot 10^{-4}$	180	-»-
КГ-2, КГ-3	Эпоксидная смола, графит	—	—	$5 \cdot 10^{-2} \dots 1,0$	—	-»-

- Наибольшей электропроводностью обладают клеи с серебряным и золотым наполнителями.
- К их недостаткам следует отнести дефицитность и высокую стоимость, низкую прочность клеевого шва (3.. .7 МПа), наличие во многих из них растворителей, отсутствие вакуумной плотности соединения.
- Свойства электропроводящих клеев зависят не только от типа наполнителя, но и от его концентрации.
- Необходимым условием получения максимальной электропроводности контактолов является формирование в объеме композиции из частичек наполнителя так называемых **цепочных структур**.
- Увеличение количества наполнителя увеличивает проводимость, но одновременно ухудшаются механические свойства соединения.

- В связи с этим разработан способ искусственной ориентации металлических частиц никеля под действием магнитного поля, что позволяет увеличить электропроводность клеев в 5 - 10 раз при значительно меньшей концентрации наполнителя.
- Удельное электрическое сопротивление зависит также от температуры и времени отверждения. Более высокие технологические параметры соответствуют более высоким значениям электрической проводимости.
- Точное нанесение контактолов на очищенные поверхности соединяемых деталей осуществляют методом шелкографии, с помощью ручных или автоматических дозаторов.