

Б. Н. БАДЬЯНОВ,  
В. А. ДАВЫДОВ, С. Г. ПАРШИН

# СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Учебное пособие

Ульяновск  
2007

УДК 621.38

ББК 32.85я7

Б 15

Рецензенты: заслуженный деятель науки и техники Р. Ф., доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства и пайки» Тольяттинского государственного университета В. И. Столбов; кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и обработка металлов давлением» Ульяновского государственного технического университета В. Н. Кокорин.

Утверждено редакционно-издательским советом УлГТУ в качестве учебного пособия.

**Бадьянов Б. Н.**

Б 15

Сварочные процессы в электронном машиностроении: учебное пособие / Б. Н. Бадьянов, В. А. Давыдов, С. Г. Паршин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 268 с.

ISBN 978-5-9795-0029-4

В книге приведены конструкции электронных приборов, рассмотрены основные этапы их изготовления, вопросы образования сварных и паяных соединений, описаны технологии и оборудование сварки плавлением, давлением, пайки; даны сведения по контролю качества сварных и паяных соединений.

Учебное пособие предназначено для студентов машиностроительных, приборостроительных и радиотехнических специальностей высших и средних специальных учебных заведений, а также может быть использовано для подготовки и повышения квалификации мастеров и рабочих, занятых на сборочно-сварочном производстве микронэлектронных приборов.

Пособие подготовлено на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением».

**УДК 621.38**  
**ББК 32.85я7**

Учебное издание

**БАДЬЯНОВ** Борис Николаевич

**ДАВЫДОВ** Владимир Алексеевич

**ПАРШИН** Сергей Георгиевич

**СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Редактор О. С. Бычкова

Подписано в печать 04.06.2007. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15,57.

Тираж 100 экз. Заказ .

Ульяновский государственный технический университет

432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

© Б. Н. Бадьянов, В. А. Давыдов,  
С. Г. Паршин, 2007

© Оформление. УлГТУ, 2007

ISBN 978-5-9795-0029-4

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Общая характеристика сварочных процессов в электронном машиностроении.....	8
1.1. Типы приборов и условия их эксплуатации.....	8
1.2. Типовые технологические схемы изготовления электронных приборов.....	30
1.3. Особенности сварки и пайки деталей и узлов электронных приборов.....	34
1.4. Классификация способов сварки и пайки.....	35
Контрольные вопросы.....	38
Глава 2. Сварка плавлением в электронном машиностроении.....	39
2.1. Образование соединений при сварке плавлением.....	39
2.2. Классификация способов сварки плавлением.....	50
2.3. Характеристика источников нагрева при сварке плавлением.....	51
2.4. Технологические особенности сварки плавлением электронных приборов.....	72
2.5. Особенности сварки плавлением материалов для электронного машиностроения.....	91
2.6. Оборудование для сварки плавлением изделий электронного машиностроения.....	102
Контрольные вопросы.....	127
Глава 3. Сварка давлением в электронном машиностроении.....	129
3.1. Образование соединений при сварке давлением.....	129
3.2. Классификация способов сварки давлением по методам активации.....	134
3.3. Технологические схемы процессов сварки давлением.....	140
3.4. Технологические особенности сварки давлением электронных приборов.....	149
3.5. Оборудование для сварки давлением изделий электронного машиностроения.....	167
Контрольные вопросы.....	184
Глава 4. Пайка в электронном машиностроении.....	185
4.1. Образование соединений при пайке.....	185
4.2. Классификация способов пайки.....	195
4.3. Характеристика источников нагрева при пайке.....	197
4.4. Технологические особенности пайки электронных приборов.....	206
4.5. Особенности пайки материалов для электронного машиностроения.....	234
4.6. Оборудование для пайки изделий электронного машиностроения.....	242
Контрольные вопросы.....	252
Глава 5. Контроль качества сварных и паяных соединений.....	254
5.1. Общие сведения о контроле качества изделий электронного машиностроения.....	254
5.2. Оценка качества соединений и приборов методами неразрушающего контроля.....	255
5.3. Оценка качества соединений методами разрушающего контроля.....	262
Контрольные вопросы.....	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	267
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	268

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Одним из этапов непрерывного образования является подготовка высококвалифицированных специалистов в рамках профессиональной школы. Особое внимание уделяется развитию и совершенствованию подготовки квалифицированных инженеров по профессиям, отвечающим перспективным направлениям научно-технического прогресса. Высокие требования, предъявляемые к надежности и работоспособности при изготовлении ответственных узлов с использованием сварочных процессов, предполагают и высокий уровень технической подготовки специалистов.

Наиболее широко в машиностроении применяется электродуговая сварка покрытыми электродами, механизированная сварка в среде защитных газов плавящимся электродом, аргонодуговая сварка вольфрамовым неплавящимся электродом и электродуговая сварка плавящимся электродом под слоем флюса. Электронно-лучевой сваркой сваривают прецизионные узлы из химически активных металлов. Создание дешевых полупроводниковых лазеров с высоким КПД позволило автоматизировать процесс сборки микронных приборов. Применение сварки взрывом и трением-перемешиванием позволило получить сверхнадежные сварные соединения из легких сплавов для оборудования международной космической станции. Ультразвуковой, контактной, термокомпрессионной микросваркой соединяют сверхчистые проводники интегральных микросхем компьютеров.

Современные способы сварки и пайки представляют собой сложные физико-химические процессы, поэтому их выполнение требует не только хороших производственных навыков, но и понимания существа и взаимосвязи основных явлений, обеспечивающих процесс соединения деталей.

Данное учебное пособие дает возможность в систематизированном виде познакомить студентов и инженеров с теоретическими основами сварки и пайки, с технологией выполнения сварочных операций и используемым для этого оборудованием применительно к изготовлению электронных приборов.

## **ВВЕДЕНИЕ**

С помощью электронных приборов решаются сложные задачи генерирования, усиления, преобразования, формирования и измерения электрических сигналов, а также выполняются логические операции, используемые для управления различными процессами в разных областях науки, техники и народного хозяйства.

Электронные приборы являются основой автоматов и роботов, управляющих и вычислительных систем, поэтому именно электронную технику называют катализатором научно-технического прогресса.

В настоящее время невозможно представить развитие какой-либо области человеческой деятельности без использования электроники – это медицина, наука, производство, сельское хозяйство, транспорт, связь, искусство.

Электронная промышленность, как одна из самых молодых отраслей народного хозяйства, стала активно развиваться после Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., а к началу 80-х гг. она уже заняла одно из первых мест в мире по объему выпускаемой продукции, по экономической эффективности, по темпам развития и номенклатуре выпускаемой продукции. Характерными особенностями развития электроники являются непрерывное генерирование научных идей по разработке и созданию принципиально новых приборов, использование широкой гаммы самых разнообразных материалов (металлы, полупроводники, стекла, керамика) в разных сочетаниях, а также непрерывное стремление к миниатюризации приборов в целом и отдельных их частей.

Электроракуумные приборы в последние десятилетия заменяются твердотельными полупроводниковыми приборами, которые являются в настоящее время основой электронного приборостроения, ЭВМ и других систем. Из сказанного вовсе не следует, что роль электроракуумных приборов будет в будущем сведена к нулю и их производство станет нецелесообразным. Устройства отображения информации (кинескопы), мощные генераторные лампы и приборы для дальней космической связи (СВЧ-диапазона), приборы контроля (рентгеновские трубки) продолжают развиваться и

совершенствоваться, их выпуск непрерывно растет. Кроме того, появились и развиваются такие специфические направления электронной техники, как оптоэлектроника, акустоэлектроника, лазерная техника, волоконная электроника и многие другие.

Все электронные приборы имеют различную конструкцию, во многом различается технология их изготовления. Так, при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем все большее развитие получили групповые методы обработки. Однако общим для всех технологий является наличие на заключительных этапах изготовления приборов сборочных операций.

Под сборкой понимают совокупность технологических операций, обеспечивающих соединение элементов и частей электронных приборов в единое целое. Значительное место в сборочных операциях занимают сварка и пайка.

Сварка и пайка – это способы получения неразъемных соединений между деталями приборов. По своей природе сварка и пайка – сложные физико-химические процессы, в результате протекания которых между соединяемыми деталями образуется химическая связь.

Трудоемкость сварочных операций при изготовлении приборов пока еще достаточно велика. В производстве электровакуумных приборов она достигает 45 % от общей трудоемкости изготовления лампы, в производстве дискретных полупроводниковых приборов – до 25 %, а в производстве интегральных микросхем – до 60 %. Поэтому увеличение выпуска приборов путем увеличения числа сборщиков-сварщиков просто невозможно при миллиардном количестве отдельных сборок. Единственный путь дальнейшего развития производства изделий электронной техники – это интенсификация производства путем создания автоматизированных устройств, легко перестраиваемых при смене номенклатуры изделий, т. е. создания гибких производственных модулей (ГПМ) и гибких производственных систем (ГПС) из нескольких модулей, выполняющих все операции сборки, монтажа и сварки

без участия человека со скоростями в 100–1000 раз большими, чем при ручном монтаже приборов.

Параллельно с проблемой увеличения производительности (эффективности) в производстве изделий электронной техники, важным звеном является проблема повышения качества выпускаемой продукции.

Если представить себе уровень технологии сборки, допускающей 1 % брака, то при разварке 50 выводов большой интегральной микросхемы (БИС), где каждый вывод имеет два сварных соединения (на кристалле и на ножке), нельзя получить ни одной работоспособной микросхемы и, тем более, нельзя изготовить сверхбольшую интегральную микросхему (СБИС). Поэтому вопросы совершенствования технологии контроля режимов сварки и контроля качества получаемых соединений непосредственно в процессе их образования являются также основными вопросами сварки изделий электронной техники.

Для сборки электронных приборов используются сварочные процессы, которые нашли широкое применение в различных отраслях промышленности (сварка электродуговая, электронным лучом, лазером, плазмой, электроконтактная, холодная, диффузионная, ультразвуковая), и процессы, специально разработанные для электронной техники (термокомпрессионная, микроплазменная сварка и др.). Следует отметить также широкое применение в создании приборов электронной техники различных методов пайки материалов как общеизвестного типа, так и характерных для электроники.

Из сказанного следует, что необходимый минимум знаний о сварке и сварочных процессах требуется не только на этапе производства электронных приборов, но и на этапе их разработки (выбор хорошо свариваемых материалов), и на стадии применения (исследование и прогнозирование работоспособности сварных соединений в приборе, определяющих функциональные возможности прибора в целом).

Поэтому, рассматривая перспективы развития сварки в электронной промышленности, нельзя оторвать их от общих задач развития отрасли, от перспектив развития ее направлений – отдельных типов приборов.

# ГЛАВА 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

## 1.1. Типы приборов и условия их эксплуатации

Номенклатура изделий электронной техники насчитывает сотни тысяч различных по своим параметрам изделий, потребляемых тысячами предприятий. Ни одна из современных областей техники не обходится без применения в различных системах наблюдений, контроля, управления и связи изделий электронной техники. К изделиям электронной техники относятся электровакуумные приборы, дискретные полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы, резисторы, конденсаторы и разнообразные радиокомпоненты – трансформаторы и катушки индуктивности, переключатели и разъемы, кварцевые резонаторы и др. Количество используемых в радиоэлектронике изделий определенного типа меняется с развитием электронной техники (рис. 1). Интегральные микросхемы постепенно становятся основными компонентами радиоэлектронной аппаратуры, вытесняя электровакуумные и дискретные полупроводниковые приборы. Однако электровакуумные приборы, особенно передающие лампы мощностью в десятки киловатт, еще широко используются в различного рода аппаратуре. Дискретные полупроводниковые приборы также широко применяют в различной аппаратуре и не все их типы могут быть заменены интегральными микросхемами.



Рис. 1. Использование радиоэлектронных элементов в аппаратуре

Электровакуумные приборы. Электровакуумными приборами называют приборы, действие которых связано с использованием в их рабочем пространстве электромагнитных процессов, происходящих в глубоком вакууме.

Электроны движутся в рабочем пространстве свободно, практически не сталкиваясь с оставшимися после откачки газа молекулами. Вакуум в этих приборах оценивают давлением  $13 \times 10^{-4}$  Па и меньше. К электровакуумным приборам относятся электронные лампы (приемно-усилительные, генераторные и др.), электронно-лучевые приборы, фотоэлементы и фотоэлектронные умножители, приборы сверхвысоких частот (магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны и др.).

Электронные лампы предназначены для работы в схемах преобразования электрических токов, частоты, детектирования и др. Их классифицируют по числу электродов и по мощности, выделяемой на аноде.

По числу электродов различают: диоды — лампы с двумя электродами (катодом и анодом); триоды – лампы с тремя электродами (между катодом и анодом помещена сетка): тетроды – лампы с катодом, анодом и двумя сетками; пентоды – пятиэлектродные лампы с тремя сетками, а также гексоды, гептоды и октоды. Кроме того, часто используют комбинированные (сложные) лампы, например двойные диоды, двойные триоды, триод-пентоды и т.п.

По мощности выделяют в отдельные группы маломощные электронные лампы, носящие название приемно-усилительных (ПУЛ) и лампы средней и большой мощности – генераторные.

Конструкция электронных ламп выполняется в следующем виде: основными электродами являются катод и анод, помещенные в баллон, в котором создан вакуум (рис. 2). Катод служит источником свободных электронов. В простейшем случае он представляет собой спираль или металлическую нить, которая нагревается проходящим электрическим током и является термоэлектрическим эмиттером. Анод принимает электроны, т. е. является собирающим электродом.

В более сложных электронных приборах между катодом и анодом помещают дополнительные электроды, которые называют сетками.

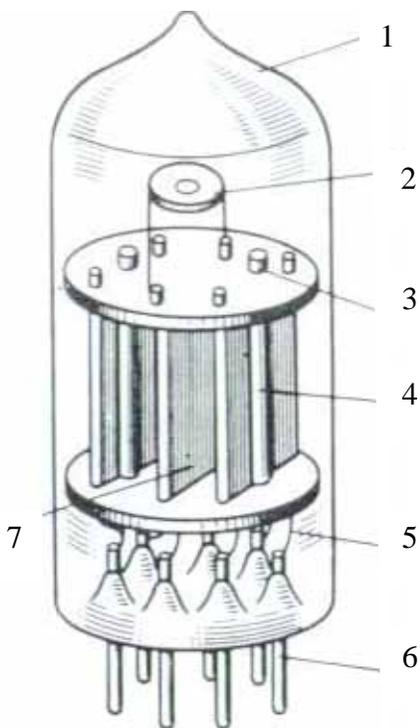


Рис. 2. Приемно-усилительная лампа:  
 1 – корпус, 2 – газопоглотитель, 3 – катод,  
 4 – анод, 5 – соединительный вывод,  
 6 – внешний вывод, 7 – экран

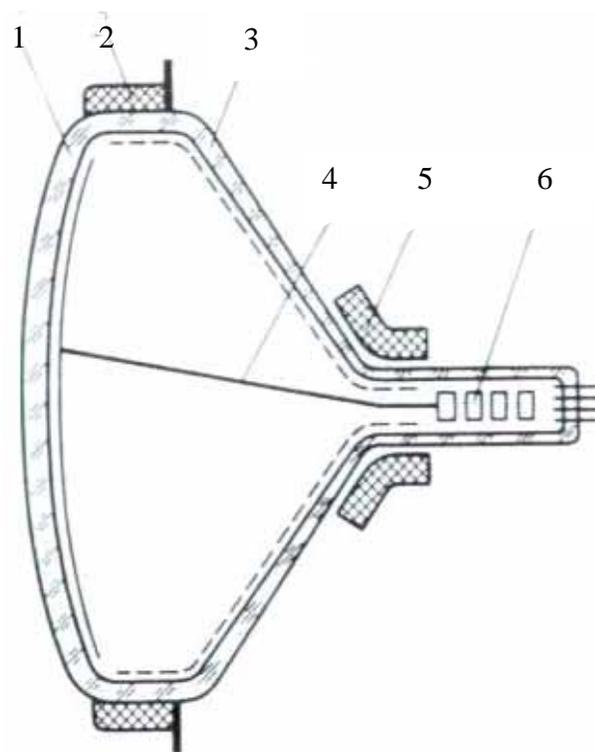


Рис. 3. Конструкция электронно-лучевой  
 трубки: 1 – экран, 2 – взрывозащитная  
 рамка, 3 – оболочка (колба),  
 4 – электронный луч, 5 – отклоняющая  
 катушка, 6 – электронно-оптическая система

Они используются для создания тормозящих, ускоряющих или изменяющихся во времени электрических полей, что необходимо для управления электронным потоком между катодом и анодом. В электронно-лучевых приборах электрические сигналы преобразуются в световое изображение с помощью электронного луча, который, попадая на экран прибора, вызывает его свечение.

Электронно-лучевые приборы делятся на следующие основные классы: осциллографические электронно-лучевые трубки; приемные телевизионные трубки (кинескопы), радиолокационные индикаторы; электронно-оптические преобразователи и усилители яркости изображений, запоминающие электронно-лучевые трубки (потенциолоскопы); передающие телевизионные приборы; электронно-лучевые коммутаторы.

Электронно-лучевая трубка (рис. 3) выполняется в виде герметичной стеклянной колбы 3 с экраном 1, внутри которой с помощью электромагнитных полей создается электронный пучок 4, способный отклоняться от оси прибора.

Кроме того, в конструкцию электронно-лучевой трубки входят устройства для получения электронного луча (электронно-оптическая система 6) и управления им (отклоняющая катушка 5). Для безопасности прибор снабжен взрывозащитной рамкой 2.

Электронно-оптическая система (рис. 4) состоит из источника свободных электронов – катода и системы полых металлических электродов, между которыми образуются электрические поля, формирующие электронный луч. Изменением этих полей регулируется количество электронов в луче, их скорость и траектория движения. Экран покрывают изнутри тонким слоем вещества (люминофора), способного светиться под воздействием электронной бомбардировки.

Фотоэлектронные приборы. Явление фотоэлектронной эмиссии заключается в том, что под воздействием лучистой энергии электроны приобретают энергию, достаточную для совершения работы выхода из материала фотокатода.

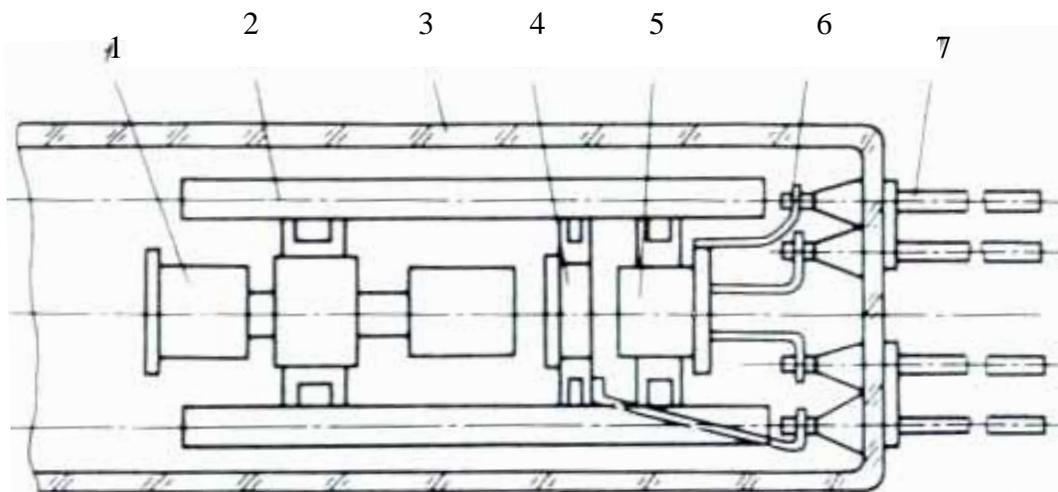


Рис. 4. Конструкция электронно-оптической системы: 1 – анод, 2 – изолятор, 3 – оболочка, 4 – ускоряющий электрод, 5 – катодно-модуляторный узел, 6 – соединительный проводник, 7 – внешний вывод

Если вблизи фотокатода поместить анод и подать на него положительный потенциал, то в замкнутой электрической цепи возникает ток (фототок). Фототок пропорционален световому потоку, падающему на поверхность катода.

С целью получения достаточно большого выходного напряжения применяют фотоэлектронные умножители – приборы, в которых осуществляется внутреннее усиление фототоков в результате действия вторичной электронной эмиссии.

Устройство простейших фотоэлектронных приборов (однокаскадных фотоэлектронных умножителей) показано на рис. 5. В стеклянном баллоне, из которого откачан воздух, размещены фотокатод и анод. Катодом обычно служит тонкий светочувствительный слой, нанесенный непосредственно на внутреннюю поверхность стеклянного баллона. Анод имеет форму стержня, кольца или рамки. Такая форма не препятствует попаданию света на катод. Анод обычно имеет вывод в нижнюю часть цоколя.

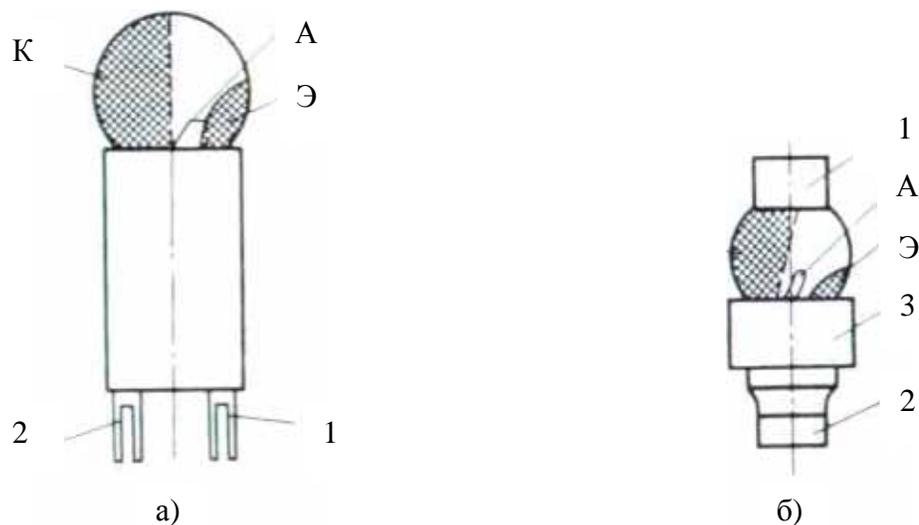


Рис. 5. Конструкция однокаскадных фотоэлектронных умножителей: а – одноцокольные, б – двухцокольные: К – катод, Э – эмиттер, А – анод; 1 – вывод катода, 2 – вывод анода, 3 – вывод эмиттера

Принцип действия многокаскадного фотоэлектронного умножителя показан на рис. 6. Световой поток, попадая на катод фотоэлемента К, вызывает эмиссию электронов, которые электрическим полем направляются на первый эмиттер Э<sub>1</sub>, с первого эмиттера электроны попадают на второй эмиттер Э<sub>2</sub>, причем число их за счет вторичной эмиссии первого эмиттера возрастает. Это происходит на всех последующих эмиттерах, пока все электроны не попадут на анод А. Каждый последующий эмиттер имеет более высокий положительный потенциал, чем предыдущий (для создания ускоряющего поля).

Конструкция многокаскадного фотоэлектронного умножителя (со снятым баллоном) представлена на рис. 7. Фотоэлектронный умножитель состоит из фокусирующей и умножительной систем, которые крепятся на ножке. Фокусирующая система монтируется из предварительно собранных узлов пистонированного и фокусирующего экранов, собранной пружины и испарителя (распылителя компонентов катода).

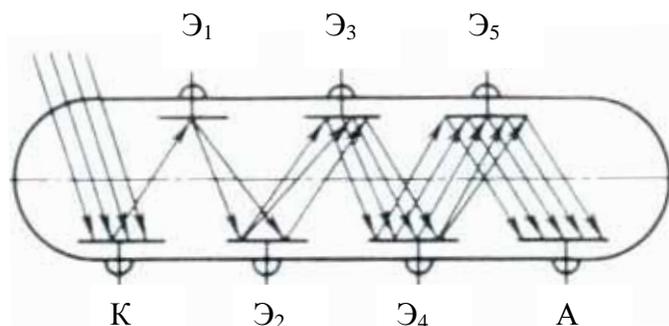


Рис. 6. Принципиальная схема многокаскадного фотоэлектронного умножителя: К – катод, Э<sub>1</sub>, Э<sub>2</sub> и т. д. – первый, второй и т. д. эмиттеры, А – анод

Умножительная система собирается между двумя слюдяными пистонированными пластинами и состоит из анода, эмиттера и контура. Фокусирующую и умножительную системы после соединения сажают на ножку, приваривая траверсы из проволочного никеля к ее выводам.

Приборы сверхвысоких частот (СВЧ-приборы) созданы для усиления и генерирования электромагнитных сигналов в диапазоне частот от 500 МГц до 300 ГГц; СВЧ-приборы представляют собой особый класс электровакуумных

приборов, в которых совершаются сложные энергетические переходы. Эти переходы связаны с преобразованием электрической энергии постоянного тока сначала в кинетическую энергию электронного потока, которая преобразуется далее в энергию электромагнитных колебаний необходимой частоты.

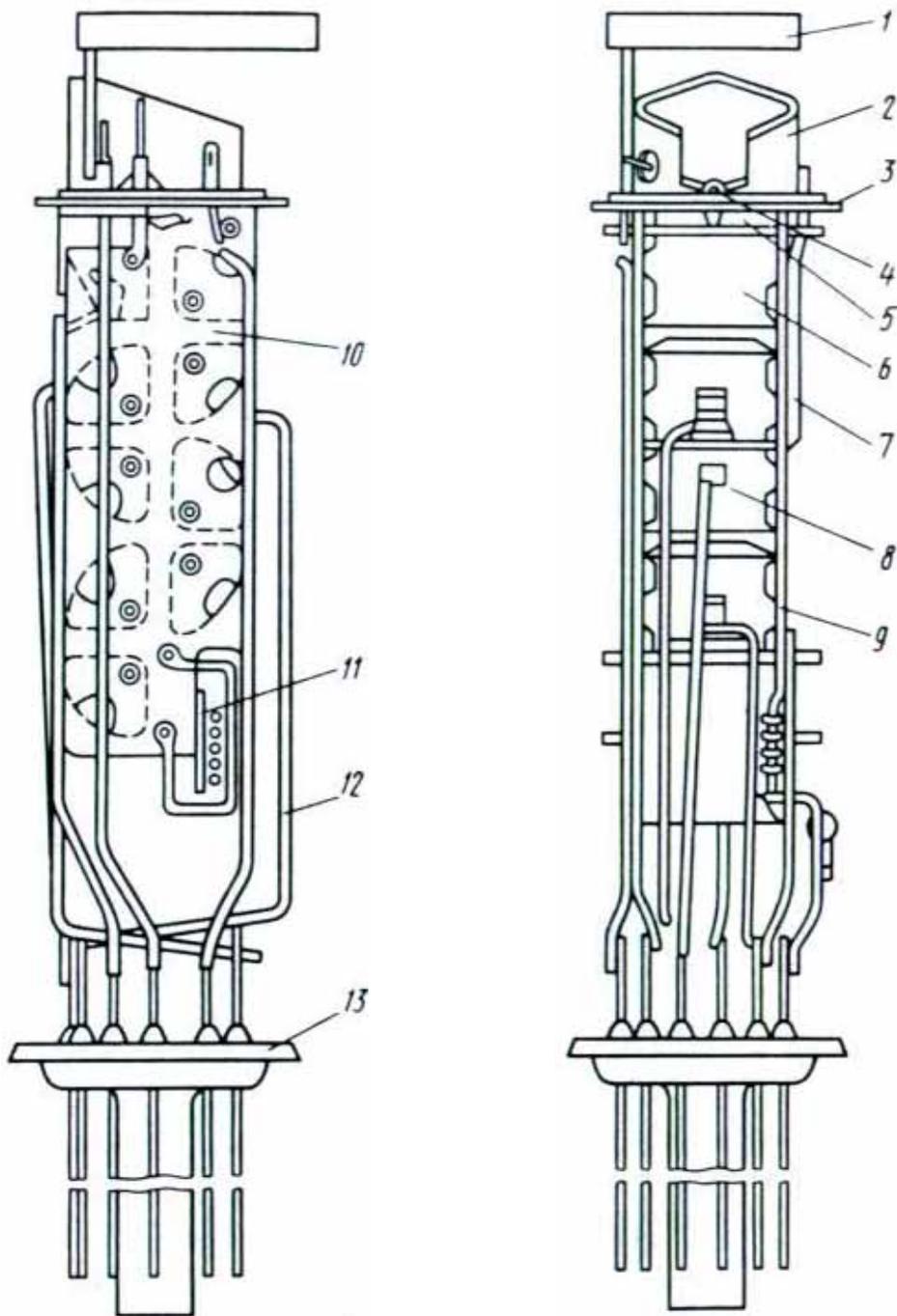


Рис. 7. Конструкция многокаскадного электронного умножителя:  
 1 – пружина, 2 – фокусирующий экран, 3 – пистонированный экран, 4 – испаритель,  
 5 – полочка, 6, 8 – эмиттеры, 7 – контур, 9, 10 – пистонированные слюдяные пластины,  
 11 – анод, 12 – траверсы, 13 – ножка

В качестве примера на рис. 8, 9 приведены внешний вид магнетрона и его конструкция. Основными конструктивными элементами магнетрона являются: анодная система, состоящая из полого колебательного контура, катодного узла, узла вывода высокочастотной энергии, магнитной системы. Катод и анод в этом приборе расположены коаксиально (соосно) и между ними создается постоянное напряжение. Параллельно оси магнетрона прикладывается постоянное однородное магнитное поле. Принцип действия магнетрона заключается в следующем. Электроны, вылетая с катода, движутся под воздействием электрического поля по направлению к аноду. Одновременно с этим, под воздействием магнитного поля, они закручиваются по концентрическим траекториям относительно магнитных силовых линий.

При некоторых соотношениях магнитного и электрических полей траектории электронов могут становиться касательными к поверхности анода. В аноде магнетрона выполнено несколько резонаторов, образованных щелями и цилиндрическими полостями. Каждая щель эквивалентна емкости, а отверстие – индуктивности. В целом система «щель–отверстие» представляет собой колебательный контур, в котором возбуждаются колебания сверхвысоких частот. Результаты всех колебаний складываются, и вся система представляет собой единую колебательную систему. Высокочастотная энергия из колебательной системы магнетрона передается к высокочастотному нагрузочному устройству через выходное окно в выводе высокочастотной энергии.

### **Дискретные полупроводниковые приборы**

Эти приборы служат для преобразования различных сигналов одного вида энергии в сигналы другого вида. Различают следующие классы полупроводниковых приборов: электропреобразовательные, в которых электрический сигнал из одного вида преобразуется в другой; оптоэлектронные, в которых световые сигналы преобразуются в электрические и наоборот (оптроны, фотодиоды, светоизлучающие диоды и др.);

термоэлектрические, в которых тепловая энергия преобразуется в электрическую и наоборот (термистор и др.); пьезоэлектрические и тензометрические, которые реагируют на давление или механические перемещения (тензометры и др.).

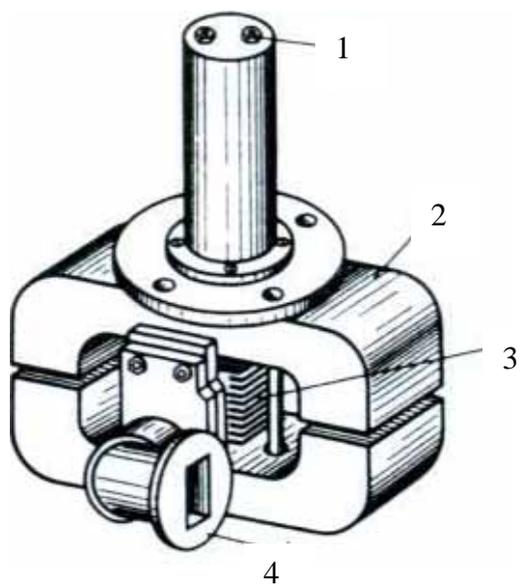


Рис. 8. Внешний вид магнетрона: 1 – гнездо для подключения анодного напряжения и напряжения накала, 2 – магнитная система, 3 – анодный блок с резонаторной системой, 4 – выходной фланец вывода энергии

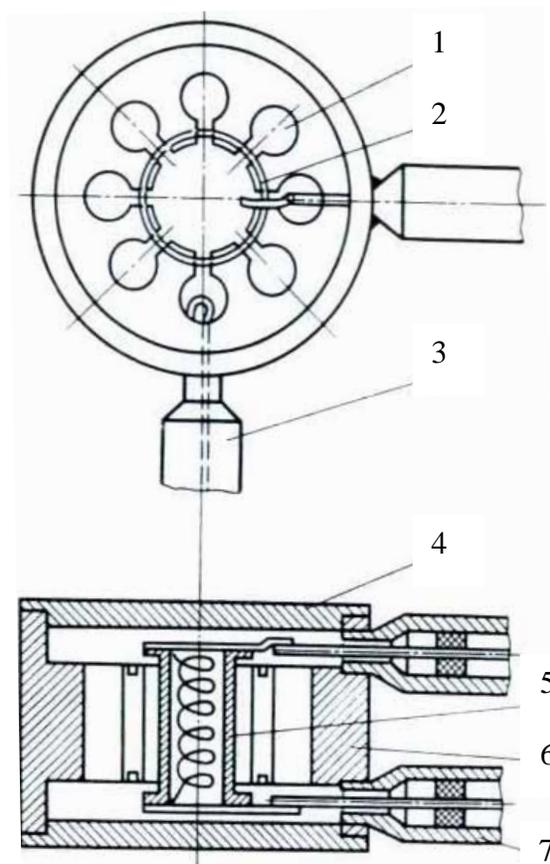


Рис. 9. Устройство магнетрона: 1 – полые колебательные контуры, 2 – кольца связи, 3 – вывод высокочастотной энергии, 4 – крышка, 5 – катодный узел, 6 – анодная система, 7 – выводы накала и анодного напряжения

Наиболее широко в технике используют полупроводниковые приборы первых двух классов: диоды, транзисторы, тиристоры, оптроны. Рабочим элементом этих приборов является кристалл полупроводникового материала с электронно-дырочным переходом. Кристаллы вырезают из пластин полупроводникового материала, предварительно прошедших цикл

технологической обработки. В качестве материала кристаллов наиболее часто используют германий и кремний. Кроме этих материалов в настоящее время применяют такие сложные полупроводниковые материалы, как арсенид галлия GaAs, фосфид галлия GaP и др.

Во внешнюю цепь полупроводниковый кристалл включается с помощью специальных рабочих электродов.

Одной из важнейших частей конструктивного оформления полупроводниковых приборов, в значительной степени определяющей параметры приборов во времени и их надежность при работе в аппаратуре, является корпус. Корпус обеспечивает необходимую атмосферу в приборах при работе в различных климатических условиях, отводит теплоту в процессе работы прибора, защищает рабочие элементы прибора от воздействия светового излучения и механических повреждений.

Диоды. В промышленности используют значительное число различных по электрическим характеристикам и применению типов диодов: выпрямительные и импульсные, варикапы, стабилитроны и ряд специальных (генераторы шума, с накоплением заряда и др.).

Для данного класса приборов существует несколько десятков различных конструкций.

На рис. 10 представлена конструкция диода в металлостеклянном корпусе, состоящая из кристаллодержателя 7, на котором крепится кристалл 6; стеклоизолятора 4 и двух втулок 3. Подключение диода к электрической цепи осуществляется с одной стороны через вывод кристаллодержателя, с другой – через соединительный проводник и внешний вывод 1. Герметизация прибора осуществляется с помощью припоя 2.

Для более мощных диодов используют металлические корпуса (рис. 11) с проходным стеклоизолятором. Особенностью этих конструкций является наличие массивного основания корпуса 7. В центральной части основания имеется углубление для посадки кристалла 6. В крышке корпуса 5 через стеклоизолятор 4 впаяна трубка 2, через которую кристалл соединяется с

внешним выводом. Герметизация корпуса обеспечивается соединением крышки с основанием корпуса рельефной электроконтактной сваркой.

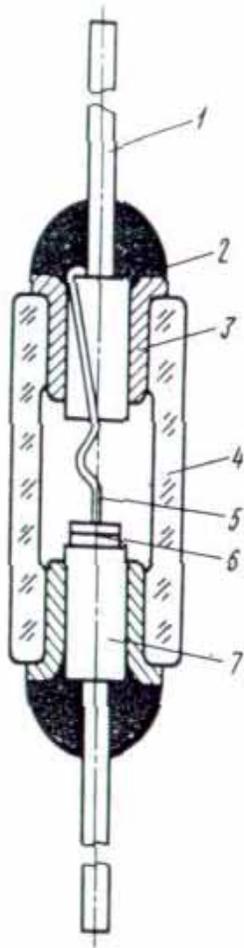


Рис. 10. Конструкция диода в металлостеклянном корпусе:  
1 – внешний вывод, 2 – припой, 3 – втулка, 4 – стеклоизолятор, 5 – соединительный проводник, 6 – кристалл, 7 – кристаллодержатель

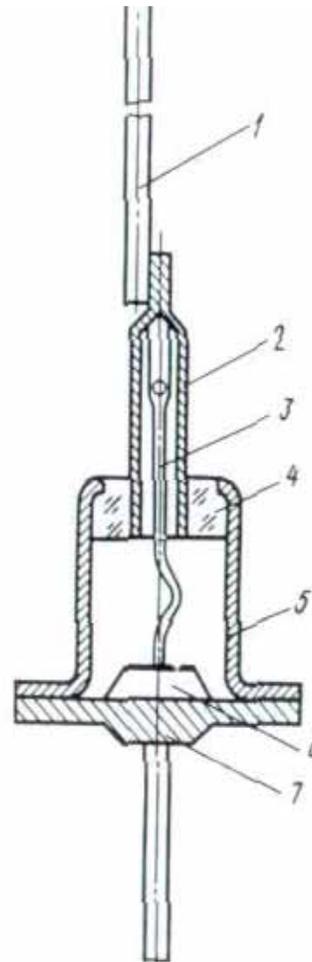


Рис. 11. Конструкция диода в металлическом корпусе:  
1 – внешний вывод, 2 – трубка, 3 – соединительный проводник, 4 – стеклоизолятор, 5 – крышка, 6 – кристалл, 7 – основание корпуса

Для мощных выпрямительных диодов используются конструкции, в которых на основании корпуса имеется винт для монтажа прибора на теплоотводящем радиаторе (рис. 12). В конструкцию прибора входит основание корпуса 6, изготовленное из меди (в виде шестигранника с винтом). На основании помещают кристалл 5 с верхним выводом в виде трубки 1. Конструкция крышки аналогична описанной (см. рис. 11). Герметизация осуществляется холодной сваркой основания с крышкой.

Конструкции корпусов диодов сверхвысокой частоты достаточно специфичны и разнообразны, что объясняется применением этих диодов в СВЧ-волноводных схемах, в которых требуется специальный их монтаж. Конструкция СВЧ-диодов, показанная на рис. 13, предназначена для маломощных параметрических диодов с точечным контактом и выполнена на основе металлокерамического спая. Керамическая втулка 5 образует герметичное соединение с двумя металлическими втулками 3 и 8. В отверстиях втулок запрессованы: кристаллодержатель 7 с кристаллом 6 и держатель 2 с соединительным проводником 4. Окончательную герметизацию осуществляют пайкой.

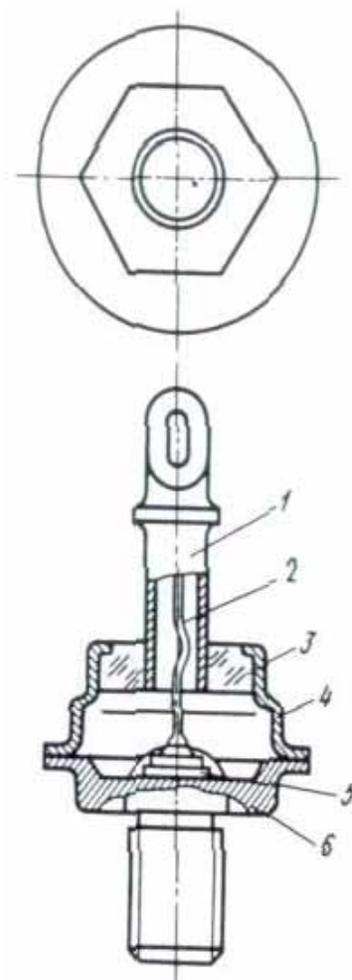


Рис. 12. Конструкция мощного диода: 1 – трубка, 2 – соединительный проводник, 3 – стеклоизолятор, 4 – крышка, 5 – кристалл, 6 – основание корпуса

**Транзисторы** – трехэлектродные полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления, генерирования и преобразования

электрических колебаний различных частот. Транзистор представляет собой кристалл полупроводникового материала (кремния или германия), обладающий электронной (n-типа) или дырочной (p-типа) электропроводностью, в объеме которого созданы две области с различной проводимостью.

Конструкция транзистора средней мощности представлена на рис. 14. Она представляет собой массивное основание корпуса 3, в которое через стеклоизолятор 5 впаяны внешние выводы 6. Один из внешних выводов соединяется непосредственно с основанием корпуса. Герметизация осуществляется холодной сваркой основания с крышкой.

Для маломощных СВЧ-транзисторов используют конструкции с металлокерамическим корпусом, обеспечивающим небольшие электрические потери в диапазоне сверхвысоких частот. Конструкция такого транзистора представлена на рис. 15. Она имеет основание 4 в виде керамического диска, к которому с помощью пайки присоединены внешние выводы 3. Кристалл 5 крепится на основании корпуса пайкой низкотемпературным припоем. Герметизация корпуса также осуществляется с помощью пайки.

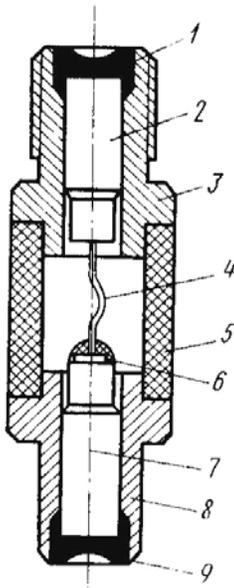


Рис. 13. Конструкция СВЧ-диода:  
1, 9 – припой, 2 – держатель, 3, 8 – втулки,  
4 – соединительный проводник,  
5 – керамическая втулка, 6 – кристалл,  
7 – кристаллодержатель

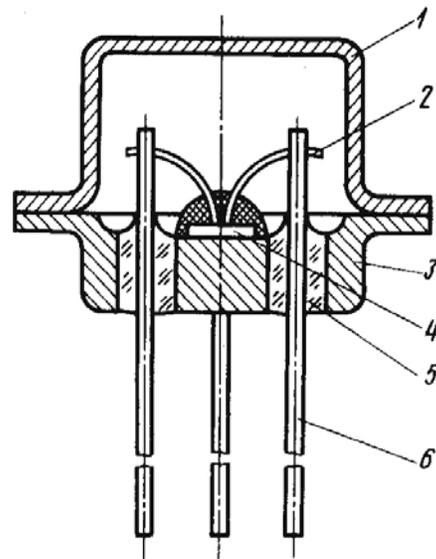


Рис. 14. Конструкция транзистора средней мощности: 1 – крышка, 2 – соединительный проводник, 3 – основание корпуса, 4 – кристалл, 5 – стеклоизолятор, 6 – внешний вывод

**Тиристоры** получили название от греческого «тира» – дверь. По устройству и принципу работы тиристор похож на полупроводниковый диод, но в отличие от него он управляемый. Тиристоры переключают электрические цепи, регулируют напряжение, преобразуют постоянный ток в переменный. Существует несколько видов тиристоров. Наиболее распространены тиристоры с двумя выводами (динисторы) и тиристоры с тремя выводами.

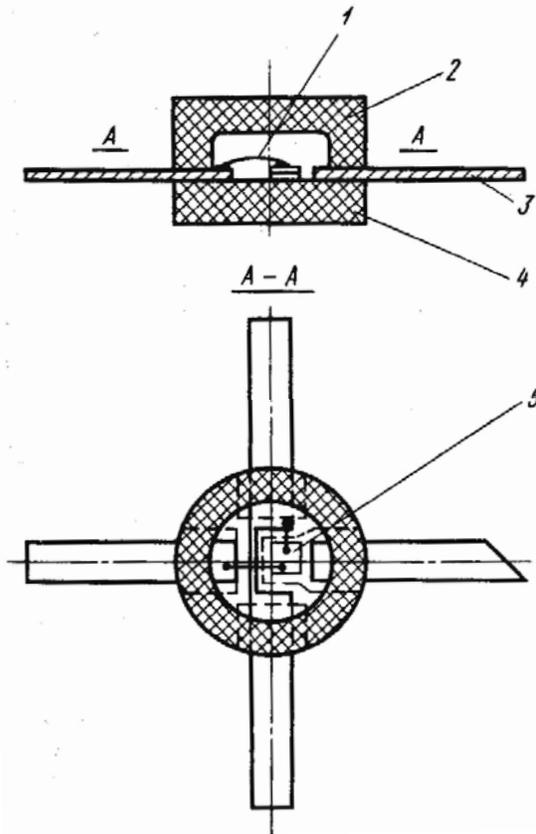


Рис. 15. Конструкция маломощного СВЧ-транзистора: 1 – соединительный проводник, 2 – крышка. 3 – внешний вывод, 4 – основание корпуса, 5 – кристалл

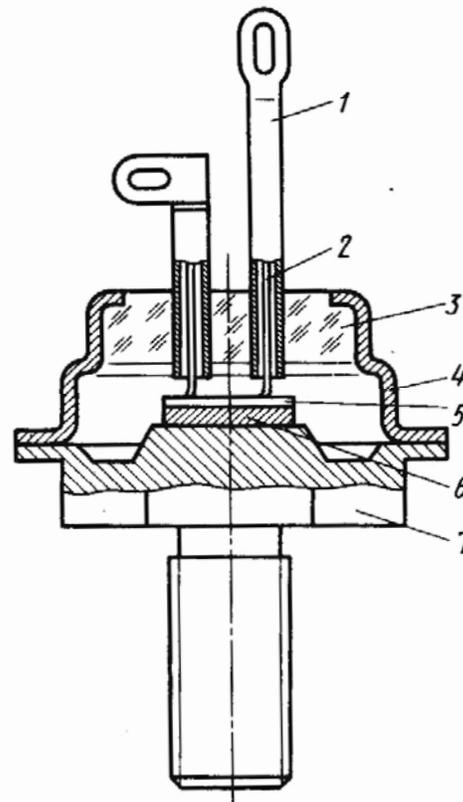


Рис. 16. Конструкция тиристора средней мощности: 1 – внешние выводы, 2 – соединительный проводник, 3 – стеклоизолятор, 4 – крышка, 5 – кристалл, 6 – термокомпенсатор, 7 – основание корпуса

Тиристор представляет собой кристалл кремния с четырьмя чередующимися слоями различной электропроводности, образующими три р-п-перехода. Два крайних слоя образуют соответственно анод и катод. Вывод от одного из средних слоев кристалла является управляющим электродом. Если

на управляющий электрод подать импульс напряжения, то тиристор откроется и через него почти беспрепятственно сможет пройти ток от источника питания к нагрузке. Конструкция тиристора с тремя выводами представлена на рис. 16. Основание корпуса 7 изготовлено из меди и имеет шестигранник под ключ и резьбовой хвостовик. Кристалл 5 напаивают на основание корпуса через компенсирующую прокладку из молибдена 6. Выводы кристалла с помощью проводников соединяются с внешними выводами 1 корпуса. Герметизация корпуса осуществляется холодной сваркой.

**Оптоэлектронные полупроводниковые приборы** – это класс приборов, который получает все более широкое распространение в устройствах оптической связи, точечной и цифровой индикации, в автоматике и т. д. В зависимости от конструкции прибора и условий применения различают единичные и многоэлементные источники излучения для видимой и ИК-области спектра. Основная особенность корпусов фотоэлектрических приборов – наличие приемного (выходного) окна.

На рис. 17 представлена конструкция фотодиода. Основание корпуса состоит из коваровой втулки 6 и двух внешних выводов 5, впаянных во втулку через стеклоизолятор. К одному из выводов приварен кристаллодержатель 4 с кристаллом 3, а к другому припаян электродный вывод 1. Свет на кристалл кремния попадает через стеклянную линзу Г.

На рис. 18 показана конструкция источника излучения. Корпус-прибора состоит из основания 3 и крышки 2. К основанию приварен базовый вывод. Второй вывод впаян в основание через стеклоизолятор. На основание через термокомпенсатор 7 напаивается кристалл полупроводникового материала 6. Верхний вывод кристалла с помощью проводника 5 соединен с изолированным выводом основания корпуса. В крышку 2 корпуса впаяно окно 1 в виде линзы для вывода излучения. Герметизация корпуса осуществляется рельефной электроконтактной сваркой крышки с основанием корпуса.

Интегральные микросхемы (ИМС) – микроминиатюрные функциональные узлы электронной аппаратуры, элементы которых связаны и электрически соединены между собой так, что изделие рассматривается как единое целое.

По технологии изготовления интегральные микросхемы делятся на полупроводниковые, тонкопленочные и гибридные.

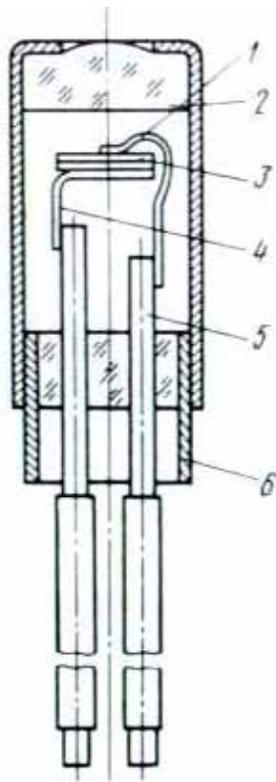


Рис. 17. Конструкция фотодиода:  
1 – электродный вывод, 2 – стеклянная линза,  
3 – кристалл, 4 – кристаллодержатель,  
5 – внешний вывод, 6 – втулка

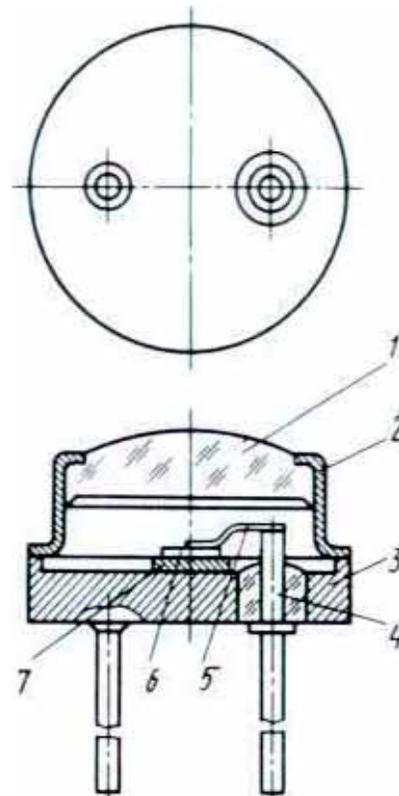


Рис. 18. Конструкция источника излучения:  
1 – стеклянная линза (окно), 2 – крышка,  
3 – основание корпуса, 4 – внешний вывод,  
5 – проводник, 6 – кристалл,  
7 – термокомпенсатор

**Полупроводниковая ИМС** – микросхема, элементы которой выполнены в объеме и (или) на поверхности полупроводникового материала. Соединения между отдельными активными элементами осуществляются как внутри объема полупроводникового кристалла, так и на его поверхности. Основное преимущество этого типа микросхем – возможность изготовления сложного комплекса высококачественных активных компонентов. Однако из-за

сложности и высокой трудоемкости технологического процесса изготовления, технология полупроводниковых микросхем экономически целесообразна только в условиях массового производства. На рис. 19 представлены конструкции полупроводниковых микросхем в металлостеклянном и металлокерамическом корпусах.

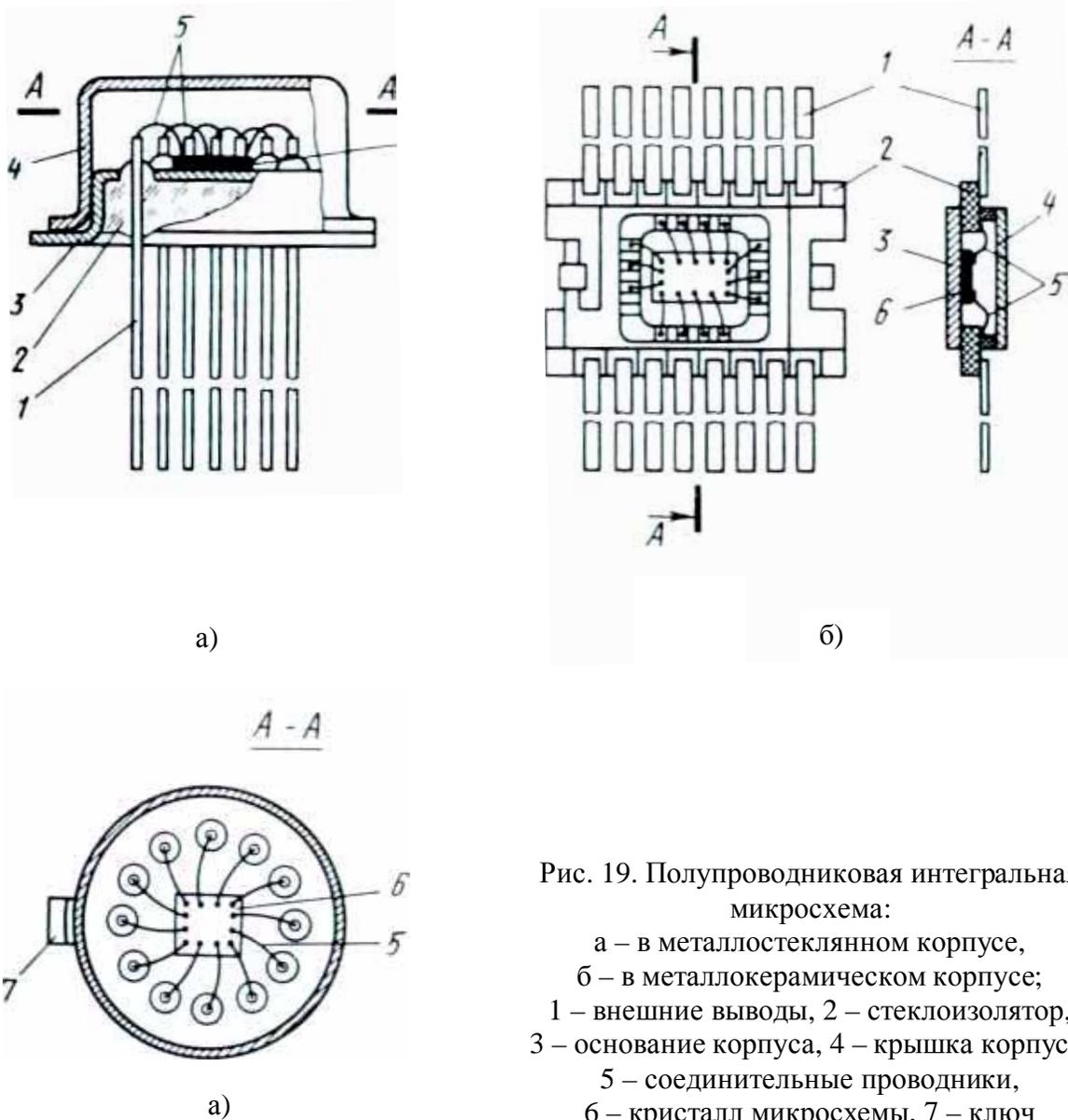


Рис. 19. Полупроводниковая интегральная микросхема:

- а – в металлостеклянном корпусе,
- б – в металлокерамическом корпусе;
- 1 – внешние выводы, 2 – стеклоизолятор,
- 3 – основание корпуса, 4 – крышка корпуса,
- 5 – соединительные проводники,
- 6 – кристалл микросхемы, 7 – ключ

Конструкция в металлостеклянном корпусе наиболее распространена в серийном производстве. Эта конструкция имеет 8 или 12 внешних выводов 1, впаянных в стекло-изолятор 2. Кристалл 6 напаивается на основание корпуса 3. Соединение контактных площадок кристалла с внешними выводами

осуществляется проводниками 5, герметизация корпуса – пайкой крышки 4 с основанием корпуса 3. Функцию припоя выполняет покрытие, нанесенное на основание корпуса.

В конструкции полупроводниковой микросхемы в металлокерамическом корпусе прямоугольной формы с выводами, расположенными параллельно монтажной плоскости корпуса (рис. 19, б), кристалл 6 напаивается на металлизированное керамическое основание корпуса 3; соединение контактных площадок кристалла с контактными площадками внешних выводов 1 осуществляется с помощью проводника 5, а герметизация корпуса — пайкой крышки 4 и металлизированного слоя керамического изолятора.

**Тонкопленочные ИМС** – микросхемы, элементы которых выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрического материала. Элементы тонкопленочных микросхем наносятся преимущественно методами вакуумного напыления, с помощью тонкопленочной технологии изготавливают в основном пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и индуктивности), а также пленочные проводники и контактные площадки. На рис. 20 показана тонкопленочная микросхема, которая является пассивной частью гибридной микросхемы.

**Гибридные ИМС** – микросхемы, состоят из пассивных элементов, полученных тонкопленочной технологией; и навесных элементов любого назначения (транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы и т. д.). Преимущество гибридных микросхем состоит в том, что они дают возможность сочетать достоинство пленочной технологии с высокими электрическими параметрами навесных элементов.

Пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), контактные площадки для монтажа навесных элементов, пленочные проводники, а также навесные элементы 1 размещены на подложке 2. Она представляет собой прямоугольную пластину толщиной 0,2–1,6 мм. Одна сторона подложки, на которую наносят пленочный рисунок, является рабочей. Подложка крепится на основание корпуса 5. Соединение между

элементами внутри микросхемы, а также соединение контактных площадок микросхемы с внешними выводами 7 корпуса осуществляется проводниками 6, герметизация корпуса – сваркой плавлением кромок крышки 4 и основания корпуса 5.

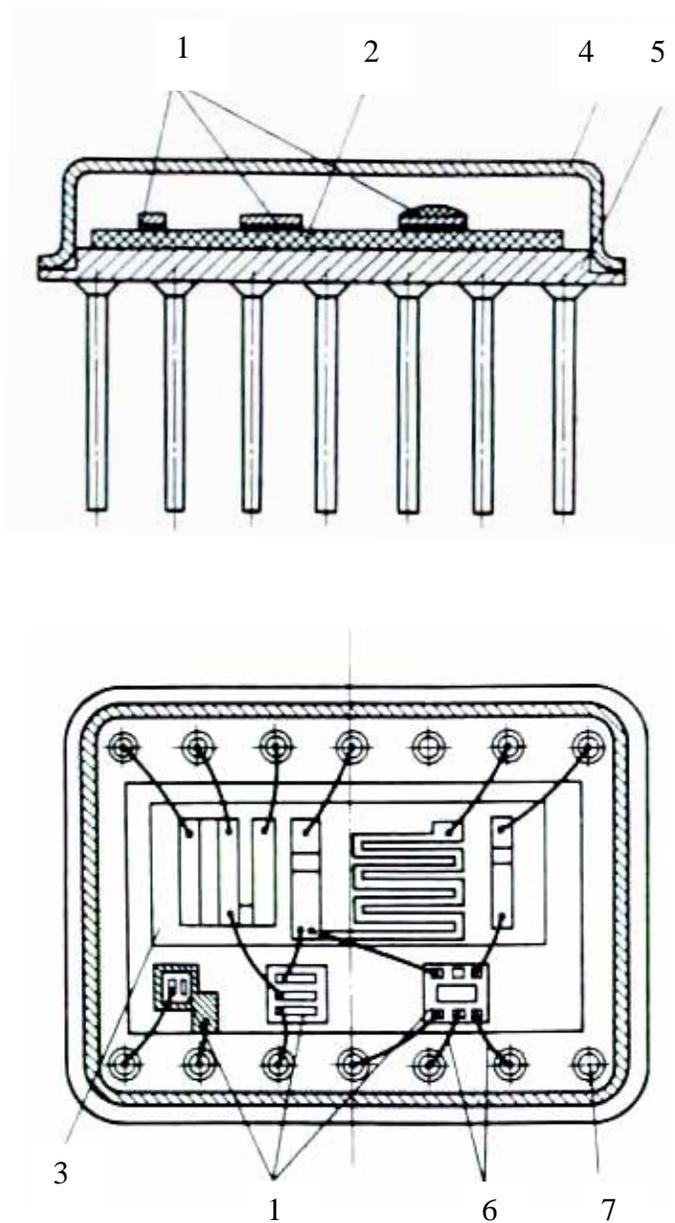


Рис. 20. Гибридная микросхема: 1 – навесные элементы, 2 – подложка, 3 – пассивная часть микросхемы, 4 – крышка корпуса, 5 – основание корпуса, 6 – соединительные проводники, 7 – внешний вывод

Условия эксплуатации электронных приборов. Изделия электронной техники всегда работают при определенном комплексе внешних воздействий.

Все внешние воздействия можно подразделить на естественные и искусственные.

Искусственные и естественные воздействия вызывают сложные необратимые процессы в электронных приборах, которые могут привести к отказам в процессе их эксплуатации или хранения. Поэтому электронные приборы после их изготовления подвергаются испытаниям, которые воспроизводят условия их эксплуатации.

**К естественным** внешним воздействиям относятся воздействия теплоты, холода, влажности, осадков, пыли, морского тумана, ветра, пониженного атмосферного давления, солнечной радиации и биологических факторов.

Искусственные внешние воздействия возникают во время перевозок или работы электронных приборов в аппаратуре на подвижных объектах, а также вблизи источников ядерных излучений. Они могут проявляться в виде ударов, вибраций, линейных перегрузок, невесомости, звуковых колебаний, ядерной радиации и др.

Условия эксплуатации электронных приборов можно подразделить на нормальные, наземные естественные, наземные транспортные и условия на высотных самолетах, ракетах и космических объектах.

Под **нормальными** условиями работы изделий электронной техники понимают такие, при которых температура воздуха равна 15–25 °С, относительная влажность воздуха 45–75 %, атмосферное давление  $(9,6–10,6) \times 10^4$  Па, отсутствуют механические воздействия, влияние пыли и песка, атмосферных осадков и ядерной радиации, биологических факторов и др.

**Наземные естественные условия** – это условия пустынь, горных районов, тропиков, полярных районов, морского климата и др.

Условия эксплуатации приборов на наземных транспортных средствах зависят от вида транспортного средства (автомобили, корабли, танки и др.). Существенно отличаются также условия эксплуатации различных типов бортовой электронной аппаратуры самолетов, ракет и космических объектов.

Конкретные характеристики внешних воздействий для электронной аппаратуры различного назначения оговариваются в стандартах и нормалях. Климатические условия в разных точках земного шара различны. Зоны умеренного климата простираются примерно между широтами от 40 до 65°. Ухудшение параметров и снижение работоспособности электронных приборов в этой зоне по сравнению с нормальными условиями меньше, чем в других зонах.

В зоне пустынь температура воздуха от +60 до -10 °С с суточным перепадом до 40 °С. Значение относительной влажности воздуха 10 % (ночью). Характерным для зоны пустынь является повышенная интенсивность солнечного излучения и наличие пыли и песка.

Районы тропического климата характеризуются постоянно повышенной температурой воздуха (25–40 °С) и высокой влажностью (выше 90 % ночью и 70–80 % днем). В приморских тропических районах высокие относительная влажность и температура могут сохраняться в течение длительного времени, что создает благоприятные условия для интенсивной коррозии металлов.

Районы морского климата характеризуются небольшими изменениями температуры, повышенной влажностью воздуха, дождями, туманами, соленой водяной пылью.

Районы Арктики и Антарктиды отличаются низкими температурами воздуха (до -70 °С) и низкой абсолютной влажностью воздуха.

Высотные условия характеризуются тем, что температура воздуха снижается на 6,5 °С через каждый 1 км подъема на высотах до 11 км (верхняя граница тропосферы). На высотах 11–25 км она равна -56,5 °С, затем возрастает, достигая на высотах 48–53 км +10 °С, далее снова снижается и на высоте более 75 км достигает -75 °С. Сила ветра повышается в тропосфере и уменьшается в стратосфере.

Атмосферное давление при подъеме на первые 1000 м снижается примерно на 0,13 Па на каждые 10 м, при дальнейшем подъеме – в геометрической

прогрессии, достигая на высоте 10 км примерно 26 Па, на высоте 20 км – около 5,5 Па и на высоте 40 км – около 0,27 Па.

Из искусственных внешних воздействий наиболее часто приборы подвергаются вибрации. Вибрация – это механический колебательный процесс, который характеризуется рядом параметров, основными из которых являются амплитуда и частота.

Параметры вибрации, воздействующие на электронную аппаратуру, зависят не только от объекта, на котором она эксплуатируется, но и от места ее установки на объекте. Так, например, размещаемые в фюзеляже самолета электронные приборы испытывают вибрацию с частотой от 3 до 50 Гц и амплитудой от 2 до 0,75 мм соответственно. В месте установки двигателей вибрация характеризуется частотой 10–500 Гц и амплитудой 0,35–0,025 мм соответственно. Ракетные двигатели создают вибрацию с частотами до нескольких тысяч герц.

Механические удары возникают при резком и быстром изменении ускорения, скорости или направления перемещения объектов, на которых устанавливается электронная аппаратура. Интенсивность ударных воздействий на электронные изделия при эксплуатации зависит от объекта, на котором они установлены, места и способа их установки. Значительные удары возникают при формировании железнодорожных составов, во время посадки самолета, при швартовке кораблей, при запуске ракет, при столкновении снарядов с броней танков.

Интенсивность ударных воздействий характеризуется амплитудой и длительностью импульса ускорения изделия. Отношение амплитуды импульса ускорения к ускорению силы тяжести называется перегрузкой.

При эксплуатации изделий ударные ускорения могут достигать 5g (g – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ) на самолетах и танках, 10g – в кузовах движущихся автомобилей, 15g – на кораблях большого тоннажа, 25g – при аварийной посадке самолетов.

## 1.2. Типовые технологические схемы изготовления электронных приборов

### Типовая технологическая схема производства электривакуумных приборов

Проанализируем основные операции изготовления электривакуумных приборов (ЭВП) на примере типовой конструкции прибора (рис. 21), содержащей все элементы реальных приборов.

Прибор содержит трубчатый оксидный катод. КERN катода изготовлен из никеля, активное покрытие – двойной карбонат ( $BaCO_3$ ,  $SrCO_3$ ), внутри которого размещен подогреватель (спираль из тугоплавкого металла, покрытая алундовой изоляцией). Электроны, вылетающие с катода, попадают на анод. Для управления потоком электронов между катодом и анодом располагается управляющий электрод (сетка). Для создания рабочей среды прибора (вакуума) все элементы прибора помещают в корпус – оболочку.

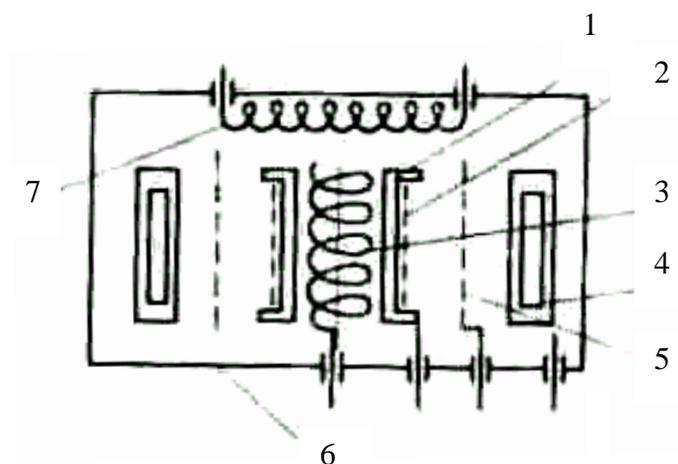


Рис. 21. Схема типовой конструкции электривакуумного прибора:  
1 – кERN катода, 2 – активное покрытие катода, 3 – подогреватель, 4 – анод, 5 – сетка,  
6 – корпус, 7 – газопоглотитель

Для поддержания вакуума в приборе во время его хранения и эксплуатации во внутренней полости имеется важный элемент прибора – газопоглотитель. Внутри корпуса находятся также вспомогательные детали арматуры (никелевые перемычки, слюдяные и керамические изоляторы,

молибденовые траверсы и т. д.), необходимые для соединения основных узлов прибора (на рисунке не показаны).

Структурная схема процесса изготовления ЭВП представлена на рис. 22.

При производстве электровакуумного прибора можно выделить несколько характерных этапов.

На первом этапе создают материалы электровакуумных приборов. На специализированных металлургических заводах традиционные металлы перерабатываются путем вакуумного переплава с целью удаления из них вредных примесей, газов и различного рода дефектов. Далее эти материалы поступают на завод-изготовитель приборов, где они подвергаются входному контролю, чтобы исключить попадание в производство некачественных. На следующем этапе исходные материалы и полуфабрикаты (прокат, трубка, проволока и т. п.) подвергаются операциям формообразования, в результате которых получают отдельные конструктивные элементы прибора – детали.

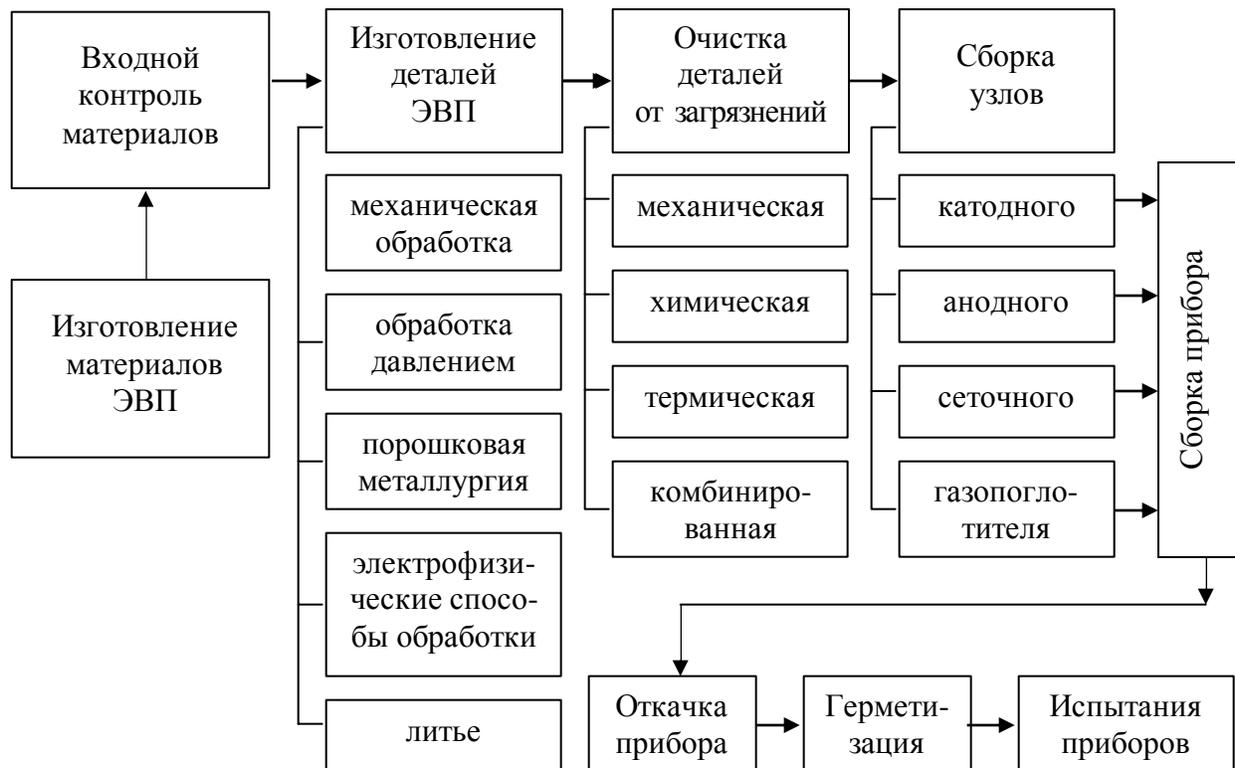


Рис. 22. Структурная схема изготовления ЭВП

Затем полученные детали подвергаются очистке для удаления механических и химических загрязнений и обезгаживанию. Очищенные детали поступают на сборку первой ступени (катодного, анодного, сетчатого узлов и узла газопоглотителя). Далее отдельные узлы приборов собирают в единую конструкцию, т. е. создают условия для выполнения заключительных операций. Прибор помещают на откачной пост и производят откачку. В процессе откачки удаляется атмосферный воздух из вакуумной полости прибора, осуществляются прогрев и обезгаживание внутренних деталей, активировка катода, распыление газопоглотителя. Иногда без снятия прибора с откачного поста производят тренировку прибора, в результате которой им приобретаются стабильные электрические параметры. Далее производят герметизацию прибора путем пережима штенгеля, при этом прибор снимается с откачного поста. Производство прибора завершается его испытаниями.

Следует отметить, что сборочные операции, выполняемые с помощью сварки и пайки, производятся на заключительных этапах изготовления прибора, когда в его производство вложены значительные затраты. Поэтому брак на этих операциях приведет к большим потерям.

Типовая технологическая схема производства полупроводниковых приборов и микросхем. Основой производства большинства современных полупроводниковых приборов является планарная технология. Рассмотрим особенности этой технологии на примере типовой конструкции полупроводникового прибора (рис. 23). Прибор состоит из кристалла 1, который крепится к основанию корпуса 4. Кристалл с внешними электрическими цепями соединяют через проводники 6 и внешние выводы 2, изолированные от основания корпуса с помощью изоляторов 3. Герметизируют корпус присоединением крышки 5 к его основанию.

Структурная схема процесса изготовления полупроводникового прибора представлена на рис. 24. Анализ различных вариантов технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов и микросхем позволяет

представить производство полупроводниковых приборов в виде последовательности сравнительно небольшого числа технологических операций.

Основой прибора является пластина полупроводникового материала, получаемая из слитка с последующей обработкой ее поверхности.

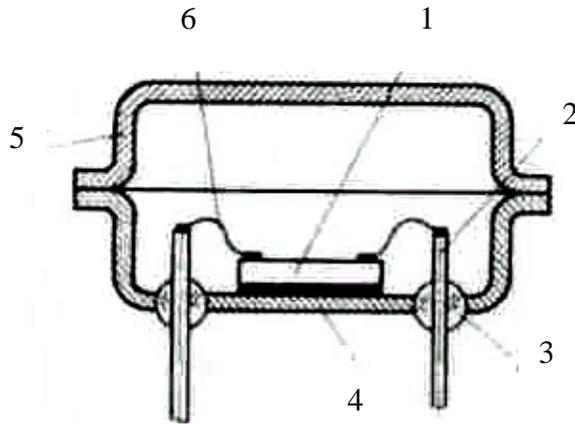


Рис. 23. Схема конструкции полупроводникового прибора:  
1 – кристалл, 2 – внешний вывод, 3 – изолятор, 4 – основание корпуса, 5 – крышка корпуса,  
6 – соединительные проводники

На пластине с помощью планарной технологии формируют сотни и даже тысячи структур будущих приборов (в частности, интегральных микросхем) со всеми соединительными проводниками и контактными площадками. Для этого используют операции создания р-п-переходов (диффузию, ионную имплантацию, эпитаксию), формирования рисунка заданной конфигурации (фотолитографию, селективное травление и др.), нанесения защитных, резистивных и токопроводящих пленок (методы вакуумного напыления и др.).

После соответствующего контроля приборов пластину разделяют на отдельные кристаллы скрайбированием или резкой алмазными дисками. Годные кристаллы поступают на сборку. Процесс сборки заключается в закреплении кристалла на основании корпуса, присоединении выводов к металлическим контактными площадкам на кристалле и к внешним выводам корпуса, а также в герметизации прибора. Все эти операции являются заключительными и требуют особой тщательности их выполнения.



Рис. 24. Структурная схема процесса изготовления полупроводникового прибора

### 1.3. Особенности сварки и пайки деталей и узлов электронных приборов

Основные сложности, возникающие при сварке и пайке изделий электронной техники, связаны с применением в них широкого спектра материалов, резко отличающихся по своим свойствам. Возникает необходимость соединять эти материалы не только в однородном сочетании, но и получать соединения разнородных материалов: металлов, металла со стеклом и керамикой, металла с полупроводником и т. д.

При этом необходимо обеспечить высокую прочность соединений при статических и динамических нагрузках, электропроводность, теплопроводность, вакуумную плотность.

Получение высоконадежных сварных и паяных соединений осложняется рядом конструкторских требований – необходимостью соединять детали малых размеров (вплоть до 20 мкм) и детали с разной толщиной соединяемых кромок (20 мкм+1 мм), выполнять соединения в труднодоступных местах и вблизи термочувствительных элементов прибора (например, металлокерамических и металлоглазанных спаев).

Требование вакуумной плотности и высокой чистоты соединения и близлежащих участков деталей потребовало применения способов сварки и пайки, исключающих загрязненные поверхности деталей трудноудаляемыми окислами и остатками флюса. Для соединения деталей электронных приборов применяют способы сварки и пайки, осуществляемые в защитных газах или в вакууме. Для пайки деталей электровакуумных приборов используют припой, не содержащие летучих в вакууме элементов – цинка, кадмия, висмута, свинца, фосфора.

Предъявляются высокие требования к подготовке поверхности деталей перед соединением, а также к чистоте помещений, оборудования, приспособлений и оправок.

Важной особенностью является то, что сварка и пайка деталей и узлов применяются на завершающей стадии сборки электронных приборов и возникающие при этом нагрузки не должны оказывать влияния на их работоспособность.

#### **1.4. Классификация способов сварки и пайки**

Сварка и пайка представляют собой процессы создания неразъемных соединений деталей, важнейшие операции сборки деталей в узлы и целые конструкции. Сегодня в промышленность внедрены десятки способов сварки и пайки, появляются новые способы, совершенствуются старые. Но прежде чем эти способы соединения заняли свое место в современной технике, они прошли долгий путь развития.

Способ получения неразъемных соединений деталей путем сварки и пайки был известен людям в глубокой древности. В египетских пирамидах были найдены золотые изделия, которые имели паяные оловом соединения.

Значительного совершенства в древности достигла кузнечная сварка. При кузнечной сварке металл нагревается до состояния пластичности, а затем проковывается в местах соединения. Этот способ сварки позволил создать кольчугу – средство защиты воина. Кольчуга состоит из 10–20 тысяч сварных колец.

Но быстрое развитие сварки началось только в конце XIX в. Наши соотечественники Н. Н. Бенардос и Н. Г. Славянов первыми в мире применили электрическую дугу для сварки металлов.

Интенсивная разработка новых способов сварки и пайки и их внедрение в промышленность начались позднее – в середине XX в. В это время возникла необходимость соединять элементы конструкций толщиной от нескольких микрометров до нескольких метров из весьма разнообразных материалов.

Чтобы получить прочное соединение твердых тел, нужно обеспечить взаимодействие их поверхностных атомов. Для этого последние необходимо сблизить настолько, чтобы между ними могли возникнуть межатомные связи, т. е. на расстояние порядка атомных радиусов. В жидкостях это достигается сравнительно легко, за счет подвижности частиц, но сблизить атомы твердых тел значительно труднее. Поверхность твердого тела даже после тщательной обработки имеет неровности – выступы и впадины, размеры которых по сравнению с размерами атома огромны. При соединении поверхностей двух твердых тел их фактическое соприкосновение происходит лишь в отдельных точках. Возможность сцепления атомов соприкасающихся металлов затрудняется еще и тем, что в обычных условиях их поверхности всегда покрыты пленками оксидов, адсорбированных газов, всевозможных загрязнений. Эти пленки как броня защищают поверхности металлов от взаимодействия.

Существующие в настоящее время способы сварки можно подразделить на две основные группы (по состоянию соединяемых кромок в процессе сварки). К первой группе относятся способы, при которых металлы свариваются в твердом состоянии при совместной пластической деформации, часто одновременно с дополнительным нагревом (способы сварки давлением). Ко второй группе относятся способы, при которых металлы в месте соединения расплавляются (способы сварки плавлением).

Промежуточное положение между сваркой плавлением и сваркой давлением занимает пайка. Соединяемые кромки деталей в процессе пайки не расплавляются, т. е. находятся в твердом состоянии, как при сварке давлением. Между соединяемыми кромками изделия вводится промежуточный металл – припой, который плавится при более низкой температуре, чем соединяемые металлы. Припой в жидком виде заполняет зазор между поверхностями соединяемых деталей под действием капиллярных сил, а, застывая, кристаллизуется, образуя прочные связи.

Не все известные способы сварки и пайки применяются при изготовлении электронных приборов. На рис. 25 показаны те из них, которые в основном используются при производстве приборов этого класса.

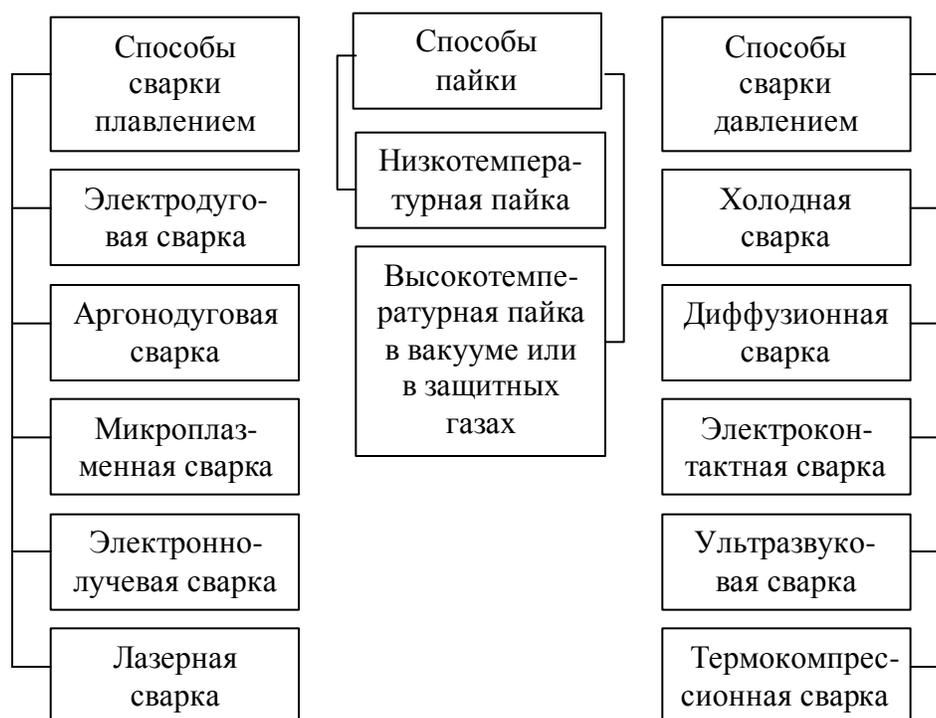


Рис. 25. Основные способы сварки и пайки, используемые при сборке электронных приборов

## **Контрольные вопросы**

1. Какие элементы радиоэлектронной аппаратуры относятся к изделиям электронной техники?
2. На какие группы делятся электровакуумные приборы?
3. Какие приборы входят в класс дискретных полупроводниковых приборов?
4. Что называется интегральной микросхемой?
5. На какие группы делятся интегральные микросхемы по технологии их изготовления?
6. В каких условиях эксплуатируются электронные приборы?
7. Какое место занимают процессы сварки и пайки в технологической цепочке изготовления электровакуумных и полупроводниковых приборов?
8. На какие основные группы подразделяются все способы сварки?
9. Какое место в классификации способов получения неразъемных соединений занимает пайка?

## ГЛАВА 2. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

### 2.1. Образование соединений при сварке плавлением

Сварка плавлением – технологический процесс получения неразъемного соединения, основанный на локальном расплавлении свариваемых кромок, образовании общей сварочной ванны с последующей кристаллизацией металла шва.

Для образования соединения методами сварки плавлением необходимо сначала подготовить материал. Сварка – сложный и быстро протекающий физико-химический процесс образования соединения, поэтому для получения хорошего конечного результата необходимо действовать по принципу известной поговорки: «семь раз отмерь, один раз отрежь». Поспешность в подготовке к сварке, сварка с упованием на «авось», как правило, приводят к образованию дефектных швов, к браку выпускаемой продукции. Наоборот, тщательно подготовленные под сварку заготовки и продуманный заранее во всех деталях и хорошо отрепетированный процесс делает саму сварку легкой, быстрой и приятной операцией, а сварные швы – качественными и красивыми. Успешные и очень сложные эксперименты по ручной сварке в открытом космосе, проведенные советскими космонавтами С. Е. Савицкой и В. А. Джанибековым в 1984 г., явились следствием тщательно продуманной технологии, подготовки образцов и оборудования, а также длительных сварочных тренировок космонавтов перед полетом.

Как известно, твердое тело представляет собой «агрегат» атомов, находящихся во взаимодействии, а его физические характеристики определяются их взаимным расположением (кристаллической решеткой) и химическими связями, действующими между ними. Поэтому соединение сваркой твердых тел можно представить как образование прочных и устойчивых химических связей между атомами соединяемых элементов. Общая схема методов сварки плавлением (рис. 26) может быть представлена рядом последовательных стадий состояния металла в зоне сварки: 1 – элементы

собраны под сварку и закреплены в нужном положении относительно друг друга, но между ними остается зазор (поэтому химические связи в зоне стыка полностью отсутствуют); 2 – на поверхность металла в зоне стыка воздействует мощный концентрированный поток тепловой энергии  $q$ , что позволяет нагреть кромки металлов выше температуры плавления. Расплавленный металл обеих кромок сливается, образуя общую ванночку из жидкого металла (сварочную ванну), которая удерживается на частично оплавленных краях. Зазор между заготовками исчезает. Химические связи в жидком металле близки к химическим связям твердого тела, поэтому стадию принято называть образованием физического контакта; 3 – при прекращении теплового воздействия на кромки свариваемых элементов (выключение источника или перемещение его вдоль кромок) охлаждается зона сварки за счет передачи теплоты вглубь свариваемых элементов и в окружающую среду.

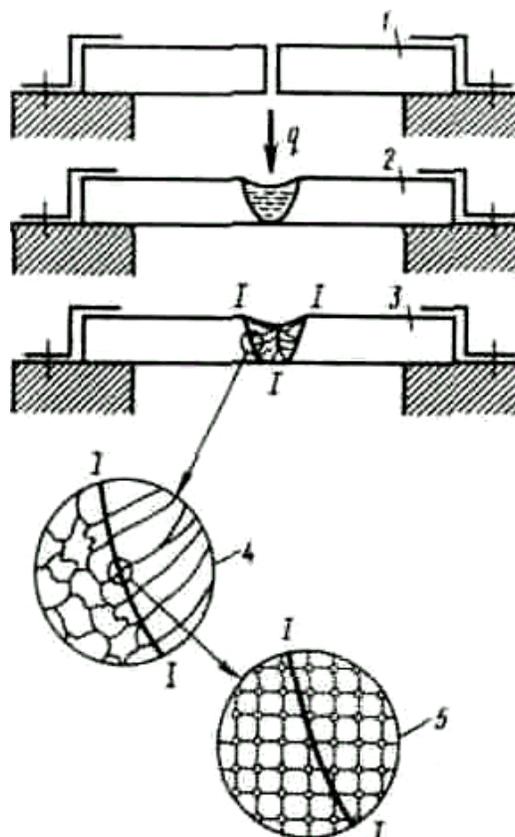


Рис. 26. Схема стадий образования соединения сваркой плавлением: 1 – сборка под сварку; 2 – образование сварочной ванны под воздействием источника теплоты; 3 – кристаллизация ванны с образованием сварного соединения; 4 – макроструктура зерен на границе шва; 5 – «стыковка» кристаллических решеток на границе плавления

Происходит кристаллизация металла сварочной ванны с образованием литой структуры шва, т. е. создание химических связей по сечению сварного соединения (I-I). Частично оплавленные зерна основного металла на границе сварочной ванны являются основанием для «пристройки» атомов 4, 5 из жидкости при кристаллизации шва.

При сварке встык (рис. 27, а) и в ряде других случаев для восполнения основного металла I, идущего на заполнение зазора, а также для некоторого утолщения шва и придания ему большей прочности или для изменения химического состава шва в сварочную ванну вводят со скоростью  $V_{\text{пп}}$  дополнительный металл в виде проволоки (ленты, порошка), который называют присадочным.

Обычно при сварке плавлением швы III имеют протяженность, значительно превышающую размеры сварочной ванны II, поэтому процесс ведут, непрерывно перемещая источник теплоты  $q$  относительно свариваемых кромок со скоростью  $V_{\text{св}}$ .

Кромки последовательно и непрерывно плавятся в зоне перед источником по границе а-б-в. Затем кристаллизуется сварочная ванна за источником теплоты по границе г-д-е.

Конвективные потоки в сварочной ванне, вызываемые как механическим воздействием источника теплоты на жидкий металл, так и неравномерностью нагрева, способствуют интенсивному перемешиванию металла ванны и выравниванию его химического состава по сечению шва. В среднем отдельные микрообъемы металла находятся в жидком состоянии 3–60 с в зависимости от режимов сварки, при этом температура сначала возрастает от температуры плавления до некоторого максимального значения в пятне нагрева (3000–3300 К), а затем снижается до температуры кристаллизации.

В качестве источника тепловой энергии используют дуговой разряд, поток плазмы, сфокусированный поток электронов или фотонов, теплоту химических реакций.

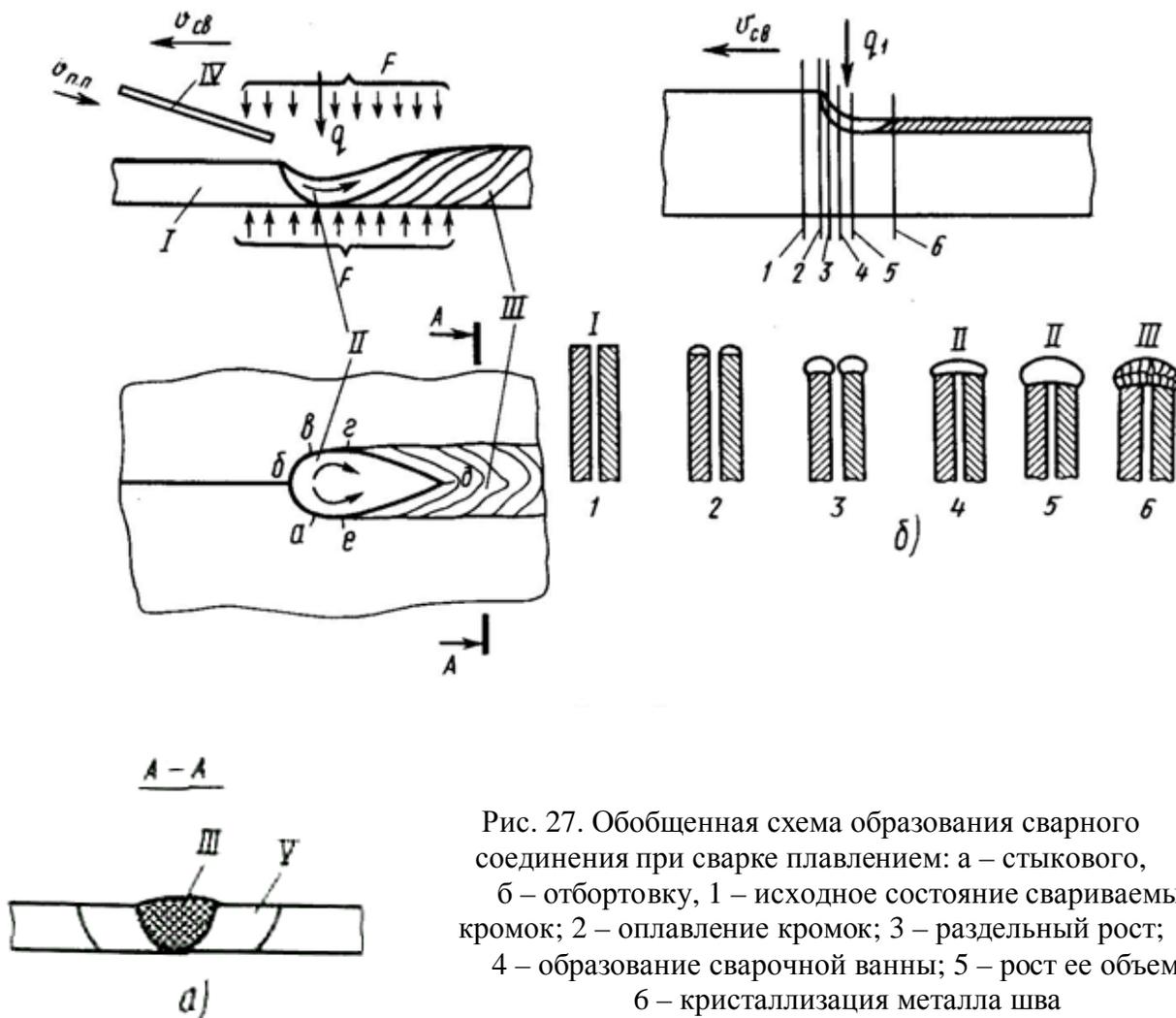


Рис. 27. Обобщенная схема образования сварного соединения при сварке плавлением: а – стыкового, б – отбортовку, 1 – исходное состояние свариваемых кромок; 2 – оплавление кромок; 3 – отдельный рост; 4 – образование сварочной ванны; 5 – рост ее объема; 6 – кристаллизация металла шва

По источнику тепловой энергии обычно называют способ сварки (дуговая, электронно-лучевая и т. д.).

При сварке плавлением изделий малых размеров и толщины используют метод сварки соединений в отбортовку (рис. 27, б). В этом случае можно выделить стадии процесса: 1, 2, 3 – нагрев источником  $q$ , перемещающимся со скоростью  $V_{cb}$ , кромок и их отдельное плавление с перемещением расплавленного металла в «хвостовую» часть соединения за счет механического воздействия источника на жидкий металл; 4, 5 – объединение оплавленных кромок металла, образование общей сварочной ванны и увеличение ее объема; 6 – остывание и кристаллизация расплавленного металла по мере удаления источника теплоты.

Форма шва в поперечном сечении определяется суммарным воздействием сил тяжести, поверхностным натяжением и механическим воздействием источника нагрева. При сварке в отбортовку кромок толщиной менее 0,5 мм форма шва в поперечном сечении приближается к полукругу.

Однако, следует учитывать, что процесс образования сварного соединения связан с использованием мощных и концентрированных источников теплоты, с нагревом части металла выше температуры плавления, с интенсификацией химической активности свариваемого материала и окружающей среды. Поэтому, одновременно с основным процессом, в зоне сварки протекает и ряд дополнительных, сопутствующих процессов, которые оказывают непосредственное влияние на качество сварного соединения, так как определяют химический состав, структуру, уровень напряжений и деформаций в сварном соединении, а также наличие или отсутствие в нем дефектов.

Тепловые процессы. Источники теплоты, применяемые при сварке плавлением, кроме расплавления кромок свариваемого металла, вызывают целый ряд сопутствующих явлений и прежде всего, нагрев основного металла в околошовной зоне (зоне, прилегающей к сварочной ванне). Установлено, что на образование непосредственно сварочной ванны, на расплавление кромок расходуется менее половины той теплоты, которая воспринимается нагреваемым телом от источника.

Большая часть теплоты источника расходуется на нагрев околошовной зоны (см. зону V на рис. 27, а). Если построить зависимость распределения температуры максимального нагрева свариваемого металла по сечению сварного соединения в один проход при сварке плавлением (рис. 28, а), то можно заметить, что значительный объем основного металла оказывается нагретым до весьма высоких температур. При этом в любой точке сварного соединения процесс распространения теплоты состоит из стадий нагрева и охлаждения.

Поэтому любая точка свариваемого соединения сначала от комнатной температуры нагревается до максимальной температуры данного сечения, а

затем постепенно охлаждается до комнатной температуры, замыкая цикл изменения температуры во времени (термический цикл) (рис. 28, б).

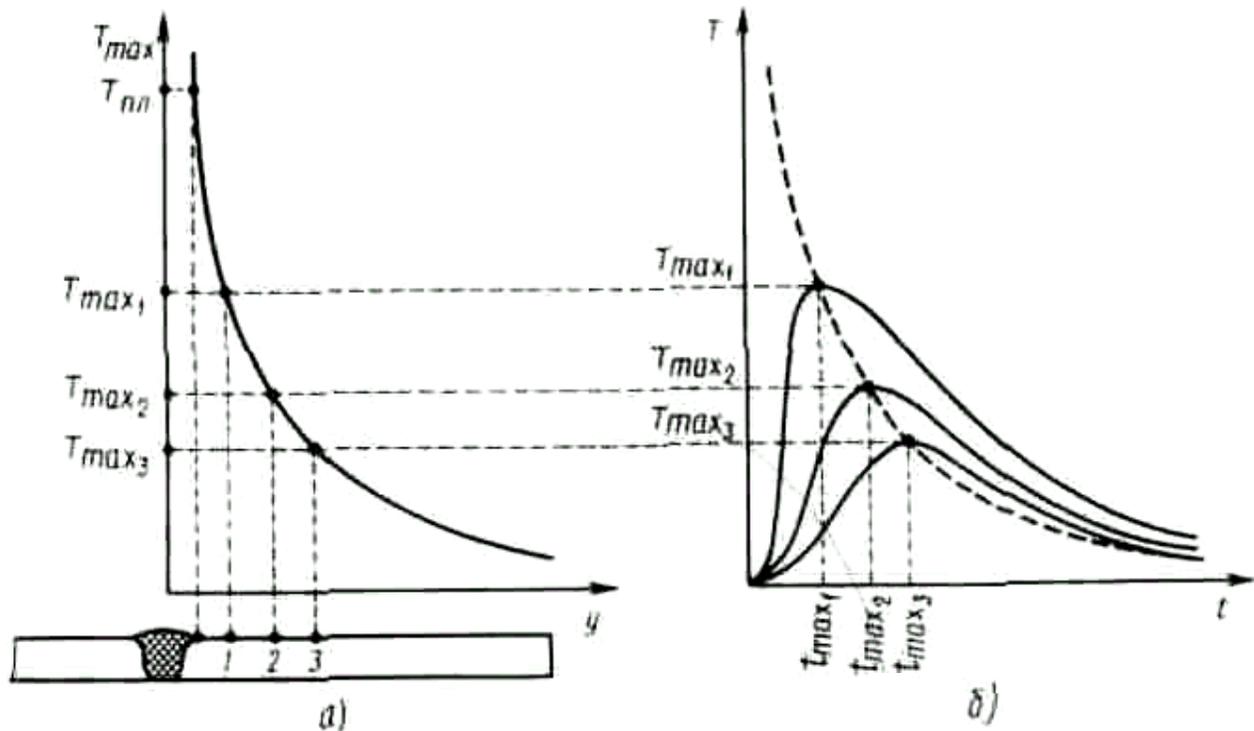


Рис. 28. Распределение температур максимального нагрева по сечению сварного соединения (а) и термические циклы разноудаленных точек (б):  $t_{max1}$ ,  $t_{max2}$  ... – максимальные температуры нагрева точек 1, 2... соответственно;  $t_{max1}$ ,  $t_{max2}$ ... – время достижения максимальной температуры в точках 1, 2 ...

Термические циклы точек, разноудаленных от оси шва, отличаются по значению максимальной температуры, времени ее достижения (по скорости нагрева), а также по скорости охлаждения.

Следствием такого своеобразного термического воздействия является то, что в околошовной зоне в зависимости от режимов нагрева и охлаждения, т. е. в зависимости от режимов процесса, можно получить слои металла, значительно отличающиеся друг от друга по структурному состоянию и механическим свойствам. Например, при сварке углеродистой стали структура последовательно меняется от литой (шва) до крупнозернистой (перегрева с закалочной структурой), постепенно переходящей в мелкозернистую (нормализации), а затем снова в крупнозернистую (рекристаллизации) и, наконец, в структуру с вытянутыми зёрнами проката без последствий

термической обработки (околошовная зона). Общая ширина всех зон зависит от метода и режимов сварки и может составлять от сотых-десятых миллиметра (при лазерной сварке) до десятков миллиметров (при газовой сварке).

Металлургические процессы. К металлургическим процессам относят:

- образование сварного шва, т. е. плавление основного и присадочного металлов, формирование сварочной ванны и ее первичную кристаллизацию;
- взаимодействие расплавленного, перегретого металла с элементами и соединениями окружающей среды, т. е. различные химические реакции, оказывающие влияние на состав металла шва, а также распределение в нем отдельных элементов и химических соединений.

Первые процессы определяют размеры шва и являются основными при формировании сварного соединения, а вторые – сопутствующими.

Характер оплавления кромок соединения определяется прежде всего видом сварного соединения и тепловым воздействием на него источника нагрева. Объем расплавленного металла и граница максимальной ширины и глубины расплавления определяют поперечные размеры шва.

Основными видами соединений под сварку являются стыковые, угловые, нахлесточные, заклепочные, в отбортовку (рис. 29). В зависимости от степени тепловой сосредоточенности источника нагрева и характера взаимодействия его с основным металлом ширина ванны и глубина проплавления могут быть различны, а очертания могут меняться от широкого и мелкого до узкого и глубокого – кинжального (рис. 30).

Поскольку остывание шва идет за счет теплопередачи через его границу, рост кристаллов в нем происходит в основном по направлению, перпендикулярному границе расплавления, а размеры первичных кристаллов определяются размерами частично оплавленных зерен основного металла на границе расплавления.

Таким образом, размеры зерен литой структуры шва связаны с размерами зерен основного металла, а их направленность связана с формой проплавления.

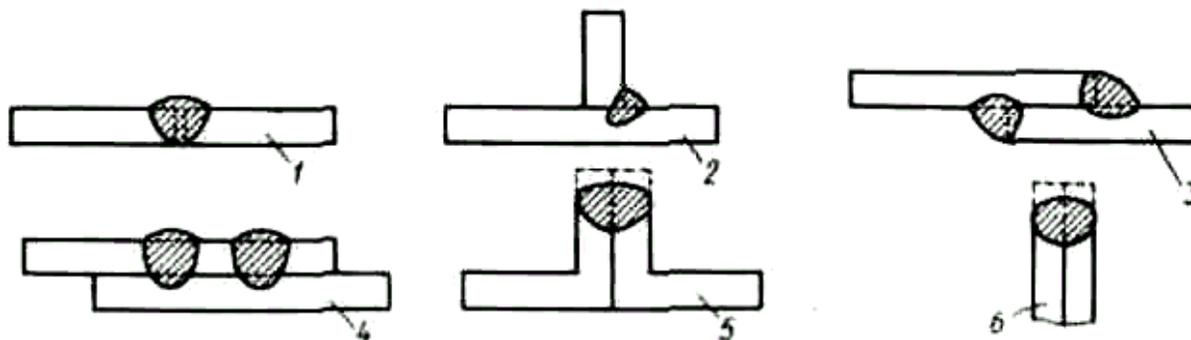


Рис. 29. Основные виды сварных соединений:  
 1 – стыковое; 2 – угловое; 3 – нахлесточное; 4 – заклепочное; 5, 6 – в отбортовку



Рис. 30. Разновидности характера проплавления металла при сварке:  
 1 – широкое; 2 – глубокое; 3 – кинжальное

Металлургические процессы, связанные с химическими реакциями, – это прежде всего взаимодействие расплавленного металла с газами. Несмотря на то, что при производстве изделий электронной техники широко используют инертные защитные среды и вакуум, реакции расплавленного металла с кислородом, азотом и водородом могут протекать и существенно влиять на свойства сварных соединений. Например, источником азота в высокотемпературной области сварки может быть свариваемый металл, в котором азот присутствует как примесь; а также остатки воздуха или его подсос в зону сварки. Кислород и водород, кроме того, попадают в зону сварки как составляющие (в чистом виде и в виде соединений: окислов, гидридов, масел, пыли, органики и т. п.) сложных газов и поверхностных загрязнений металла.

Повышение концентрации этих газов в металле шва приводит к образованию химических соединений (оксидов, нитридов, гидридов), которые,

как правило, снижают пластические свойства металла, делают его более хрупким, плохо воспринимающим динамические нагрузки и пластическое деформирование. Повышение содержания любого из таких газов в сварочной ванне приводит также к образованию в кристаллизующемся металле газовых включений в виде пузырей – пористости, а водород, способный к активному диффузионному перемещению в сварном соединении, может накапливаться в отдельных его зонах и, увеличивая давление в микродефектах, образовывать микро- и макротрещины в шве и околошовной зоне.

Таким образом, при сварке плавлением необходимо ограничивать содержание в металле шва кислорода, азота и водорода. Этого добиваются прежде всего тщательным выбором материалов (по содержанию в нем газов) перед сваркой и подготовкой их под сварку: уменьшением содержания газов на поверхности кромок, проволоки и в защитной атмосфере. Кроме того, при сварке происходят металлургические реакции, которые способствуют дегазации шва: раскисление, обезводороживание.

В результате таких реакций кислород и водород связывают в нерастворимые в металле соединения и переводят кислород в шлаковую или газовую фазу на поверхность шва, а водород – в газообразные соединения, нерастворимые в жидком металле.

При сварке плавлением необходимо удалять вредные, примеси (серу, фосфор, а в некоторых случаях углерод, медь, олово, свинец и др.), повышенное содержание которых в свариваемом металле, как правило, приводит к перераспределению их в структуре шва, а также скоплению в прослойках между зернами, что увеличивает хрупкость швов.

Испарение металла. Неразрывно связанными с металлургическими являются процессы перехода части металла в парообразную фазу. Тепловая энергия, сообщаемая свариваемым металлам, оказывается достаточной для их испарения. Поэтому в зоне сварки значительная часть металла находится в парообразном состоянии, что, с одной стороны, резко увеличивает интенсивность протекания химических реакций металла с элементами

защитной среды, а с другой – создает неблагоприятные условия для ведущего сварку человека. Это связано с тем, что пары большинства металлов, покидающие зону сварки и образующие с кислородом воздуха парообразные окислы, чрезвычайно токсичны.

Количество вещества, испаряющегося из сплава, пропорционально не только его концентрации в растворе, но и способности к испарению. Как показали расчеты и эксперименты профессора А. А. Алова, на примере сварки стали с содержанием 1 % марганца. При температуре 2273 К газообразная фаза вокруг дуги состоит из 50 % железа и 50 % марганца. Поэтому состав металла шва значительно отличается от состава исходных материалов.

Диффузионные процессы. Высокотемпературный нагрев и плавление интенсифицируют протекание диффузионных процессов в зоне сварки. Как известно, скорость диффузии зависит от разности концентраций диффундирующих элементов в материале. Поскольку в зоне сварки имеются зоны неравномерно нагретого материала, то на процессы диффузии различных элементов оказывает существенное влияние их растворимость в основном металле в зависимости от температуры и от фазового состояния этих элементов.

Обычно растворимость большинства элементов в жидком металле значительно больше, чем в твердом, поэтому при образовании сварочной ванны создаются условия для их интенсивной диффузии из околошовной зоны в сварочную ванну, что в итоге создает градиент концентрации – у границы шва после затвердевания металла.

Таким образом, диффузионные процессы отрицательно сказываются на качестве шва при сварке плавлением.

Сварочные напряжения и деформации. Местный (сосредоточенный) высокотемпературный нагрев изделия при сварке плавлением вызывает еще один важнейший процесс – возникновение напряжений и деформаций в сварном соединении.

Температуры распределяются по сечению соединения (см. рис. 28) неравномерно, поэтому линейное температурное расширение, описываемое формулой  $\Delta l = VaTl_0$ , где  $\Delta l$  – удлинение участка соединения при нагреве до температуры  $T$ ;  $l_0$  – его длина при температуре  $T_0$ ,  $a$  – коэффициент линейного расширения материала, для каждого слоя будет разным. Относительное удлинение  $\varepsilon = (\Delta l / l_0)100\%$  пропорционально его температуре.

Неравномерный нагрев вызывает неравномерное объемное термическое расширение металла, однако, так как ненагретые его части, а также затвердевшие части шва препятствуют этому расширению, то в нагретой зоне возникает пластическая деформация сжатия. Поскольку в зоне высоких температур (для сталей 873 К и выше) предел текучести материала практически равен нулю, усадка зоны не встречает сопротивления.

При охлаждении начинает развиваться обратный процесс, которому препятствуют ненагретые участки соединения, приводящий к развитию растягивающих напряжений в зоне высокотемпературного нагрева. Уровень остаточных растягивающих напряжений в зоне шва, как правило, превышает предел текучести материала, т. е. вызывает остаточную деформацию растяжения. Растягивающие напряжения образуются по трем пространственным осям относительно шва и уравниваются как в объеме конструкции (напряжения I рода), так и в объеме отдельных зерен (напряжения II рода) и отдельных кристаллических блоков (напряжения III рода).

Остаточные деформации приводят к искажению геометрических размеров сварного узла, а остаточные напряжения способствуют развитию трещин, снижают стойкость соединения против хрупкого разрушения и сопротивляемость динамическим нагрузкам.

Итак, рассматривая свариваемость того или иного металла, следует проанализировать совокупность всех его свойств совместно с процессами физического воздействия на металл со стороны источника нагрева, его режимов, окружающей среды и всех других факторов, воздействующих на материал в процессе сварки.

## 2.2. Классификация способов сварки плавлением

На рис. 27 представлена обобщенная схема образования соединения при сварке плавлением. Основными моментами, определяющими процесс сварки, являются: используемый источник нагрева при сварке ( $q$ ); способ и характер создания защитной среды в месте сварки ( $F$ ); способ перемещения источника нагрева или свариваемых изделий относительно источника нагрева ( $V_{св}$ ); наличие или отсутствие подачи присадочной проволоки ( $V_{пн}$ ). По этим существенным элементам (их называют признаками) и классифицируются способы сварки плавлением.

Основным признаком классификации способов сварки плавлением является используемый при сварке источник нагрева. Известны следующие источники нагрева при сварке: теплота химических реакций, электрическая дуга, плазменная дуга, электронный луч, лазерный луч, электрошлаковая ванна, сфокусированное излучение мощных дуговых ламп. Соответственно в названиях способов сварки фигурирует использованный источник нагрева: аргодуговая сварка, дуговая сварка, сварка под слоем флюса, микроплазменная, электрошлаковая, лазерная сварка, электронно-лучевая сварка в вакууме и т. д.

В названиях многих способов сварки присутствует и второй существенный признак классификации: способ и характер создания защитной среды места сварки. В качестве защитных сред могут использоваться: инертные газы (аргон, гелий), вакуум, активные газы ( $CO_2$ , смеси  $CO_2$  с Ar и т. д.), специальные флюсы, которые при плавлении создают защитную оболочку. Защита при сварке может обеспечиваться локально, т. е. защищается только сварочная ванна и небольшие участки соединения, примыкающие к ней. Возможна и общая защита всего изделия при сварке в камерах с контролируемой атмосферой.

По степени автоматизации и механизации процесса способы сварки подразделяются на ручные, механизированные и автоматические. Различают,

например, ручную аргонодуговую сварку, механизированную и автоматическую аргонодуговую сварку.

Кроме этого, сварка может осуществляться с подачей присадочной проволоки и без нее.

Из большого количества известных видов сварки плавлением в производстве электронных приборов используются только следующие: дуговая неплавящимся электродом в инертных газах, микроплазменная, электронно-лучевая в вакууме, лазерная и реже газовая.

### **2.3. Характеристика источников нагрева при сварке плавлением**

Электрическая сварочная дуга – это устойчивый вид электрического разряда в газах, существующий при токах от десятых долей ампера до сотен ампер. Сварочная дуга характеризуется высокой плотностью тока в электропроводном газовом канале, выделением большого количества тепловой энергии и сильным световым эффектом.

В электрической дуге энергия источника питания преобразуется в кинетическую и потенциальную энергии частиц плазмы, которые в свою очередь передаются электродам и частично превращаются в электромагнитное излучение.

Электрическая дуга по длине имеет три области (катодную, анодную, столб дуги), отличающиеся физическими явлениями, протекающими в них (рис. 31).

Участки, непосредственно примыкающие к электродам, называют катодной (у отрицательного электрода) и анодной (у положительного электрода) областями. Между этими областями располагается наиболее протяженная ( $l_c = 0,05–0,5$  см) высокотемпературная область разряда – столб дуги. По ориентировочным данным протяженность катодной области ( $l_k$ ) равна нескольким длинам свободного пробега нейтральных атомов, т. е.

$l_k \approx 10^{-4} - 10^{-5}$  см. Анодная область приравняется к длине свободного пробега электрона ( $l_a \approx 10^{-3} - 10^{-4}$  см).

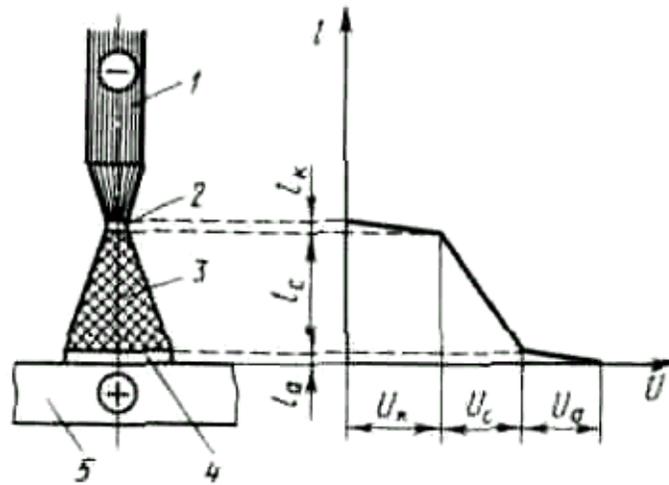


Рис. 31. Основные области электрической дуги и распределение потенциала в дуге:  
1 – катод, 2 – катодная область, 3 – столб дуги, 4 – анодная область, 5 – анод

Распределение потенциала по длине электрической дуги неравномерное. Около электродов имеют место скачки падения потенциалов, вызванные условиями прохождения электрического тока на границе между ионизированным газом и металлическими электродами. Общее падение напряжения на дуге

$$U_d = U_k + U_a + U_c,$$

где  $U_k$  и  $U_a$  – катодное и анодное падение напряжения;  $U_c$  – падение напряжения в столбе дуги.

Дуговой разряд обязан своим существованием процессам на катоде. Катод является «поставщиком» электронов. Причины выхода электронов из катода могут быть различными. Наиболее вероятный механизм – термоэлектронная эмиссия, возникающая при высокой температуре катода, если он выполнен из тугоплавкого материала (например, из вольфрама –  $T_{пл} = 3650$  К).

Электроны, эмиттированные катодом, ускоряются в катодном пространстве под действием сильного электрического поля ( $E_k \approx 10^5 - 10^6$  В/см). На внешней границе катодного пространства электроны сталкиваются с молекулами и атомами газа межэлектродного пространства. При этом

возможны два вида столкновений – упругие и неупругие. При упругих столкновениях частица, в которую попал электрон, начинает двигаться быстрее – увеличивается ее кинетическая энергия. В результате повышается температура газа. При неупругих соударениях электроны могут передать частицам газа энергию, достаточную для ионизации, в результате чего атом (или молекула) ионизируется, т. е. образуются новые заряженные частицы – электрон и положительный ион. Энергия, которая должна быть сообщена атому для его ионизации, выражается в электронвольтах (эВ) и называется **потенциалом ионизации**. Наименьшим потенциалом ионизации (3,9 эВ) обладает атом цезия, наибольшим – гелий (24,5 эВ).

Таким образом, кинетическая энергия эмиттированных электронов, приобретенная ими в электрическом поле вблизи катода, расходуется на ионизацию и нагревание газа в разрядном промежутке.

Процессы в столбе дуги не зависят от вида эмиссии катода. Электроны отдают часть энергии ионам, нейтральным атомам и молекулам при многократных столкновениях с ними в беспорядочном тепловом движении. В результате интенсивной термической ионизации столб дуги представляет собой ионизированный газ, состоящий из заряженных частиц (электронов, ионов) и нейтральных молекул или атомов, имеющий высокую температуру. Такой ионизированный газ носит название плазмы. Под действием электрического поля, приложенного к электродам, электроны движутся в столбе дуги к аноду, а положительно заряженные ионы – к катоду.

В любом малом объеме столба дуги непрерывно происходят те или иные процессы, связанные со столкновением частиц газа между собой при их хаотическом тепловом движении и с взаимобменом энергии между ними.

Если газ молекулярный, то при относительно низкой температуре (от  $4 \times 10^3$  до  $8 \times 10^3$  К), характерной для периферийных зон столба дуги, происходит диссоциация молекул, т. е. разделение их на отдельные атомы. Этот процесс протекает с поглощением значительного количества теплоты. С возрастанием температуры, по мере приближения к оси столба от периферийной области

дуги (до  $10^4$  К) в плазме усиливаются процессы ионизации. При более высоких температурах развиваются процессы многократной ионизации атомов.

Наоборот, при движении от оси столба дуги к периферии с уменьшением температуры протекают процессы: рекомбинация – процесс, обратный ионизации, и молизация – процесс, обратный диссоциации. Эти процессы протекают с выделением теплоты.

В анодной области электрический ток создается отрицательно заряженными частицами – электронами, которые, ударяясь о поверхность анода, передают ему энергию.

Различие в физических процессах у анода и катода вызывает различие и в потоках энергии на эти электроды. На катод «поступают» кинетическая энергия ионов, ускоренных полем катодного пространства, энергия рекомбинации ионов на поверхности катода и кинетическая энергия нейтральных атомов и молекул. Уносится энергия с поверхности катода (в его массу) за счет теплопроводности, излучением и эмиттируемыми с катода электронами. Часть энергии расходуется на испарение материала катода.

На анод «поступают» энергия электронов, накопленная в поле разряда, энергия работы выхода электронов, энергия от столба дуги (за счет излучения) и энергия потоков нагретого газа. Расходуется энергия на нагрев и плавление анода.

На рис. 32 представлено распределение подводимой тепловой мощности между катодом и анодом. Мощность, выделяемая на аноде, составляет 75–80% общей подводимой мощности. Поэтому анодом при сварке, как правило, служит свариваемая деталь.

Одной из важнейших характеристик дуги является статическая вольт-амперная характеристика (рис. 33), отражающая зависимость напряжения на дуге от сварочного тока. Эта характеристика служит основным критерием при выборе источника питания дуги.

В области I увеличение тока приводит к резкому падению напряжения дуги, которое обуславливается тем, что при этом в маломощных дугах

происходит разогрев электродов, увеличение площади сечения столба дуги и электропроводимости. Форма статической характеристики дуги на этом участке падающая.

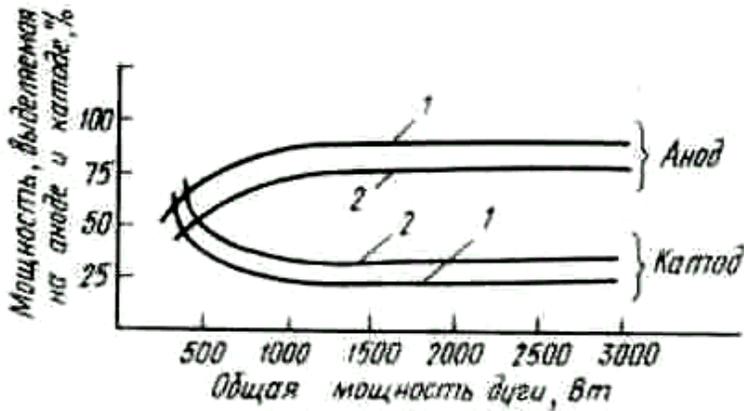


Рис. 32. Распределение тепловой мощности дуги при прямой полярности: 1 – дуговой промежуток 1 мм, 2 – дуговой промежуток 4 мм

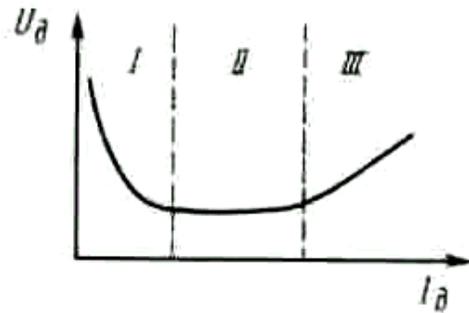


Рис. 33. Статическая вольтамперная характеристика дуги

В области II напряжение дуги почти не изменяется, что объясняется увеличением сечения столба дуги и активных пятен, пропорциональных изменению силы сварочного тока. Поэтому в результате плотность тока и падение напряжения во всех участках дугового разряда сохраняются постоянными. В этом случае статическая характеристика сварочной дуги называется «жесткой».

При дальнейшем увеличении сварочного тока (область III) напряжение дуги снова возрастает. Это объясняется повышением плотности тока без роста размеров катодного пятна.

При сварке деталей электронных приборов обычно используется электрическая дуга, горящая между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием. Дуга горит в среде инертного газа (аргона, гелия или их смеси), обеспечивающего защиту электрода и изделия от воздействия окружающей среды. Электрическая дуга является наиболее дешевым и простым источником нагрева при сварке, однако обладает недостаточно высокой концентрацией энергии в пятне нагрева, что ограничивает ее применение при сварке изделий с малой толщиной соединяемых кромок.

Микроплазменная дуга. Микроплазменная дуга является разновидностью дуги, горящей между неплавящимся электродом и изделием. Как отмечалось, свободная дуга обладает недостаточно высокой концентрацией энергии в пятне нагрева. Для увеличения плотности энергии в месте нагрева предложили сжимать столб дуги путем охлаждения его дополнительным потоком газа. Сжатие столба дуги осуществляется в специальном устройстве – плазмотроне. На рис. 34 представлены для сравнения схемы горелки для аргодуговой сварки и плазмотрона. Следует отметить, что последний имеет дополнительное формирующее сопло 2, обеспечивающее принудительное охлаждение столба дуги потоком газа (сопло электрически нейтрально и служит для сжатия и стабилизации столба дуги).

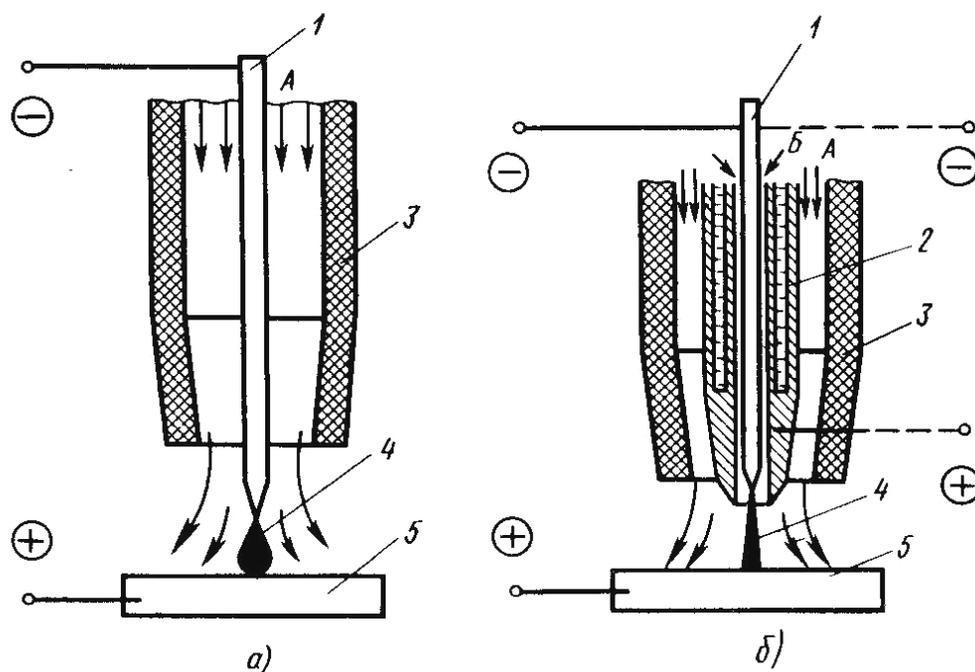


Рис. 34. Дуговая сварка неплавящимся электродом в защитном газе (а) и микроплазменная сварка (б): 1 – вольфрамовый электрод, 2 – медное водоохлаждаемое сопло, 3 – керамическое сопло, 4 – электрическая дуга, 5 – изделие; А – защитный газ; Б – плазмообразующий газ

При аргодуговой и микроплазменной сварке катодом служит вольфрамовый электрод 1, а анодом – свариваемая деталь 5.

Непосредственное возбуждение дуги между электродом и изделием через сопло 2 небольшого (0,6–0,8 мм) диаметра осуществить трудно. Поэтому первоначально возбуждается вспомогательная дуга между электродом 1 и соплом 2. Сила тока вспомогательной дуги обычно не превышает 2 А. Питается такая дуга, как правило, от автономного блока, встроенного в источник питания. Возбуждение вспомогательной дуги в плазменных горелках осуществляется высокочастотным разрядом осциллятора. Вспомогательная дуга проходит через сопло под давлением плазмообразующего газа. Ее анодное пятно перемещается по внутренней стенке канала сопла, а столб дуги оказывается жестко стабилизирован по осям электрода и сопла. Часть плазмообразующего газа, проходя через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла горелки в виде плазменной струи. При сближении горелки со свариваемым изделием (на расстояние выхода плазменной струи из сопла) плазма вспомогательной дуги образует электропроводящую дорожку между вольфрамовым электродом и деталью (анодом), в результате чего возбуждается основная электрическая дуга. Наружный слой плазмообразующего газа, омывающего столб дуги, остается относительно холодным и является электрической и тепловой изоляцией между столбом дуги и каналом сопла, предохраняя сопло от разрушения. Кроме того, наружный слой газа усиленно охлаждает столб дуги, в результате чего сечение столба уменьшается, а плотность тока и температура в нем возрастают. Степень сжатия столба дуги растет (до определенного предела) при уменьшении диаметра формирующего сопла и увеличении расхода плазмообразующего газа.

Плазменный поток, сжатый при прохождении через охлаждаемое формирующее сопло, сохраняет цилиндрическую форму после выхода из сопла только при относительно больших токах. Микроплазменная дуга с силой тока до 25 А требует дополнительных мер для сохранения ее высокой концентрации в промежутке «сопло–деталь». С этой целью в состав защитного газа вводят добавки, повышающие теплоотвод от столба дуги. Защитный газ, обеспечивающий защиту сварного соединения от контакта с воздухом,

подается concentрично плазменной дуге через внешнее керамическое сопло 3 плазмотрона (рис. 34, б).

Наиболее эффективным защитным газом, используемым в плазмотроне, является смесь аргона с водородом, с содержанием последнего 0,5–10 %. Водород, диссоциируя в периферийных областях столба дуги, поглощает значительное количество теплоты и тем самым охлаждает столб дуги, приводя его к сжатию. В случае, когда не допускается применение водорода, в качестве защитного газа используются аргоно-гелиевые смеси. Сжатие столба дуги в микроплазменных горелках существенно меняет форму ее вольтамперной характеристики. На рис. 35 представлены для сравнения характеристики открытой и микроплазменной дуг в области малых токов. Из сопоставления кривых видно, что происходит сдвиг характеристики микроплазменной дуги вверх при устранении крутопадающей ветви, характерной для открытой дуги в области малых токов.

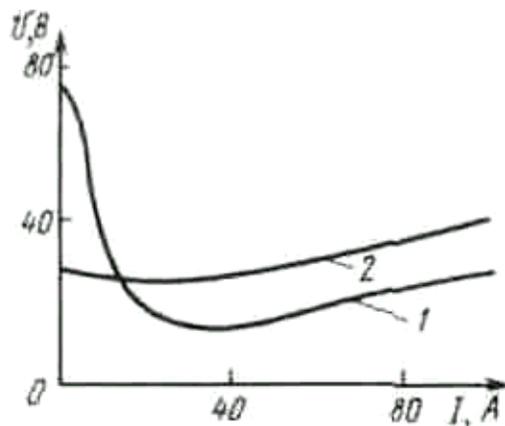


Рис. 35. Вольтамперные характеристики открытой дуги 1 и микроплазменной дуги 2

Вольтамперная характеристика микроплазменной дуги имеет очень малый наклон к оси токов, что обеспечивает устойчивое горение дуги в широком диапазоне, начиная со значения в 0,1 А.

Благодаря высокой степени сжатия столба микроплазменной дуги повышается концентрация нагрева при сварке, обеспечивается высокая стабильность горения дуги и незначительная зависимость проплавления свариваемых кромок при изменении ее длины.

Электронный луч. При электронно-лучевой сварке в качестве источника нагрева используется поток электронов, движущихся в высоком вакууме. При бомбардировке электронами поверхности металлов подавляющая часть их кинетической энергии превращается в теплоту, которая используется для расплавления металла. Для сварки необходимо получить свободные электроны, сконцентрировать их и сообщить скорость с целью увеличения энергии, которая должна превратиться в теплоту при торможении электронов в свариваемом металле. Электроны эмиттируются катодом. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высокой разностью потенциалов между катодом и анодом.

Фокусировка – концентрация электронов на малой площади пятна нагрева – достигается применением специальных магнитных линз.

Электронный луч, используемый для нагрева металла при сварке, создается в специальном приборе – электронной пушке.

Электронная пушка представляет собой устройство, с помощью которого получают электронные пучки с малым диаметром пятна нагрева и высокой плотностью энергии в нем (рис. 36).

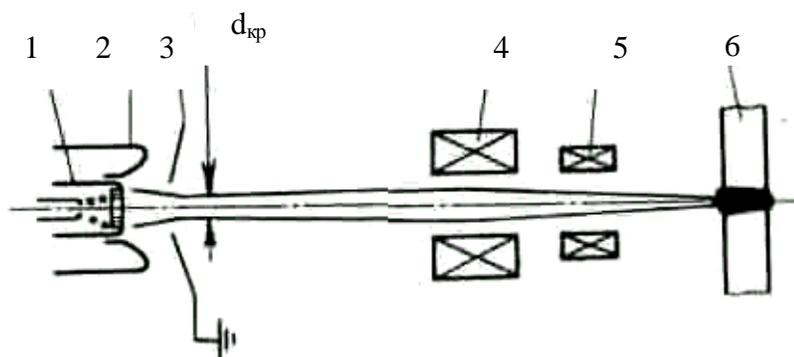


Рис. 36. Схема устройства формирования электронного пучка

Пушка имеет катод 1, который нагревается до рабочей температуры с помощью нагревателя. Катод размещен внутри прикатодного электрода 2. На некотором расстоянии от катода находится ускоряющий электрод (анод) 3 с

отверстием. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром  $d_{кр}$ , равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков киловольт, поэтому электроны, эмиттированные катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и энергию.

После ускоряющего электрода электроны двигаются равномерно. Электроны имеют одинаковый заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга, вследствие чего диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

Для увеличения плотности энергии в пучке после выхода электронов из анода их фокусируют магнитным полем в специальной магнитной линзе 4. Сфокусированный поток электронов, попадая на поверхность свариваемых кромок, тормозится. При этом кинетическая энергия электронов превращается в теплоту, идущую на разогрев металла 6 при сварке. Для перемещения луча по поверхности свариваемого изделия на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему 5, позволяющую устанавливать электронный луч точно по линии стыка свариваемых кромок.

Для обеспечения свободного движения электронов от катода к аноду и далее к изделию, для предотвращения «отравления» катода, а также для устранения возможности возникновения дугового разряда между электродами в камере электронно-лучевой установки создается высокий вакуум – примерно  $10^{-4}$  мм рт. ст. ( $1,33 \times 10^{-2}$  Па). Движение электронов в вакууме не сопровождается световыми эффектами и поэтому луч не виден, но место воздействия луча на свариваемый материал можно наблюдать за счет разогрева (свечения) последнего.

Форма шва, размеры зоны термического влияния и другие параметры сварного соединения зависят от плотности энергии в пятне нагрева. Эта характеристика электронного луча может регулироваться в широких пределах. При малой плотности энергии, не превышающей  $10^4$ – $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,

воздействие электронного луча аналогично воздействию электрической дуги на металл. Применение электронного луча в подобных случаях вызывается необходимостью либо надежно защищать свариваемые детали от воздействия окружающей атмосферы (например, при сварке катодных узлов электровакуумных приборов), поскольку электронно-лучевая сварка производится в вакууме, либо получать узкие сварные швы, что невозможно при дуговой сварке.

С увеличением плотности энергии в пятне нагрева свыше  $10^5 \text{ Вт/см}^2$  процесс плавления свариваемых кромок начинает сопровождаться интенсивным испарением металла. При этом возрастает давление паров испаряющегося вещества на поверхность расплавленной ванны, образуется углубление и формируется канал (рис. 37). При движении электронного луча плавление происходит на передней стенке канала, после чего расплавленный металл перемещается к задней стенке, не подвергаясь нагреву электронным лучом. Такой режим нагрева используется при сварке тугоплавких и теплопроводных металлов и металлов больших толщин.

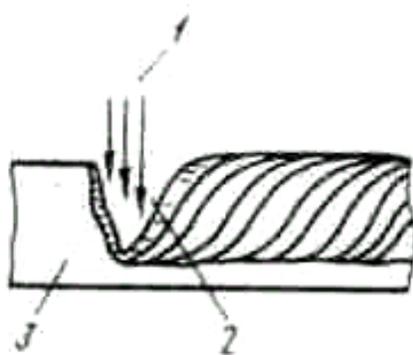


Рис. 37. Схема образования парогазового канала при электронно-лучевой сварке:  
1 – электронный луч, 2 – парогазовый канал, 3 – свариваемый материал

Высокая концентрация энергии в луче обуславливает возможность получения малого объема сварочной ванны и минимальных размеров зоны термического влияния.

Малый объем литого металла и кратковременность теплового воздействия обеспечивают незначительные термические деформации свариваемых деталей, а также возможность выполнять сварные швы вблизи термочувствительных

элементов (например, вблизи металлостеклянных или металлокерамических спаев, чувствительных к термоударам).

Лазерный луч для целей сварки начал использоваться в начале 60-х гг. XX века. В эти годы появились лазеры достаточной мощности.

Работа лазеров основана на использовании запасов внутренней энергии атомов и молекул вещества, образующих микросистемы. Последние состоят из большого числа микрочастиц. Микросистемы подчиняются законам квантовой механики и обладают основным свойством квантовых систем – дискретностью (прерывистостью) их энергетических состояний.

Иными словами, энергия этих систем не изменяется непрерывно, а принимает лишь некоторые определенные значения. Этим значениям энергии соответствуют так называемые энергетические уровни. Атом (молекула) в микросистеме находится на определенном энергетическом уровне. Переход атома или молекулы с одного уровня на другой совершается скачком, при этом поглощается или, напротив, испускается квант света – фотон. При переходе атома на более высокий энергетический уровень фотон поглощается, при переходе же атома на более низкий уровень происходит его испускание. Энергия поглощаемого или испускаемого фотона равна разности энергий уровней атома, между которыми совершается переход.

В естественных условиях, когда вещество находится в тепловом равновесии с окружающей средой, его частицы занимают преимущественно нижние уровни. Однако в результате взаимного влияния микрочастиц и их взаимодействия с внешними электромагнитными полями некоторая часть частиц в системе всегда будет находиться на более высоких уровнях. Положение частиц на верхних уровнях не является неизменным, они могут самопроизвольно переходить с одного уровня на другой. При самопроизвольном (спонтанном) переходе на нижние уровни частицы хаотически излучают фотоны с различными длинами волн, т. е. имеющие широкий волновой спектр. Примером такого излучения является излучение обычных источников света – ламп накаливания, газосветных ламп и др.

Теперь предположим, что имеется вещество, состоящее из атомов, которые могут занимать только два уровня  $E_1$  и  $E_2$ , причем  $E_1 < E_2$ . Будем облучать вещество, атомы которого находятся на уровне  $E_2$ , фотонами с энергией, равной  $E_2 - E_1$  (рис. 38). Под действием этих фотонов атомы могут перейти обратно на уровень  $E_1$ . При этом возникают дополнительные фотоны, имеющие энергию  $E_2 - E_1$ . Это и есть процесс вынужденного испускания света. «Вынуждает» облучающий фотон, играющий в данном случае роль своеобразного «спускового механизма», который «сталкивает» атом с верхнего энергетического уровня на нижний. Появляющийся новый фотон (при переходе атома на уровень  $E_1$ ) будет точной копией первичного фотона. Оба фотона имеют не только одну и ту же энергию, но и одно и то же направление движения.

Таким образом, имеется два типа процессов испускания фотонов атомами и молекулами: вынужденное и спонтанное. Первый процесс управляемый – его инициирует первичный фотон, который не только вызывает переход атома с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ , но и определяет направление движения возникающего нового фотона. Второй процесс имеет случайный характер: случайно происходит момент перехода, случайно направление движения родившегося фотона.

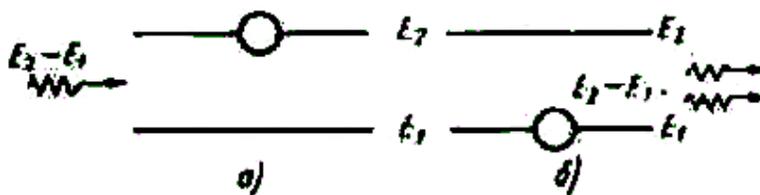


Рис. 38. Схемы поглощения кванта света (а) и вынужденного испускания света (б)

Для получения вынужденного излучения искусственно создается возбужденная квантовая система, в которой частицы находятся преимущественно на верхних уровнях. Такая микросистема называется активной средой. Отдельные атомы или молекулы этой среды обладают очень важным свойством: оказавшись на одном из верхних энергетических уровней,

они могут относительно долго оставаться на нем, не торопясь самопроизвольно возвратиться на нижние уровни. Поэтому можно «накопить» достаточно много атомов (молекул) на верхнем уровне так, что их станет значительно больше, чем на нижних уровнях. В результате будут созданы условия для преобладания процессов вынужденного испускания света над процессами поглощения света. Уровень, на котором можно накопить избыток атомов или молекул, называют **долгоживущим**, а сами атомы и молекулы – **активными центрами**.

Конкретный активный элемент – алюмоиттриевый гранат с неодимом – представляет собой прозрачный кристалл. Активными центрами являются ионы неодима, которые вводятся в кристалл граната в процессе изготовления активного элемента.

На рис. 39 показана упрощенная схема энергетических уровней иона неодима в гранате. Поглощая излучение специальной лампы-осветителя, ионы неодима возбуждаются: переходят на верхние уровни 3. Затем очень скоро они переходят на уровень 2 и там накапливаются. Уровень 2 и есть долгоживущий уровень, о котором говорилось ранее. Активный элемент будет готов к работе тогда, когда на уровне 2 накопится значительно больше ионов неодима, чем их имеется на уровне 1. Теперь достаточно «сигнала», роль которого сыграет фотон с энергией, равной разности энергий уровней 2 и 1, чтобы произошел переход ионов с уровня 2 на уровень 1.

В результате этого перехода возникает лавина фотонов, которая будет представлять собой лазерное излучение.

На рис. 40 схематично показаны элементы, необходимые для возбуждения активных центров в лазере на гранате с неодимом. Активный элемент 1 и лампа-осветитель 2 имеют цилиндрическую форму. Их помещают внутрь отражателя 3 таким образом, чтобы большая часть световой энергии, испускаемой лампой-осветителем, концентрировалась на активном элементе.

Когда говорят о возбуждении активных центров, применяют термин «накачка», имея в виду, что активные центры как бы накачиваются энергией, накапливаясь на долгоживущем уровне. Накачка может производиться с

помощью мощных световых импульсов, генерируемых лампой-вспышкой (импульсная накачка). Возможно также непрерывное облучение активного элемента лампой-осветителем (непрерывная накачка). Итак, накачка обеспечивает возбуждение активной среды, необходимое для генерации светового пучка.

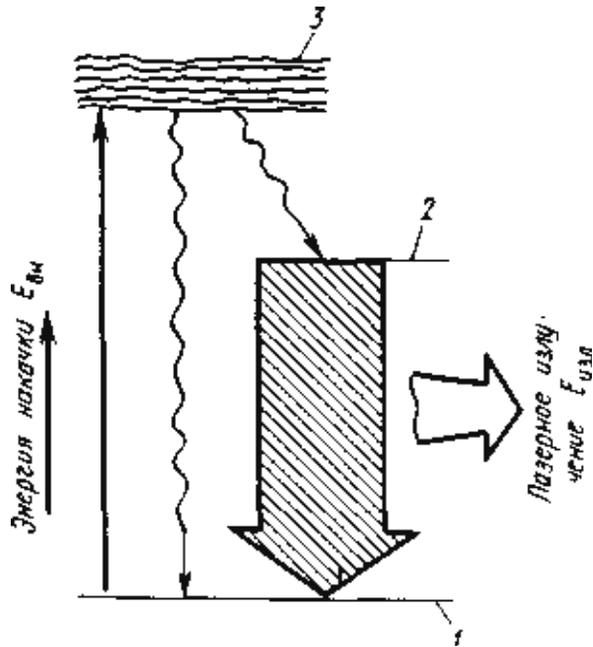


Рис. 39. Трехуровневая система энергетических состояний ионов неодима в гранате

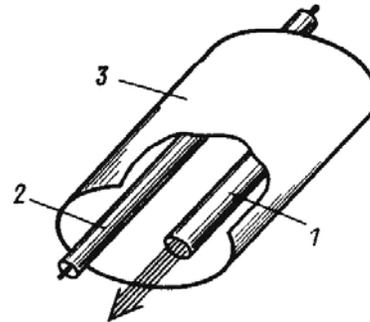


Рис. 40. Основные элементы лазерной головки: 1 – активный элемент, 2 – лампа-осветитель, 3 – отражатель

Теперь важно понять: как зарождается генерация лазерного излучения. Начинается процесс со спонтанного испускания света. Роль первичных фотонов, дающих начало процессу лазерной генерации, играют фотоны, которые родились в результате спонтанных переходов активных центров с уровня 2 на уровень 1 (см. рис. 39). Каждый спонтанно родившийся фотон может затем инициировать появление целой лавины вторичных фотонов, летящих в том же направлении, что и первичный фотон. Но спонтанно рождающиеся фотоны испускаются активными центрами несогласованно во времени и притом в самых разных направлениях. Значит, в разных направлениях будут распространяться лавины вторичных фотонов.

Чтобы упорядочить процесс генерации лазерного излучения, ставится оптический резонатор. Оптический резонатор – это два зеркала с общей оптической осью, которая фиксирует в пространстве направление лазерного луча. Активный элемент находится между зеркалами, т. е. внутри резонатора (рис. 41). Направление генерации лазерного излучения обозначено на рис. 41 стрелкой. Спонтанные фотоны, случайно родившиеся вследствие направления О–О, будут проходить внутри активного элемента относительно длинный путь, который многократно увеличивается вследствие отражения излучения от зеркал резонатора. Взаимодействуя с возбужденными активными центрами, эти фотоны инициируют мощную лавину вынужденно испущенных фотонов, которые образуют лазерный луч. Спонтанные фотоны, которые родились в иных направлениях, равно как и соответствующие им лавины вторичных фотонов, пройдут внутри активного элемента сравнительно короткий путь и выйдут за его пределы.

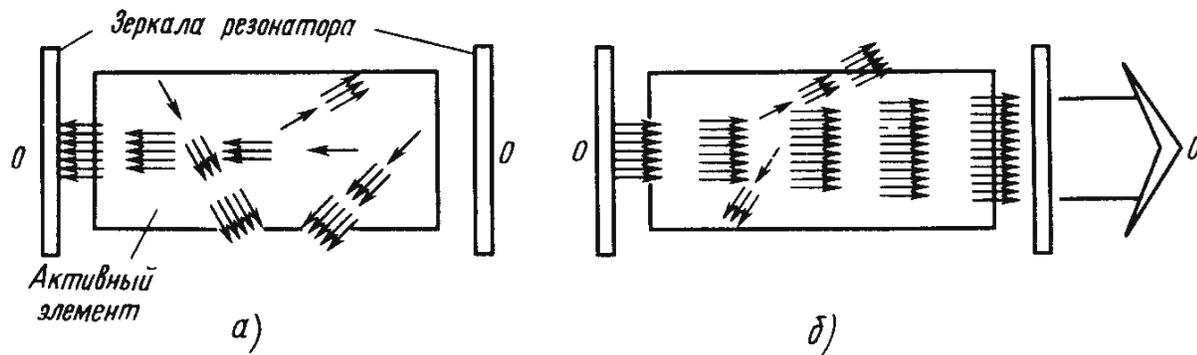


Рис. 41. Развитие фотонной лавины вдоль оси резонатора О–О:  
а – начало процесса, б – конец процесса

Таким образом, зеркала оптического резонатора выделяют в пространстве определенное направление, вдоль которого реализуются наиболее благоприятные условия для развития фотонных лавин. Это и есть направление лазерного луча, который выходит из резонатора через одно из его зеркал (так называемое выходное зеркало является частично прозрачным для лазерного излучения).

Принципиальная схема лазера проста. Она включает в себя активный элемент (активную среду), устройство для накачки активного элемента и зеркала оптического резонатора (рис. 42). В качестве активных сред используют кристаллы, специальные стекла, полупроводники, жидкие растворы красителей, газовые смеси.

В сварочной технике в основном используют твердотельные и газовые лазеры. В качестве активной среды применяют соответственно гранат с неодимом, стекло с неодимом, рубин и газовые смеси на основе  $\text{CO}_2$ . В твердотельных лазерах используется оптическая накачка, в газовых – электрический разряд.

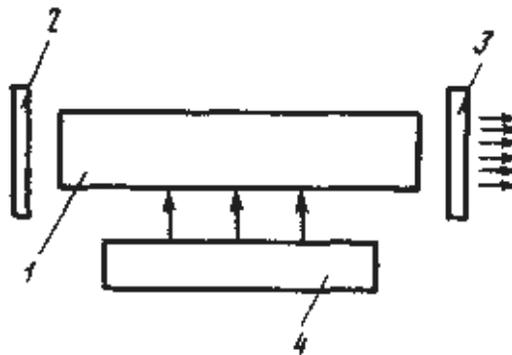


Рис. 42. Принципиальная схема лазерного луча:  
1 – активный элемент, 2 – непрозрачное зеркало, 3 – прозрачное зеркало,  
4 – устройство накачки

Несмотря на различие в конструкции, лазеры выполняют одну функцию – являются генераторами когерентного света. Если воспользоваться волновыми представлениями, то излучение можно представить в виде «элементарных волн», зарождающихся в активной среде; их обычно называю **волновыми цугами**. На рис. 43, а показано излучение некогерентного света, на рис. 43, б – свет идеально когерентен, т. е. все волновые цуги распространяются в одном направлении, имеют одинаковую длину волны и находятся в фазе друг с другом. Когерентность лазерного луча проявляется прежде всего в высокой степени его монохроматичности, т. е. получаемое излучение имеет практически одну длину волны. Так, лазер на основе граната с неодимом излучает свет в

инфракрасной области на длине волны 1,06 мкм; CO<sub>2</sub>-лазер генерирует инфракрасное излучение на длине волны 10,6 мкм.

Высокая степень когерентности проявляется также в очень малой расходимости лазерного луча. Если представить пучок с высокой энергией накачки степенью когерентности в виде совокупности световых лучей, то все эти лучи будут практически параллельны, как уже отмечалось, монохроматичны. Это позволяет сфокусировать их в пятно диаметром, равным длине световой волны, т. е. примерно 1–10 мкм.

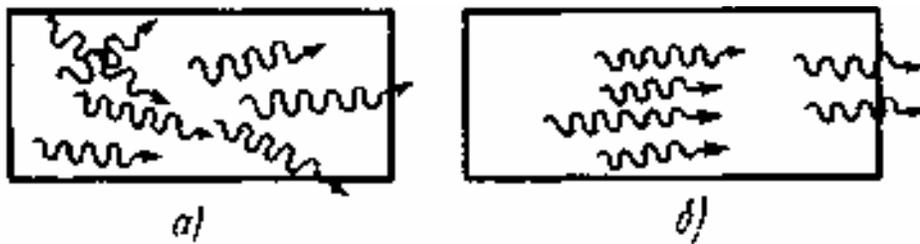


Рис. 43. Некогерентное (а) и когерентное (б) излучения

Лазерное излучение отличается не только когерентностью, но и возможностью необычайно сильно концентрировать световую энергию в пространстве. Если допустить, что излучение CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 1 кВт сфокусировано на площадке диаметром 1 мм, то интенсивность лазерного луча будет составлять 10<sup>5</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Подобная плотность мощности достаточна, чтобы плавить многие металлы при сварке.

Перечисленные свойства излучения оптического квантового генератора позволяют отметить некоторые достоинства его как источника нагрева при сварке:

- высокая концентрация энергии в пятне нагрева в совокупности с небольшими размерами этого пятна (доли миллиметра) позволяет сваривать детали с малой толщиной кромок (от 50 мкм), а также производить сварку вблизи термочувствительных элементов;

– малое поперечное сечение сфокусированного луча при достаточно больших расстояниях от лазерной головки до свариваемой детали позволяет производить сварку в труднодоступных местах.

Уникальным свойством лазерного излучения является возможность подвода энергии к месту сварки через твердые, прозрачные для излучения материалы. Это позволяет производить сварку в вакууме или в инертной газовой среде, создаваемой в сварочных камерах.

Пламя газовой горелки. Нагрев пламенем газовой горелки применяется непосредственно для сварки плавлением значительно реже, однако используется при сварке давлением и пайке. В основе этого способа сварки лежит метод получения теплоты за счет химических реакций сгорания газообразных веществ в кислороде или воздухе (в воздухе содержится 21 % кислорода).

При сгорании различных видов топлива температура пламени различна и, как правило, превышает 1000 °С. Наибольшей теплотворной способностью обладают горючие газы. Температура пламени определяется формулой  $T = Q/(mc)$ , где  $Q$  – теплота реакции окисления (для водорода 242 кДж/моль);  $m$  – масса продукта реакции;  $c$  – его теплоемкость.

Расчет по приведенной формуле дает значение температуры для водородного пламени  $T = 5300$  °С. В действительности же температура водородного пламени не превышает 2350 °С. Это связано с тем, что процесс сгорания очень сложен, и одновременно с процессом окисления при высоких температурах развиваются обратные реакции разложения паров воды на кислород и водород, исходных молекул кислорода и водорода на атомы – все эти реакции идут с поглощением теплоты, что понижает температуру пламени горелки.

Большинство горючих газов представляют собой соединения углерода с водородом: метан ( $\text{CH}_4$ ), этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), бутан ( $\text{C}_4\text{H}_8$ ), природный газ – смесь метана, пропана и бутана, бензин ( $\text{C}_6\text{H}_{12}$ ), бензол, ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Схема их сгораний гораздо сложнее окисления водорода. Максимальная

температура пламени в этом случае, как правило, выше, потому что сначала происходит разложение (пиролиз) углеводорода на составляющие – водород и углерод с большим тепловыделением, а затем окисление водорода и углерода. Чем больше углерода содержится в горючем газе, тем выше температура пламени. Наиболее высокую температуру пламени дает горючая смесь кислорода с ацетиленом (около 3300 °С), поэтому ацетилено-кислородное пламя наиболее широко применяют для сварки металлов. Окончательными продуктами сгорания углеводородов являются пары воды  $H_2O$  и углекислый газ  $CO_2$ .

Зачем нужна столь высокая температура газового пламени, если температура плавления большинства материалов находится в пределах 600–1600 °С? Дело в том, что для передачи теплоты от пламени к изделию необходимо, чтобы теплота передалась через поверхность сварочной ванны, причем пламя в виде газового потока контактирует с ней кратковременно. При этом пламя отдает ванне только часть теплоты, остальная теплота (отходящие газы) передается окружающей её среде, температура которой в результате на 300–400 °С выше температуры поверхности ванны. Поэтому, например, минимальная температура пламени для сварки сталей (1500 °С) должна быть порядка 2000 °С. Чем выше действительная температура пламени, тем быстрее происходит нагрев и эффективнее протекает процесс сварки.

Для проведения сварки тепловое воздействие должно быть сосредоточено на кромках изделия, на минимальной площади. Конструкция горелки такова, что позволяет обеспечить этот размер площади. В горелке происходит образование кислородно-ацетиленовой смеси и истечение её из сопла в виде тонкой струи. Скорость истечения должна быть равна скорости горения (10–13 м/с – для кислородно-ацетиленового пламени и 7 м/с – для заменителей ацетилена). Если скорость истечения меньше, то пламя проникает внутрь горелки, взрывается (хлопок) и гаснет. При очень большой скорости истечения оно отрывается от сопла и гаснет. Скорость истечения смеси и ее состава регулируется вентилями на входных магистралях горелки.

По составу горючей смеси сварочное пламя подразделяют на нейтральное, окислительное и науглероживающее. Нейтральное пламя обеспечивается при равных объемах ацетилена и кислорода в смеси. Если в смеси кислорода больше, чем ацетилена, то такое пламя является окислительным. Избыток кислорода вызывает окисление сварочной ванны и ухудшает свойства шва. Преобладание в смеси ацетилена делает пламя науглероживающим, что также ухудшает свойства шва. Оптимальный состав горючей смеси такой, когда кислород и углерод в процессе горения взаимодействуют полностью (нейтральное пламя).

Заданная скорость истечения горючей смеси из горелки определяет тепловую мощность пламени. Для увеличения общего количества теплоты пламени надо увеличивать расход газа при постоянной скорости его истечения, т. е. увеличивать диаметр сопла горелки, что соответственно уменьшает степень сосредоточения пламени на кромках и коэффициент полезного действия горелки.

Для микросварки и пайки в электронике и микротехнике используют сварку миниатюрным кислородно-водородным пламенем горелки с соплом типа «медицинская игла».

Горючие газы (водород и кислород) получают электролитическим разложением водных растворов, например едкого калия (КОН). Количество газа регулируется током электролиза, при этом получается пламя диаметром около 1 мм, длиной до 15 мм, температурой до 3000 °С.

Газовая сварка имеет целый ряд технологических преимуществ перед другими методами сварки: простое и дешевое оборудование, дешевые исходные материалы (горючие газы и кислород), простой способ возбуждения и регулирования процесса (редукторами и вентилями на горелке), хорошая маневренность, позволяющая проводить сварку в любом пространственном положении, возможность соединять углеродистые и легированные стали, а также сплавы цветных металлов, регулировать состав горючей смеси, что позволяет целенаправленно управлять металлургическими процессами в ванне

(например, при сварке латуни для уменьшения испарения цинка применяют окислительное пламя, а при сварке легкоокисляющегося алюминия – восстановительное).

К недостаткам газового пламени, как источника нагрева, следует отнести низкую эффективность нагрева, что приводит к получению широких швов и широкой зоны термического влияния, а также недостаточно высокую производительность процесса. Кроме того, специфика тепловыделения создает большие трудности при автоматизации процесса сварки и делает ее мало перспективной в автоматизированном производстве и безлюдной технологии.

## **2.4. Технологические особенности сварки плавлением электронных приборов**

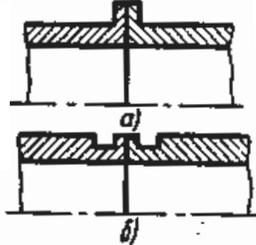
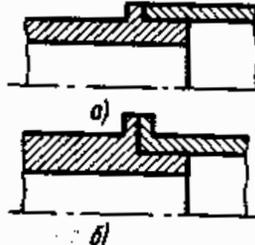
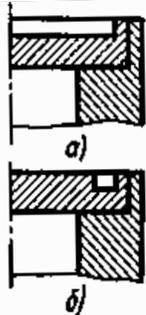
Сварка плавлением электронных приборов выполняется без присадочного материала, сварной шов формируется из металла расплавляемых кромок свариваемых изделий. Работоспособность такого соединения зависит от формы, размеров и состава металла шва. В соответствии с общими представлениями о явлениях, протекающих при сварке плавлением, на образование формы, размеров и состава металла шва в основном влияют: вид и конструктивное оформление соединения, подготовка свариваемых деталей к сварке, сборка под сварку, соответствующая технологическая оснастка, оптимальность режима сварки. Рассмотрим технологические особенности процесса сварки плавлением электронных приборов и влияние на этот процесс отдельных факторов.

Вид и конструктивное оформление соединения. В электронных приборах используются виды соединений, применяемые в общем машиностроении (стыковое, внахлестку и угловое), но форма подготовленных кромок в ряде случаев значительно отличается от общепринятой. Форма подготовленных кромок электронных приборов показана в табл. 1. Как видно из таблицы, виды соединений, применяемых в приборах, имеют технологические буртики, позволяющие снизить общий нагрев свариваемых деталей, уменьшить общую деформацию свариваемого узла, реставрировать соединение после вскрытия

прибора. К недостаткам сварки по буртикам следует отнести трудность легирования металла шва при необходимости обеспечения заданного его состава.

Таблица 1

Форма подготовленных кромок в конструкциях электронных приборов

Вид соединения	Форма подготовленных кромок	Эскиз	
		по ГОСТ 14771-76	в конструкциях приборов
Стыковое	С отбортовкой двух кромок		
Стыковое	С отбортовкой одной кромки		
Стыковое	Без скоса кромок, односторонняя		
Угловое	С отбортовкой одной кромки		
Внахлестку	Без скоса кромок, односторонняя		

По конфигурации в основном преобладают круговые швы.

Одним из основных требований, предъявляемым к сварным соединениям, ограждающим полость прибора от атмосферы, является необходимая герметичность.

Герметичность сварного соединения определяется структурой и составом металла шва, отсутствием дефектов в металле шва и околошовной зоне и проплавлением свариваемых кромок (т. е. толщиной металла шва сварного соединения, ограждающего полость прибора от атмосферы).

Взаимное расположение деталей в узле (конструкция сварного соединения) в обеспечении герметичности играет такую же важную роль, как степень проплавления свариваемых кромок, структура и состав металла шва.

При конструировании сварных соединений необходимо учитывать, что детали, изготовленные из прутковых материалов обычной выплавки, таких как низкоуглеродистая и нержавеющая сталь, ковар, мельхиор и константан, имеют большое количество дефектов вдоль волокон прутка.

Дефекты располагаются как в глубине прутка, так и на поверхности или в приповерхностном его слое. Дефекты в прутке возникают в результате местных металлургических дефектов слитков или дефектов инструмента, а также при нарушении режимов обработки. Металлургические дефекты на последующих переделах (прокатке) растягиваются вдоль волокон прутка по направлению обработки.

В соответствии с характером дефектов исходных материалов первое правило конструирования герметичных соединений формулируется следующим образом: недопустимо «соединение» волокон материала внутренней полости прибора с атмосферой. Соблюдение этого правила конструирования может быть обеспечено различными приемами.

Необходим рациональный выбор конструкции, при которой дефекты материала не выходили бы из полости прибора в атмосферу (рис. 44). Формовка фасонных деталей должна обеспечивать требуемую волокнистую структуру.

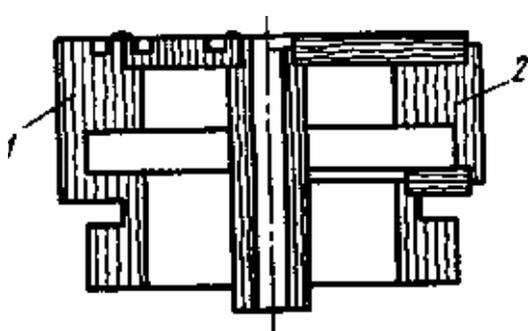


Рис. 44. Схемы сварной конструкции узла прибора: 1 – неправильная, 2 – правильная

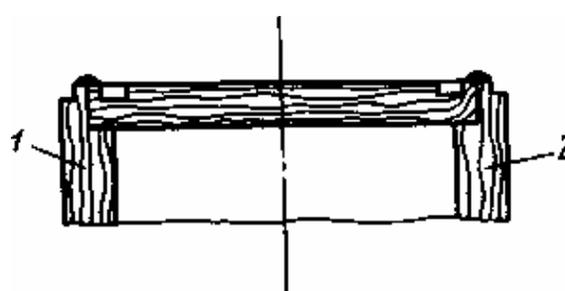


Рис. 45. Конструкции крышки из листового материала: 1 – неправильная, 2 – правильная

Изготовление отдельных элементов деталей или деталей целиком методами пластической деформации (штамповкой, выдавливанием и др.) позволяет устранить возможность «соединения» волокнами металла полости прибора с атмосферой. На рис. 45 показана конструкция толстостенной детали – крышки, изготовленной из листа меди толщиной 10 мм. Замена обычных точеных тонкостенных буртиков (слева), буртиками, полученными холодным деформированием (справа), позволила устранить натекание по перерезанным волокнам тонкостенного буртика, которые соединяют атмосферу с внутренней полостью прибора.

Необходимо использование сборных конструкций из деталей с заданным направлением волокнистой структуры. На рис. 46 представлена правильная и неправильная конструкции сварного соединения.

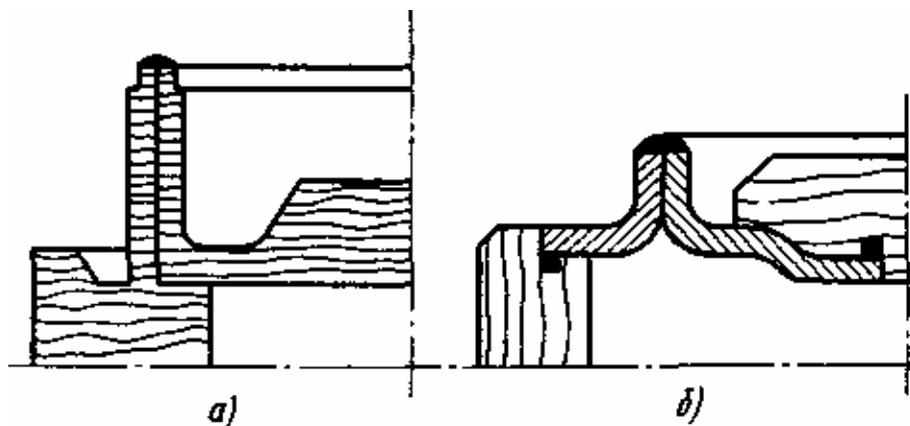


Рис. 46. Неправильное (а) и правильное (б) выполнение конструкции сварного соединения

В первом случае свариваемые кромки выполнены из прутковых материалов. Наличие перерезанных волокон в тонкостенном буртике для сварки приводит к соединению атмосферы с полостью прибора. Переход к сборной конструкции места сварки из элементов, изготовленных из листового материала методами пластической деформации, позволяет исключить натекание газов в полость прибора.

При конструировании сварных соединений вакуумных приборов необходимо выполнять и второе правило: сварное соединение не должно иметь узких щелей, карманов. В процессе откачки удаление газов из узких щелей сварного соединения затруднено, кроме этого, не всегда удается надежно защитить от окисления корень шва таких соединений. Это приводит к газоотделению в прибор и ухудшает его параметры. При аргонодуговой сварке в щелях элементов соединений остается аргон, который трудно удаляется при откачке прибора и в дальнейшем, при эксплуатации, ухудшает работу прибора. При проектировании сварного соединения необходимо стремиться к форме и размерам отбортовки, изображенной на рис. 47.

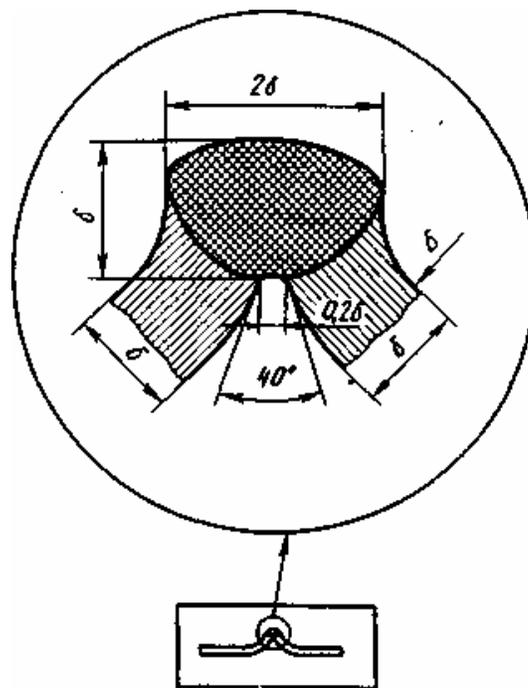


Рис. 47. Рекомендуемые форма и размеры сварного соединения, выполняемого по отбортовке ( $\delta$  – толщина свариваемой кромки)

Подготовка поверхности деталей перед сваркой. В процессе изготовления детали могут загрязниться механическими частицами (абразивной и металлической пылью, стружкой, различными волокнами и др.), жирами растительного и минерального происхождения, солями хлора и серы. Кроме того, на поверхности деталей всегда имеется тонкая окисная пленка, а иногда продукты коррозии. Все перечисленные загрязнения могут повлиять на результат сварки, вызвав появление газовых пор, трещин и нарушение нормального формирования швов.

Очистку деталей производят различными способами: обезжириванием, травлением, полированием, промывкой в воде и отжигом в восстановительной среде или в вакууме. Выбор способа подготовки поверхности определяется характером загрязнений, свойствами материала и конфигурацией деталей.

Наиболее полное удаление пыли и других механических загрязнений с деталей достигается при травлении. При этом удаляется также и поверхностный слой металла, наиболее сильно насыщенный газами. В тех случаях, когда травление неприменимо или нежелательно, очистка деталей от механических загрязнений может производиться в ультразвуковых ваннах с водой или соответствующими растворителями. Для этой цели обычно применяется ванна с четырьмя секциями. В первых двух секциях циркулирует с большой скоростью холодная водопроводная вода, которая механически отрывает крупные частицы от деталей и уносит их в сточную канализацию. Далее детали погружаются в третью секцию с горячей водопроводной водой, в которую добавляются поверхностно-активные вещества, обеспечивающие полное смачивание оставшихся на поверхности деталей пылевых частиц; для повышения эффективности очистки в этой секции помещают ультразвуковой вибратор. В последней секции ванны содержится также горячая водопроводная вода для отмывки деталей от поверхностно-активных веществ. При этом методе очистки происходит удаление и солевых загрязнений.

Удаление с деталей жировых и масляных загрязнений осуществляется обезжириванием деталей в растворителях, а также травлением в щелочах и кислотах.

Наибольшее распространение получило обезжиривание деталей в горячем трихлорэтилене и четыреххлористом углероде. Наиболее эффективным является действие трихлорэтилена.

Трихлорэтилен не взаимодействует с металлами и растворяет все жиры, масла, смолы, воски и аналогичные им материалы, не вступая с ними в химическую связь, что очень важно для регенерации растворителя. При обезжиривании детали последовательно погружаются в несколько ванн с растворителем.

В отличие от органических растворителей водные растворы щелочей оказывают преимущественно моющее действие. Щелочи омыляют животные и растительные жиры. При этом образуются мыла, которые в процессе промывки деталей в воде полностью растворяются в ней и удаляются. Обезжиривание в щелочах требует сравнительно большого расхода растворов.

Электрохимический способ очистки ускоряет процесс и сокращает расход растворов. Однако он недостаточно эффективен применительно к изделиям сложной конфигурации.

Кислотное травление применяется для быстрого удаления с поверхности деталей окислов, солей и органических пленок. Недостатки кислотного травления заключаются в понижении стойкости деталей к коррозии, в их наводороживании и потере точности деталей.

После химической очистки наиболее важную роль в технологии очистки деталей электровакуумных приборов играют термические методы: отжиг в атмосфере восстановительных газов или в вакууме. При этом независимо от среды удаляются как остатки малостойких поверхностных загрязнений, так и сорбированные газы.

По эффективности термические методы очистки намного превосходят химические.

Применяемые вспомогательные материалы. При сварке плавлением в качестве защитных сред используют инертные газы – аргон и гелий.

Аргон газообразный выпускается (по ГОСТ 10157–79) трех сортов в зависимости от содержания примесей (азот, кислород, влага): высшего – с содержанием аргона не менее 99,99 %, первого – 99,98 %, второго – 99,95 %. Газообразный аргон транспортируется и хранится в стальных баллонах при давлении 14,7 МПа. Баллоны окрашены в серый цвет с надписью ясными буквами «Аргон чистый». Аргон тяжелее воздуха и может накапливаться в плохо проветриваемых помещениях у пола, снижая при этом содержание кислорода в воздухе, что может вызвать кислородную недостаточность.

Гелий выпускается (по ТУ 51-689–75) двух видов: гелий высокой чистоты с содержанием гелия не менее 99,985 % и технический с содержанием – не менее 99,8 %. Гелий – бесцветный газ, без запаха, не ядовит, значительно легче воздуха и аргона. Стоимость гелия примерно в шесть раз выше стоимости аргона, поэтому применение его при сварке ограничено. Газообразный гелий транспортируется и хранится в специальных баллонах при давлении 14,7 МПа. Баллоны окрашены в коричневый цвет с надписью белыми буквами «Гелий».

Для определения расхода защитного газа применяются ротаметры типа РМ (по ГОСТ 13045–81). Ротаметры имеют паспорт с приведенными в нем таблицей и градуировочным графиком расхода воздуха в литрах в час (л/ч) либо в кубических метрах в час ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ). Для перевода показаний применительно к аргону или гелию необходимо значение, приведенное на графике для воздуха, умножить на коэффициент 0,85 для аргона и на 2,69 для гелия.

Аргон и гелий не растворяются в металле сварочной ванны и не образуют химических соединений с элементами, входящими в его состав. Газы обеспечивают высокоэффективную защиту места сварки и хорошее формирование шва.

Материалы для неплавящегося электрода при электродуговой сварке. В качестве неплавящегося электрода при дуговой сварке в инертных газах используются различные марки вольфрама. Применяемые вольфрамовые

электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949–80 «Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся». При выполнении процесса дуговой сварки очень важен выбор материала, диаметра и формы заточки неплавящегося электрода, от чего зависит легкость возбуждения электрической дуги, стабильность и устойчивость ее горения, а также стабильность геометрических размеров сварных швов.

Для сварки в среде инертных газов применяются электроды диаметром 0,5–10 мм из чистого вольфрама (ЭВЧ), вольфрама с присадкой двуокиси тория (ЭВТ), вольфрама с присадкой окиси лантана (ЭВЛ), вольфрама с присадкой окиси иттрия (ЭВИ). Размеры электродов и предельные отклонения их длины должны соответствовать значениям, указанным в табл. 2.

Пример условного обозначения электрода марки ЭВЛ диаметром 2,0 мм, длиной 150 мм: «Электрод вольфрамовый ЭВЛ–Ø2–150–ГОСТ 23949–80».

Каждый электрод должен быть маркирован в соответствии с табл. 3. Маркировка должна быть нанесена на одном из концов электрода.

Различные марки электродов имеют специфические особенности, которые необходимо учитывать при выполнении конкретных сварочных работ.

Таблица 2

Размеры вольфрамовых прутков

Марка	Номинальный размер, мм	Длина и предельные отклонения, мм
		не менее 3000 в мотках
ЭВЧ	0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	75 + 1; 200 + 1; 150±1; 300+1
ЭВЛ	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	75 + 1; 150±1
ЭВИ-1	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	75+1; 150+1
ЭВИ-2	2,0; 3,0; 4,0	75+1; 150+1
ЭВИ-3	5,0; 6,0; 8,0; 10,0	200±1; 300+1
ЭВТ-15	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0	75+1; 200+1

## Маркировка электродов

Марка электрода	Цвет	Марка электрода	Цвет
ЭВЧ	Не маркируется	ЭВИ-2	Фиолетовый
ЭВЛ	Черный	ЭВИ-3	Зеленый
ЭВИ-1	Синий	ЭВТ-15	Красный

Применение чистого вольфрама в качестве неплавящегося электрода не обеспечивает стабильного и устойчивого процесса горения дуги. Электроды из чистого вольфрама имеют низкие эмиссионные свойства, в результате чего для поддержания горения дуги требуется высокая температура электрода. Это приводит к оплавлению рабочего конца электрода и блужданию катодного пятна. Для повышения стабильности дугового процесса и предотвращения разрушения конца электрода в процессе сварки в вольфрам вводят легирующие добавки. В качестве активирующих присадок при изготовлении вольфрамовых электродов применяют окислы тория, лантана, иттрия. Эти присадки обладают низкой работой выхода электронов, высокой температурой плавления и испарения.

Помимо материала электрода на стабильность процесса сварки; существенное влияние оказывает форма его рабочей части (рис. 48).

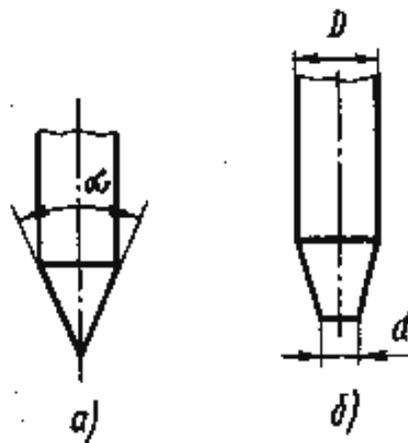


Рис. 48. Формы заточки вольфрамового электрода:  
 а – без притупления, б – с притуплением на диаметр  $d$   
 ( $\alpha$  – угол заточки,  $D$  – диаметр электрода)

Параметры заточки вольфрамового электрода (угол заточки, диаметр притупления  $d$ ) влияют на температуру в столбе дуги, на распределение потока энергии и давление дуги и соответственно на характер проплавления. Обычно при сварке электронных приборов электроды затачивают на угол  $60^\circ$  или на длину, равную двум диаметрам электрода.

На стойкость вольфрамового электрода оказывает влияние и такой параметр, как его диаметр  $D$ , который выбирают в зависимости от проходящего через электрод сварочного тока. Обычно диаметр электрода выбирают из следующего соотношения: каждому 0,025 мм диаметра электрода должен соответствовать ток силой 1,25 А.

Сборка под сварку и технологическая оснастка. Сварке всегда предшествует сборка конструкции, т. е. установка и фиксация деталей. Сборка под сварку является одной из трудоемких и наименее механизированных операций. Она должна обеспечивать возможность качественной сварки конструкции для этого необходимо выдержать допустимый зазор между кромками соединяемых деталей, установить детали в заданное положение и закрепить между собой так, чтобы взаимное расположение деталей не нарушалось в процессе сварки. Должен быть обеспечен свободный доступ к месту сварки.

Конструкция свариваемых кромок представлена на рис. 49. Сборка под сварку в приспособлении должна обеспечивать минимальный зазор в стыке, не препятствующий сплавлению кромок. При различных способах сварки плавлением зазор между кромками стыковых соединений и превышение кромок колеблется в пределах от 0 до 20 % толщины свариваемых кромок. Для соединений по буртикам допуски размеров на сборку менее жестки (табл. 4). Применение оснастки позволяет снизить коробление свариваемых деталей в процессе сварки, и уменьшить таким образом вероятность появления прожогов. Для жесткого фиксирования кромок расстояние между зажимами приспособления должно быть в пределах 10–20 толщин соединяемых металлов.

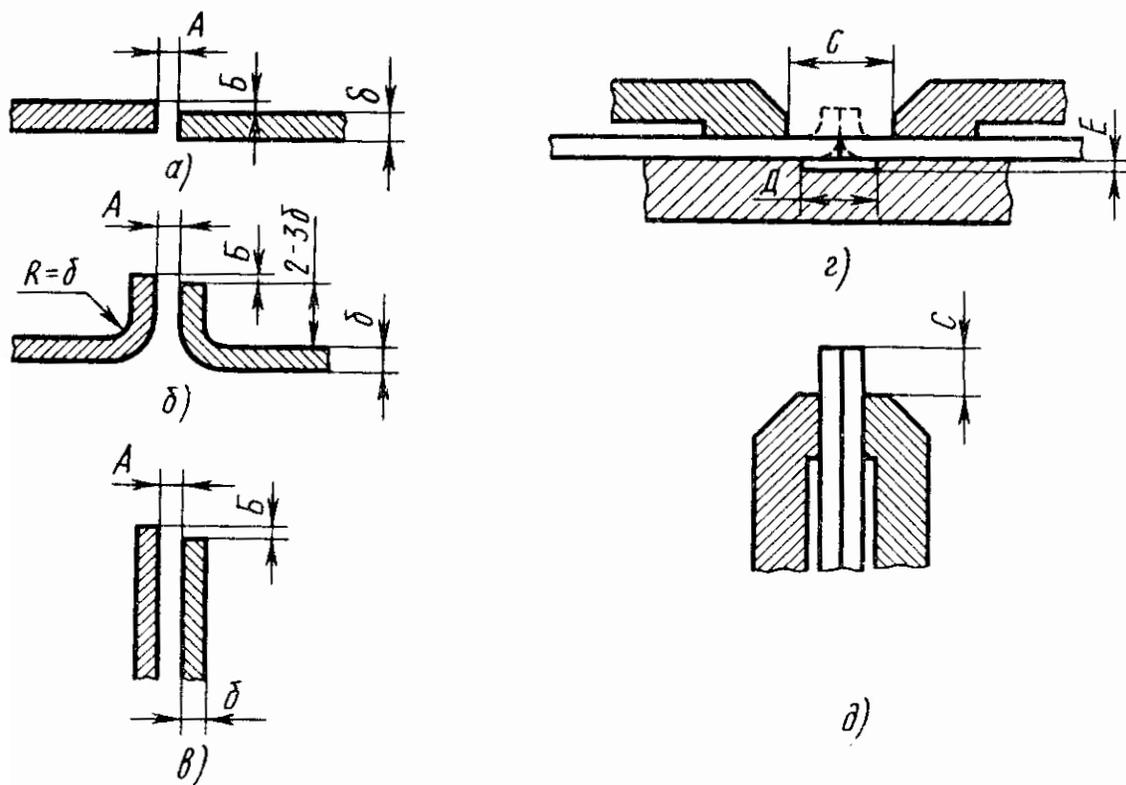


Рис. 49. Конструкция свариваемых кромок и оснастка для сварки:  
 а – стыковое соединение, б – соединение по отбортовке, в – бортовое соединение, г – оснастка для стыковых соединения и по отбортовке, д – оснастка для бортовых соединений

Сварку металлов толщиной менее 0,3 мм предпочтительнее выполнять по отбортовке кромок. В этом случае расстояние между прижимами может быть увеличено за счет жесткости ребра отбортовки.

Помимо приспособлений, препятствующих деформациям кромок в процессе сварки, при изготовлении электронных приборов используются и другие различные по своему функциональному назначению виды приспособлений: фиксирующие взаимные положения деталей с заданной точностью; обеспечивающие теплоотвод от места сварки с целью предотвращения перегрева термочувствительных элементов прибора; улучшающие качество защиты места сварки, обеспечивающие принудительное формирование сварного шва. Очень часто при сварке сложных узлов используются комплексные приспособления, у которых различные функции оснастки могут совмещаться в одной детали или узле.

Допуски на сборку свариваемых кромок и элементы оснастки  
(в долях толщины свариваемых кромок)

Соединение	Зазор, мм max	Смещение кромок, мм max	Расстояние между прижимами, мм		Размеры канавки, мм		
			min	max	Ширина		Глубина
					min	max	
Стыковое	0,2	0,4	10	16	4	16	1,6
По отбортовке	0,6	1	15	30	10	24	1,6
Бортовое	1	3	1	12	–	–	–

Приспособления, фиксирующие взаимное положение деталей, широко используются при сборке и во время сварки. Приспособления, представленные на рис. 50 и 51, используются для сварки сильфонов.

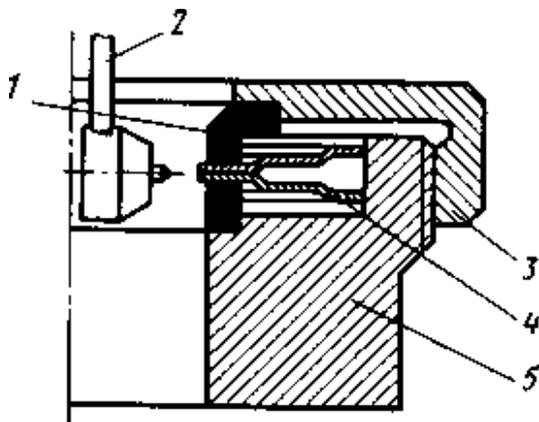


Рис. 50. Приспособление для сварки внутренних швов сильфонов

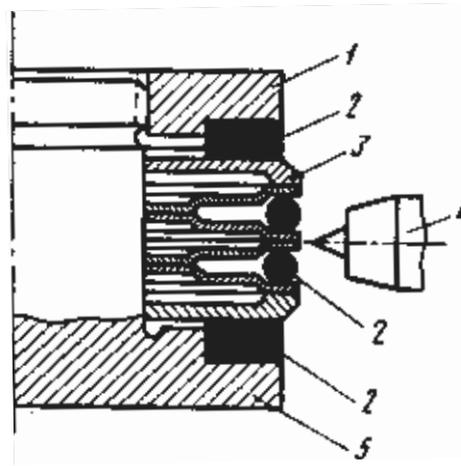


Рис. 51. Приспособление для сварки внешних швов сильфонов

Перед сваркой внутренних швов сильфонов (рис. 50) мембраны 4 помещаются в медных оправках 1, собираются в единый узел в корпусе 5 и сжимаются накидной гайкой 3. Сварка производится горелкой 2.

Для выполнения внешних швов с помощью горелки 4 (рис. 51) сваренные предварительно попарно мембраны и арматура 3 собираются на оправке 5 и сжимаются гайкой 1. Кольца прямоугольного и круглого сечения 2 выполняют

несколько функций – прижим свариваемых кромок, теплоотвод от места сварки и принудительное формирование шва.

Выполнение указанных функций особенно важно при сварке разнотолщинных элементов. На рис. 52 показаны приспособления для сварки сильфонов 1 с фланцами 5 для случаев сборки свариваемых кромок в отбортовку (рис. 52, а) и внахлестку (рис. 52, б).

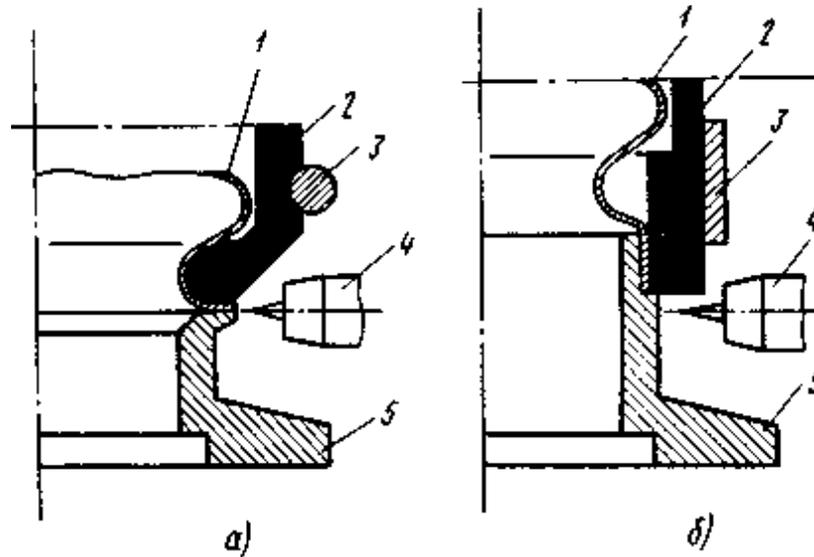


Рис. 52. Приспособление для сварки сильфонов с арматурой:  
а – по отбортовке, б – внахлестку

Во избежание прожога тонкой детали сварку производят с применением технологических медных бандажей 2. Бандажи состоят из двух полуколец, которые стягиваются кольцами 3 (рис. 52, а) или хомутами 3 (рис. 52, б). Медный бандаж ограничивает плавление тонкой кромки, позволяет избежать ее прожога, делает процесс сварки сильфона с фланцем горелкой 4 малочувствительным к изменениям параметров режима сварки, обеспечивает минимальное тепловое и деформирующее воздействие на деталь.

Некоторые изделия требуют интенсивного теплоотвода от места сварки во избежание перегрева термочувствительных элементов. На рис. 53 показана схема герметизации корпуса полупроводникового прибора 2. Свариваемые кромки зажимаются между верхним 1 и нижним 4 теплоотводами, что

позволяет надежно защитить прибор от перегрева при воздействии теплоты от горелки 3. Иногда теплоотводы 1 и 4 делаются водоохлаждаемыми.

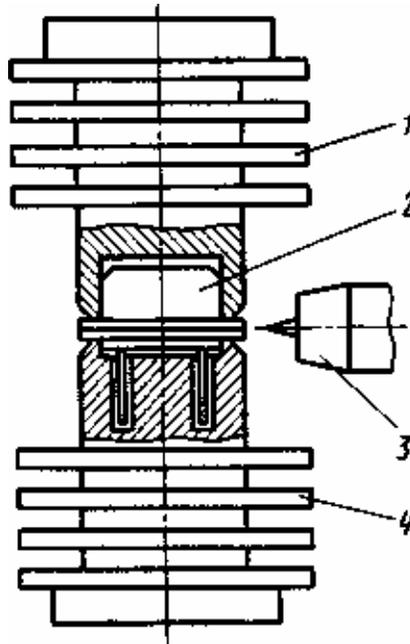


Рис. 53. Схема сварки корпусов микросхем в теплоотводящих оправках

Рассмотренная оснастка обеспечивает надежный теплоотвод только при условии, если в месте контакта его со свариваемыми кромками приложено сжимающее усилие. Однако не все свариваемые конструкции можно нагружать дополнительными усилиями. В этом случае для охлаждения используется жидкость.

На рис. 54 показывается возможность местного охлаждения жидкостью при сварке вблизи металлостеклянного спая. Свариваемый узел 2 помещается в приспособлении 3 с контролируемым уровнем охлаждающей жидкости. Сварка производится с использованием горелки 1.

Как правило, сварка плавлением изделий электронной техники проводится в вакууме или в контролируемой газовой атмосфере. Иногда сварку производят с использованием струйной защиты. В этом случае качественная защита достигается за счет использования соответствующей технологической оснастки.

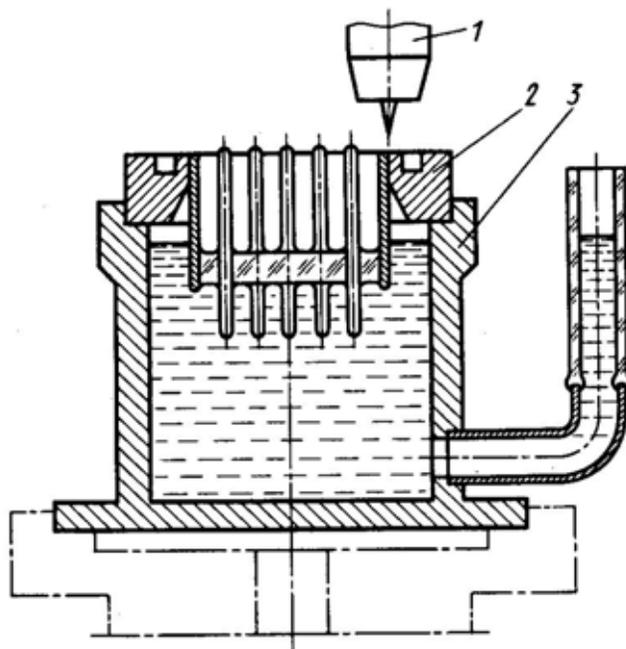


Рис. 54. Схема сварки с применением охлаждающей жидкости

На рис. 55 показано приспособление, обеспечивающее надежную защиту лицевой и корневой частей сварного соединения.

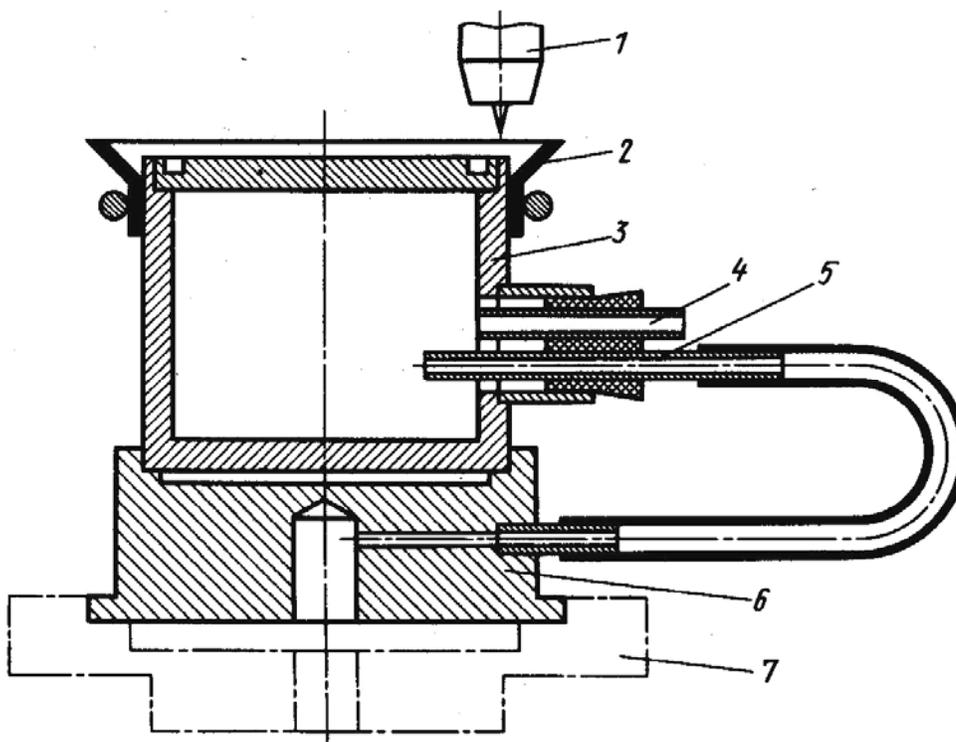


Рис. 55. Приспособление, обеспечивающее надежную защиту шва от воздействия окружающей среды

Для повышения эффективности газовой защиты лицевой стороны при сварке горелкой 1 со стороны корпуса 3 установлен экран 2. Для защиты обратной стороны соединения использовано отверстие в конструкции корпуса, через которое производится продувка защитным газом. Защитный газ подается через шпindel 7, оправку 6 и трубку 5 в полость корпуса. Стравливание защитного газа осуществляется через вторую трубку 4, вставленную в заглушку отверстия.

Приведенные примеры показывают, насколько существенное значение для сварки узлов приборов имеет правильно сконструированная технологическая оснастка.

Процесс сварки, выбор параметров режима сварки. Выбирают так, чтобы получить сварные соединения, лишенные дефектов формирования шва и структуры.

Каждый свариваемый металл или сочетание материалов по-разному реагируют на воздействие источника нагрева при сварке. Поэтому для получения заданной геометрии сварного шва, его структуры и состава при отсутствии различного рода дефектов должны быть подобраны оптимальные параметры режима сварки. Такими параметрами при аргодуговой сварке являются сварочный ток, скорость сварки, напряжение дуги, длина дугового промежутка, диаметр и угол заточки электрода, расположение оси электрода относительно стыка свариваемых кромок; при электронно-лучевой сварке – сварочный ток, ускоряющее напряжение, скорость сварки, диаметр пятна нагрева; при лазерной сварке – энергия импульсов, частота их следования, скорость сварки.

Перечисленные параметры режимов сварки определяют мощность, вводимую в свариваемые кромок, скорость перемещения источника нагрева определенной мощности и положение источника нагрева относительно свариваемых кромок. В каждом конкретном случае, исходя из особенностей свариваемой конструкции и материалов, требований, предъявляемых к качеству соединений, выбирают оптимальную совокупность параметров режима. Однако

можно сформулировать несколько общих положений, касающихся выбора режима сварки.

Повышение скорости сварки сопровождается ухудшением формирования шва, которое проявляется в образовании подрезов, несплавлений и других дефектов формирования шва. Главная причина образования этих дефектов – разрыв во времени между проплавлением и заполнением образовавшейся канавки жидким металлом ванны.

Для определения оптимального режима сварки выбирают несколько скоростей сварки. Для каждой скорости в соответствии с тем или иным показателем качества сварного шва (например, в соответствии с проплавом) определяют минимальный, оптимальный и максимальный сварочный ток (или вводимую мощность). Далее строят график изменения сварочных токов в зависимости от скорости сварки и по нему определяют интервал скорости, в котором оптимальный сварочный ток занимает среднее положение между максимальным и минимальным значениями. Выбранный в этой области режим сварки обеспечивает наибольшую стабильность формирования шва.

Цикл сварки. Установки, предназначенные для сварки плавлением в камерах с контролируемой атмосферой, снабжаются устройствами для выполнения определенной последовательности сварки (рис. 56). При этом выполняются следующие переходы:

- загрузка изделий в посадочные места механизма перемещения свариваемых деталей (время этого перехода определяется числом позиций механизма перемещения);

- установка инструмента по стыку свариваемых кромок (при этом совмещается ось сварочного инструмента относительно стыка свариваемых кромок и проверяется биение инструмента относительно стыка); герметизация камеры (осуществляется прижимом технологической крышки к соответствующему уплотнению корпуса камеры);

- откачка камеры (при сварке в среде инертных газов производится, как правило, с помощью форвакуумных насосов; при сварке в вакууме

(на циклограмме показано пунктиром) откачкой обеспечивается разрежение, которое поддерживается в течение всего процесса сварки и охлаждения);

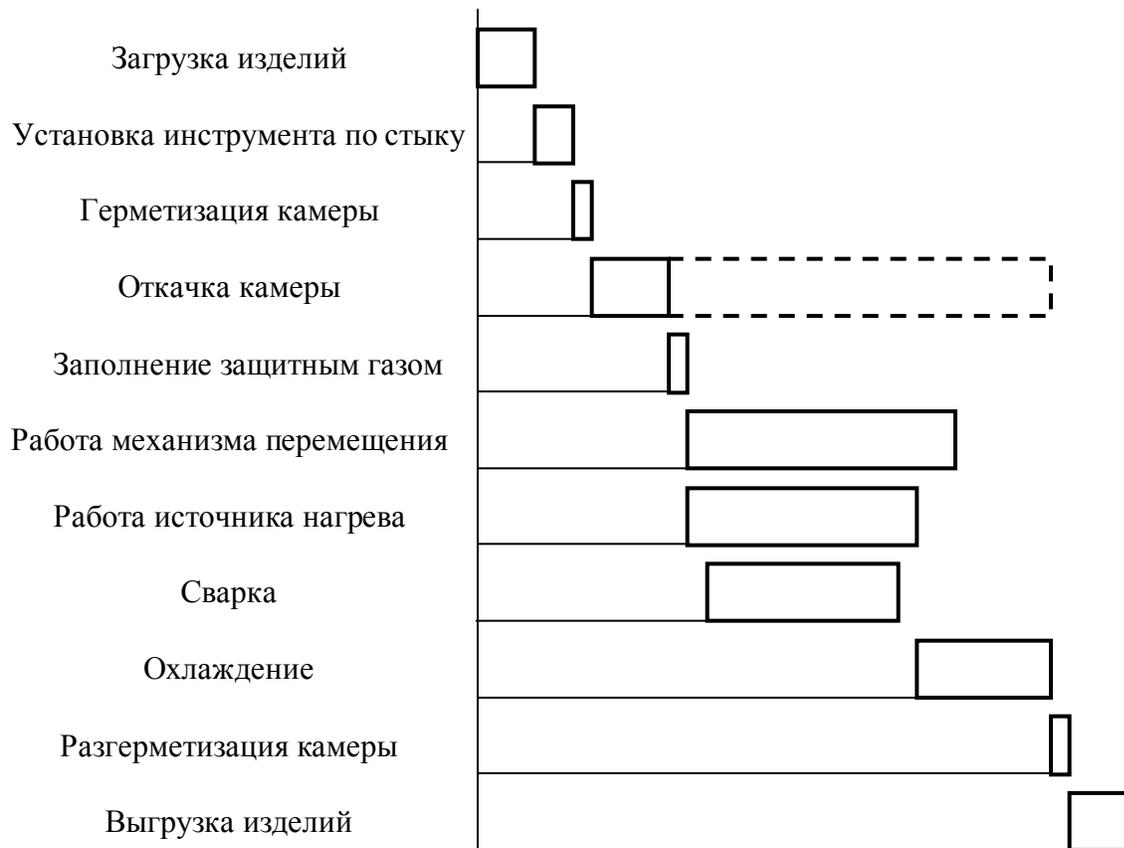


Рис. 56. Последовательность переходов процесса сварки плавлением в камерах с контролируемой атмосферой

– заполнение защитным газом (осуществляется после предварительной откачки при сварке в среде инертных газов);

– работа механизма перемещения свариваемых деталей (включается механизм перемещения, устанавливается заданная скорость сварки);

– работа источника нагрева (время этого перехода определяется временем выхода источника нагрева на заданный режим, временем сварки и временем возвращения в исходное состояние);

– сварка (за это время происходит нарастание мощности инструмента до рабочей; перекрытие шва при сварке тел вращения; заварка кратера, при

которой происходит медленное уменьшение вводимой в свариваемые кромки мощности);

– охлаждение (производится до температур, при которых не возникает взаимодействие свариваемых материалов с газами воздуха; температура определяется экспериментально);

– выгрузка изделий (сваренные детали извлекают из посадочных мест механизма перемещения и укладывают в специальную тару).

## **2.5. Особенности сварки плавлением материалов для электронного машиностроения**

Надежность и долговечность электронных приборов во многом зависят от свойств и качества материалов, применяемых для их изготовления.

По характеру применения материалы электронных приборов можно разбить на три группы: применяемые при изготовлении деталей внутренней полости приборов; для деталей, ограждающих внутреннюю полость прибора от атмосферы; для внешних деталей.

К материалам каждой из групп предъявляются различные требования. Так, в материалах первой группы должно быть ограничено содержание летучих в вакууме примесей (Zn, Bi, Sb, Sn, Mn, I, S и др.).

Наличие в металлах этих примесей приводит при технологических прогревах (например, при откачке электровакуумных приборов) к их испарению и осаждению на элементах приборов. В этих же материалах должно быть ограничено содержание газов. Повышенное газоотделение материалов деталей внутренней полости усложняет процесс откачки приборов, а при хранении изделий и особенно при их эксплуатации выделение газов может привести к выходу их из строя. Поэтому содержание каждой из вредных летучих примесей в применяемых металлах и сплавах не должно превышать 0,0001 масс. доли %, а содержание газов: водорода – 0,0001 масс. доли %, азота – 0,01 масс. доли %, кислорода – 0,0001 масс. доли %.

К материалам, ограждающим вакуумную полость прибора от атмосферы, помимо ранее перечисленных предъявляется еще очень важное требование – они должны быть вакуумно-плотными, т. е. в них должны отсутствовать субмикроскопические трещины, волосовины, сообщающиеся между собой поры и раковины. Выполнение этих требований достигается переплавом материалов в вакуумных печах. Таким образом, при сборке приборов сварке подвергаются чистые от примесей материалы.

При изготовлении деталей электронных приборов в настоящее время используются как традиционные материалы электронной техники – бескислородная медь марок МБ, МВ, никель, молибден, вольфрам, низкоуглеродистая сталь типа НЖ (Армко-железо), ковар 29НК, так и материалы, заимствованные из других отраслей промышленности: нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, мельхиор, константан, монель-металл и др.

Свариваемость материалов. Свариваемость – комплексная технологическая характеристика металла (основного и присадочного). Она зависит от технологии производства металла и технологии сварки, отражает реакцию металла на процесс сварки и определяет его пригодность для изготовления изделий, удовлетворяющих условиям их эксплуатации.

Свариваемость металла тем выше, чем большее число способов сварки может быть применено к нему, чем проще технология сварки, чем шире диапазон допускаемых режимов сварки.

При рассмотрении свариваемости конкретного материала обычно решают следующие вопросы:

1. Какие характерные дефекты возникают при сварке данного материала ?
2. Каковы причины их возникновения ?
3. Какие меры нужно предпринять для их устранения ?

Сварка цветных металлов. Сварка меди затруднена ввиду ее специфических физических и химических свойств. К таким свойствам относятся:

– высокая теплопроводность, что приводит к большим скоростям охлаждения, малому времени пребывания сварочной ванны в жидком состоянии и к необходимости применения повышенных мощностей источников нагрева;

– высокая усадка при затвердевании;

– высокая активность в жидком состоянии по отношению к газам окружающей атмосферы.

Свойства меди обуславливают возникновение значительных деформаций в процессе сварки, повышенную склонность сварных швов к образованию газовых пор и трещин. Поры в сварных швах меди и медных сплавов возникают в результате взаимодействия жидкого металла с газами.

В основном на образование пор при сварке меди оказывает влияние водород. Водород в меди растворяется с повышением температуры довольно значительно. При охлаждении растворимость водорода снижается и он не успевает покинуть металл, образуя газовые поры.

При наличии в меди кислорода в виде закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  растворенный водород может взаимодействовать с ней, образуя в результате реакции  $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$  пары воды. Водяные пары не растворяются в меди и образуют при кристаллизации поры. Если реакция идет в твердой меди вблизи шва, то пары воды накапливаются в микродефектах, создают в них огромное давление, которое разрушает металл (это явление носит название «водородная болезнь»).

Жидкая медь активно реагирует с кислородом, попадающим в зону сварки. При этом часть кислорода растворяется в меди, а часть связывается в химическое соединение  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Закись меди выделяется в металле шва в виде самостоятельной фазы в составе эвтектики  $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$ . Образующаяся эвтектика обволакивает кристаллы меди, вызывая хрупкость и трещины в металле шва. Таким образом, при сварке меди для исключения образования дефектов

необходимо тщательно защищать место сварки от проникновения газов воздуха.

Однако, несмотря на принимаемые меры по защите места сварки от воздействия вредных газов, сварные швы имеют низкую механическую прочность, связанную с крупной кристаллической структурой металла шва.

Для повышения эксплуатационных характеристик металла швы обычно легируют никелем или сплавом «никель–хром» через вставку, закладываемую между отбортованными кромками (рис. 57).

Сварка никеля. Никель обладает при сварке большой чувствительностью к наличию примесей и растворенных газов. Обычно никель всегда содержит примеси в количестве от 0,1 до 0,6 %. Однако не все примеси оказывают вредное влияние на образование дефектов при сварке. Наибольшее вредное влияние на качество сварных соединений при сварке никеля оказывают примеси серы, висмута, свинца, сурьмы, мышьяка, кадмия.

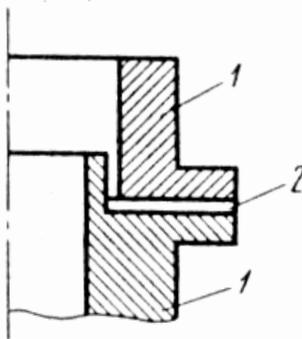


Рис. 57. Схема легирования металла шва через прокладку:  
1 – свариваемые кромки, 2 – никелевая прокладка

Сера обладает большим химическим сродством с никелем. При температурах выше 673 К сера с никелем образует сульфид, который в виде эвтектики Ni–NiS располагается вдоль границ зерен металла и охрупчивает его. Сульфид никеля может образовываться, если с никелем соприкасаются материалы, которые содержат даже небольшие количества серы (горючие материалы, масло, жиры, краски и т. д.). При долгом хранении деталей, изготовленных из никеля, в заводской атмосфере на них образуется

налет, содержащий серу. Этот налет не снимается при обезжиривании и требует специальных мер для его удаления (травление или механическая зачистка).

Другие перечисленные примеси практически не растворимы в никеле в твердом состоянии. Находясь в расплавленном при сварке никеле, эти элементы образуют легкоплавкие эвтектики, резко ухудшающие механические и технологические свойства сварных швов. Содержание таких примесей в никеле не должно превышать 0,002–0,005 масс. %.

На качество металла шва при сварке никеля большое влияние оказывают различные газы, попадающие в зону плавления.

Водород практически не оказывает влияния на образование пор при сварке никеля, так как его растворимость при переходе Ni из жидкого состояния в твердое меняется незначительно и избыточный водород успевает выделиться из сварочной ванны при затвердевании.

Однако если в никеле имеется небольшое количество кислорода в виде закиси, попадание водорода в зону сварки может привести к появлению дефектов типа «водородная болезнь», характерных для сварки меди.

Основной причиной образования пор при сварке никеля является попадание в зону сварки кислорода. Поэтому сварка никеля требует тщательной защиты металла шва от кислорода атмосферного воздуха.

Сварка сталей. Наиболее широко в конструкциях приборов используется нержавеющая сталь типа 12X18Н10Т. Эта сталь имеет аустенитную структуру. При ее сварке часто образуются горячие трещины, имеющие межкристаллитный характер. Образование горячих трещин связано с особенностями кристаллизации металла шва. При кристаллизации многокомпонентного сплава, каким является рассматриваемая сталь, вначале кристаллизуется более тугоплавкая составляющая сплава. Она образует как бы жесткий каркас, между ребрами которого располагается жидкая фаза, состоящая из вредных легкоплавких соединений (бора, кремния, фосфора, серы и др.). Под действием усилий, возникающих при кристаллизации металла, каркас разрушается и в сварном шве образуются надрывы – трещины, не

заполненные жидким металлом. Горячие трещины чаще образуются в крупнозернистой структуре металла шва.

Применение способов, способствующих измельчению кристаллов и дезориентации структуры, утоньчает межкристаллитные прослойки и повышает стойкость швов к образованию горячих трещин. Одним из таких способов является получение швов с двухфазной структурой, когда помимо аустенита в состав структуры входит некоторое количество первичного  $\delta$ -феррита. Такое положительное действие феррита в аустенитно-ферритных швах связано с изменением характера процесса кристаллизации металла сварочной ванны (одновременное выпадение из жидкой фазы кристаллов аустенита и феррита приводит к измельчению и дезориентации структуры, т. е. к уменьшению растущих кристаллов, разделенных участками  $\delta$ -феррита). Получение аустенито-ферритных швов достигается их дополнительным легированием ферритообразующими элементами: хромом, алюминием, молибденом и др. Рекомендуемое содержание ферритной фазы в наплавленном металле ограничивается 2–6 масс. %.

В конструкциях приборов могут быть использованы сварные соединения и из разнородных сталей. Причем могут свариваться как стали, имеющие сходную структуру (например, обе свариваемые стали могут иметь аустенитную структуру), так и стали разных структурных классов (одна из соединяемых сталей может иметь аустенитную структуру, а другая – ферритную).

Сварные соединения из различных металлов одного структурного класса могут быть получены с использованием тех же режимов и технологии сварки, что и соединения однородных сталей данного класса.

При сварке сталей разных структурных классов получение качественных соединений затруднено. В этом случае наблюдается резкая химическая неоднородность состава металла шва, образование в зоне оглавления малопрочных и хрупких прослоек переменного состава, наличие остаточных напряжений, которые не устраняются последующей термической обработкой.

Регулирование качества сварного шва достигается изменением доли участия свариваемых кромок в процессе формирования шва. В условиях сварки в отбортовку эта доля меняется в зависимости от соотношения толщин свариваемых кромок, смещения оси источника нагрева относительно стыка кромок от параметров режима сварки.

Сварка тугоплавких металлов. К тугоплавким металлам, используемым в сварных конструкциях электронных приборов, относятся: титан, цирконий, ниобий, тантал, гафний, молибден, вольфрам. Эти материалы применяются в основном в конструкциях катодов электровакуумных приборов.

Тугоплавкие металлы обладают рядом общих физико-химических и технологических свойств, основными из которых являются:

- высокая химическая активность по отношению к атмосферным газам как в расплавленном, так и в твердом состоянии при повышенных температурах;
- высокая чувствительность к термическому циклу при сварке;
- склонность к порообразованию;
- склонность к образованию трещин.

Эти свойства в основном определяются высокой чувствительностью тугоплавких металлов к элементам внедрения – кислороду, азоту, водороду, углероду. Эти элементы влияют на большинство технологических характеристик: деформируемость в холодном и горячем состоянии, обрабатываемость резанием и, особенно, на свариваемость. Взаимодействие тугоплавких металлов с газами приводит к охрупчиванию металла.

Исходя из перечисленных физико-химических и технологических свойств, можно сформулировать ряд требований, которые необходимо выполнять при получении качественных сварных соединений:

- высокая чистота исходных материалов (основного и присадочного металла, защитных газов), обеспечивающая минимальное содержание примесей;
- применение технологии сварки, гарантирующей качественную защиту (изоляция от атмосферы расплавленного металла и металла, нагреваемого в

процессе сварки до температур начала его реакции с газами, обеспечивается использованием очищенных инертных газов или вакуума не ниже  $3,99 \cdot 10^{-2}$  Па; наряду с защитой необходима тщательная подготовка поверхности деталей под сварку: травление для удаления поверхностных окислов, обезжиривание, отжиг в вакууме);

– производство сварки на режимах, обеспечивающих минимальную зону разогрева в связи со склонностью тугоплавких металлов к росту зерна в зоне термического влияния и к снижению пластичности материалов.

В соответствии с этими требованиями методы сварки тугоплавких металлов должны обеспечивать высокие мощность и концентрацию энергии в пятне нагрева, а также эффективную защиту от взаимодействия с атмосферой воздуха.

По свариваемости, технике и технологии сварки тугоплавкие металлы можно разделить на две группы: к первой группе относятся титан, цирконий, гафний, ниобий, тантал; ко второй – молибден, вольфрам. Металлы первой группы при соблюдении технологических условий сварки обладают удовлетворительной свариваемостью. Сварка металлов второй группы представляет значительные трудности в связи с повышенной чувствительностью к термическому воздействию процесса сварки, вызывающему хрупкость сварных соединений. Очень низкая растворимость в этих металлах элементов внедрения ( $O_2$ ,  $N_2$ , C), являющихся неизбежными примесями, приводит к выпадению оксидов, нитридов, карбидов по границам зерен, что тоже значительно снижает пластичность сварного соединения. Пластичность сварных швов этих металлов удается несколько повысить путем легирования их сплавами рения.

Сварка разнородных материалов. Разнородные материалы – это металлы, имеющие различное кристаллическое строение и свойства, а также сплавы на их основе, отличающиеся по химическому и фазовому составу. В конструкциях электронных приборов встречаются соединения между разнородными металлами (медь + железо; никель + медь; медь + вольфрам; молибден +

никель; железо + никель и т. д.); между металлами и сплавами на их основе (железо + 12Х18Н10Т; железо + ковар 29НК); между сплавами на одной основе (29НК + 12Х18Н10Т); между сплавами на различной основе (сплав 29НК, имеющий основу – железо, соединяется с медноникелевым сплавом МН19).

Для большинства пар разнородных металлов и сплавов, которые необходимо соединить сваркой плавлением, характерным является существенное различие в температурах плавления, плотности, теплофизических коэффициентах. Отличаются также и кристаллографические характеристики – типы решетки и ее параметры. При сварке металлов с различными физико-химическими свойствами свойства металла шва, как правило, хуже свойств соединяемых металлов. Поэтому основной целью при сварке разнородных металлических материалов является направленное регулирование диффузионных, тепловых и других физико-химических процессов, обеспечивающих необходимые свойства шва и сварного соединения.

В решении проблемы сварки разнородных материалов в настоящее время наметился ряд направлений.

Сварка с расплавлением обеих свариваемых кромок. Металлы, образующие при взаимодействии непрерывный ряд твердых растворов (медь + никель; железо + никель; молибден + тантал и др.), могут быть сварены с расплавлением соединяемых кромок. Металлы с ограниченной взаимной растворимостью (медь + железо, железо + ванадий и др.), не образующие между собой интерметаллических соединений, могут также соединяться с расплавлением обеих кромок. Концентрация элементов в том и другом случае должна быть строго регламентирована.

Необходимая концентрация элементов соединяемых металлов задается из условия получения удовлетворительных механических свойств и отсутствия склонности металла шва к образованию трещин.

Заданную концентрацию соединяемых элементов в металле шва в условиях сварки в отбортовку можно получить смещением источника нагрева в сторону одного из расплавляемых металлов (рис. 58, а), изменением

соотношения толщин свариваемых металлов (рис. 58, б), превышением одной кромки над другой (рис. 58, в), взаимным расположением свариваемых кромок и источника нагрева (рис. 58, г). В большинстве случаев необходимо использовать совокупность технологических и конструкторских мероприятий для достижения поставленной цели.

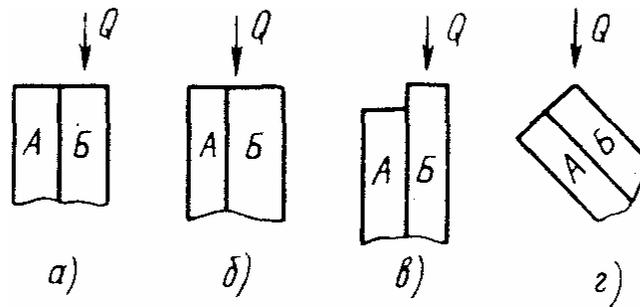


Рис. 58. Схема расположения источника нагрева  $Q$  и свариваемых кромок (А, Б) при сварке разнородных металлов

#### Сварка с расплавлением более легкоплавкого из соединяемых материалов.

В этом случае сварка ведется с расплавлением одного из соединяемых материалов, имеющего более низкую температуру плавления. Прочные связи образуются в процессе смачивания жидким металлом поверхности твердого металла и последующей диффузии. Такой метод возможен для соединения металлов с большой разницей в температурах плавления (например, медь + нержавеющая сталь, медь + молибден и др.).

В результате диффузии на границе оплавления двух материалов возможно образование сплошных прослоек интерметаллидов, обладающих большой твердостью и хрупкостью. Другим наиболее часто встречающимся процессом в этой зоне можно считать образование трещин в твердом металле в зоне контактирования его с жидким металлом.

Вероятность образования сплошных прослоек интерметаллических соединений по границе сплавления определяется в основном тремя параметрами: температурой подогрева твердого (нерасплавляемого) металла; температурой перегрева жидкого металла; продолжительностью взаимодействия жидкого металла с твердым. Особенно сильно влияет на

процесс образования интерметаллических соединений продолжительность контактирования соединяемых металлов. Обычно стремятся иметь все три параметра на минимально допустимом уровне.

Иногда на поверхность твердого нерасплавляемого металла наносят специальное покрытие, которое не образует химических соединений с соединяемыми материалами. Такое покрытие способствует торможению диффузионных процессов на границе контакта соединяемых материалов.

Образование трещин в твердом материале в зоне контактирования его с легкоплавким расплавленным металлом характерно для сварки меди и ее сплавов со сталями и сплавами на основе железа (12Х18Н10Т, 29НК и др.). В зоне контактирования образуются трещины, заполненные медью, размером от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Трещины, направленные от границы сплавления, как правило, располагаются по границам зерен стали.

Возникновение трещин в зоне контактирования при сварке с расплавлением одной кромки зависит от различных условий, основными из которых являются:

- химический состав и структура металла, на который воздействует расплав меди или ее сплава; при наплавке их на сталь ферритного класса трещины отсутствуют, а при наплавке на сталь перлитного класса трещины образуются;

- химический состав наплавляемого на сталь металла; например, добавка в медь никеля или алюминия снижает активность воздействия жидкого металла на сталь;

- режим сварки; с увеличением погонной энергии количество и глубина трещин возрастает.

Режимы, вызывающие расплавление твердого металла, способствуют образованию и развитию трещин.

Сварка по рассматриваемой схеме возможна и для металлов, не обладающих взаимной растворимостью в жидком и твердом состояниях

(например, медь + молибден, медь + вольфрам). Соединение в этом случае образуется за счет плавления и смачивания медью твердого молибдена (вольфрама). Медь недостаточно хорошо смачивает молибден и вольфрам. Улучшить смачиваемость и растекаемость меди по этим материалам можно введением в нее железа, марганца, никеля и других добавок. Количество этих добавок не должно превышать 1 масс. %.

#### Сварка разнородных материалов через промежуточные вставки.

Материалы, образующие при взаимодействии хрупкие интерметаллические соединения, эвтектики склонные к образованию трещин, целесообразно сваривать через промежуточные вставки из материала, хорошо сваривающегося с соединяемой парой металлов (рис. 59, а), или через биметаллические вставки из соединяемых металлов, полученных сваркой давлением или совместной прокаткой (рис. 59, б).

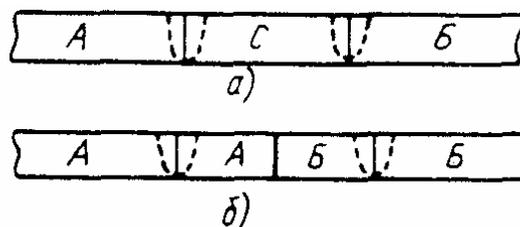


Рис. 59. Схема сварки разнородных металлов (А, Б) через промежуточные вставки:  
а – через третий металл (С), б – через биметаллическую вставку (А–Б)

## **2.6. Оборудование для сварки плавлением изделий электронного машиностроения**

Оборудование, применяемое для получения соединений способами сварки плавлением, должно обеспечить: загрузку и выгрузку изделий; закрепление и перемещение свариваемых деталей относительно сварочного инструмента или, наоборот, перемещение сварочного инструмента относительно неподвижного свариваемого узла; совмещение оси сварочного инструмента со стыком свариваемых кромок; создание защитной атмосферы; возможность наблюдения и контроля за процессом (визуально или с помощью приборов); формирование

потока энергии с заданными параметрами; ручное или автоматическое управление процессом.

В соответствии с этим в состав сварочного оборудования входят следующие механизмы и системы: система создания защитной атмосферы; механизмы перемещения свариваемых изделий и сварочного инструмента; система наблюдения за процессом сварки; сварочный инструмент; источник питания сварочного инструмента; системы управления и контроля.

На рис. 60 приведена обобщенная принципиальная схема конструкции и основные узлы установки для сварки плавлением изделий электронной техники.

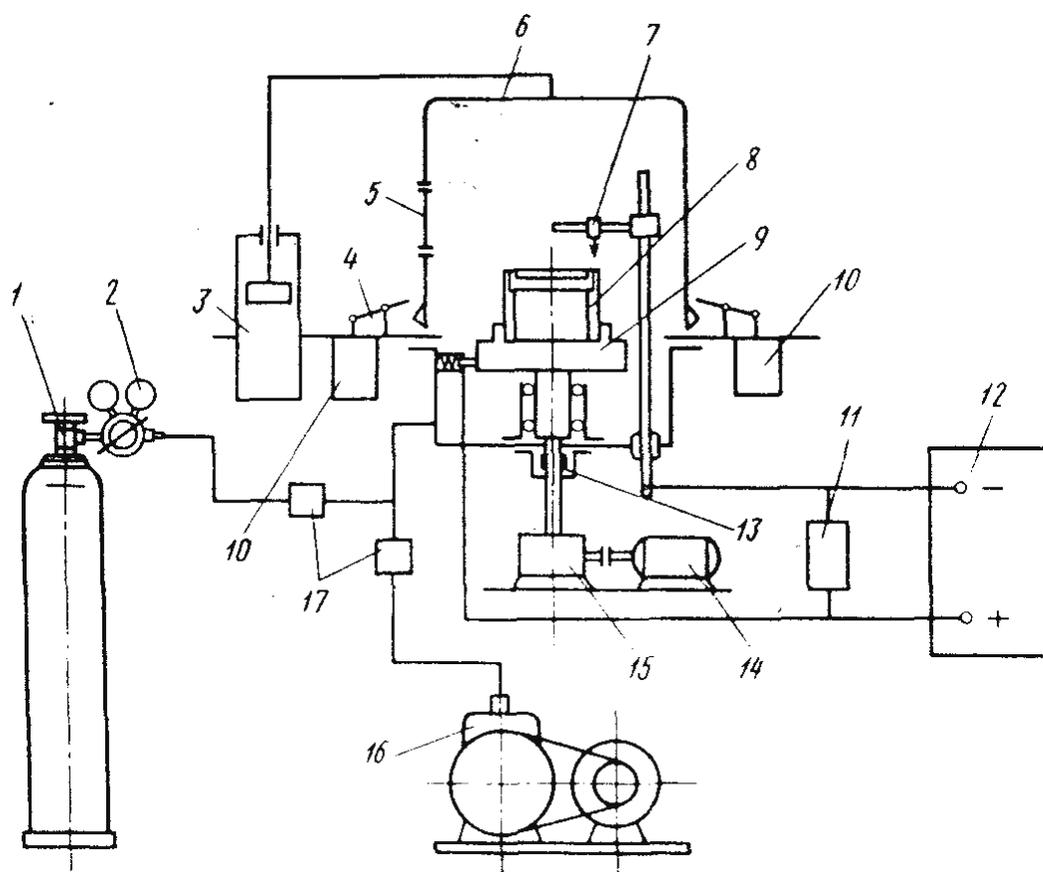


Рис. 60. Принципиальная схема конструкции и основные узлы установки для сварки плавлением

Свариваемый узел 8 устанавливается на планшайбе 9 механизма вращения. Сварочный инструмент 7 с помощью соответствующего механизма устанавливается относительно стыка свариваемых кромок. Производится

герметизация сварочной камеры 6 с помощью пневмо-цилиндра 10 и зажима 4. Для создания контролируемой защитной атмосферы в сварочной камере используется вакуумная система и система напуска защитного газа. При сварке в вакууме в камере создается разрежение с помощью вакуумного насоса 16. При сварке в среде инертных газов камера после откачки заполняется инертным газом. Газ подается из баллона 1 через газовый редуктор 2 и один из клапанов 17 в камеру. После создания защитной атмосферы производится сварка. Для этого свариваемый узел 8 приводится во вращение от двигателя постоянного тока 14 через механический редуктор 15 и вакуумное уплотнение 13. При вращении изделия в свариваемые кромки вводится энергия от сварочного инструмента 7, подключенного к источнику питания 11, 12. Наблюдение за процессом осуществляется через иллюминатор 5. После окончания сварки изделие выдерживается в камере определенное время для предотвращения окисления места сварки. Далее производится разгерметизация камеры, поднимается подвижная часть сварочной камеры с помощью электромеханического или пневматического механизма 3, изделие снимается с планшайбы и укладывается в тару.

Системы создания защитной атмосферы. В состав системы, как правило, входят: сварочная камера, средства откачки и напуска защитного газа, измерительная и управляющая аппаратура.

Сварочные камеры. Камера является одним из наиболее важных узлов сварочной установки, так как в ней создаются условия для полной защиты изделия от воздействия окружающей среды в процессе сварки.

Сварочные камеры установок делят на две группы: универсальные и специализированные. К универсальным относятся камеры, конструкция которых позволяет сваривать самые разнообразные изделия в пределах габаритов рассматриваемых камер. Конструкция специализированных камер определяется конструкцией конкретных изделий.

К конструкции сварочной камеры предъявляются следующие требования:

– размеры камер должны быть достаточными для размещения механизмов перемещения свариваемых изделий (или группы изделий) и сварочного инструмента с механизмом корректировки (вместе с тем объем камер должен быть минимальным для сокращения времени откачки и расхода защитного газа);

– камеры должны обеспечивать удобный доступ в рабочую зону;

– камеры должны иметь быстродействующие устройства для герметизации и обеспечивать герметичность рабочего объема;

– камера должна иметь достаточную прочность и жесткость всех элементов.

В конструкциях сварочных установок камеры выполняются наиболее часто либо в виде куба, либо цилиндрическими (рис. 61).

Камеры кубического типа (рис. 61, а) имеют четко выраженный каркас, одна из боковых граней которого служит для крепления к станине установки и для подключения откачной системы. На остальных гранях каркаса выполнены круглые окна. Они герметизируются съемными или открывающимися крышками. Эти крышки могут иметь смотровые иллюминаторы, служить базой для закрепления механизмов перемещения свариваемых изделий, сварочного инструмента и т. д.

Камеры цилиндрической формы (рис. 61, б), получившие широкое распространение в вакуумной технике, часто используются и при конструировании сварочных установок. По сравнению с камерами кубической формы объем их используется несколько хуже, однако их технологичность изготовления выше. На одном из торцов цилиндрической камеры устанавливается открывающаяся на шарнирах крышка. Для подключения откачной системы, закрепления смотровых окон и других устройств используются приваренные к корпусу патрубки и горловины с заранее обработанными фланцами.

Камеры цилиндрической формы с открывающейся крышкой требуют дополнительных площадей рабочих помещений. Кроме того, они не совсем

удобны при загрузке и выгрузке свариваемых деталей. Этих недостатков лишена цилиндрическая камера, показанная на рис. 61, в. Эта камера состоит из неподвижного основания с необходимыми технологическими отверстиями и колпака, который поднимается с помощью пневматического или электромеханического устройства, обеспечивая свободный доступ к рабочей зоне.

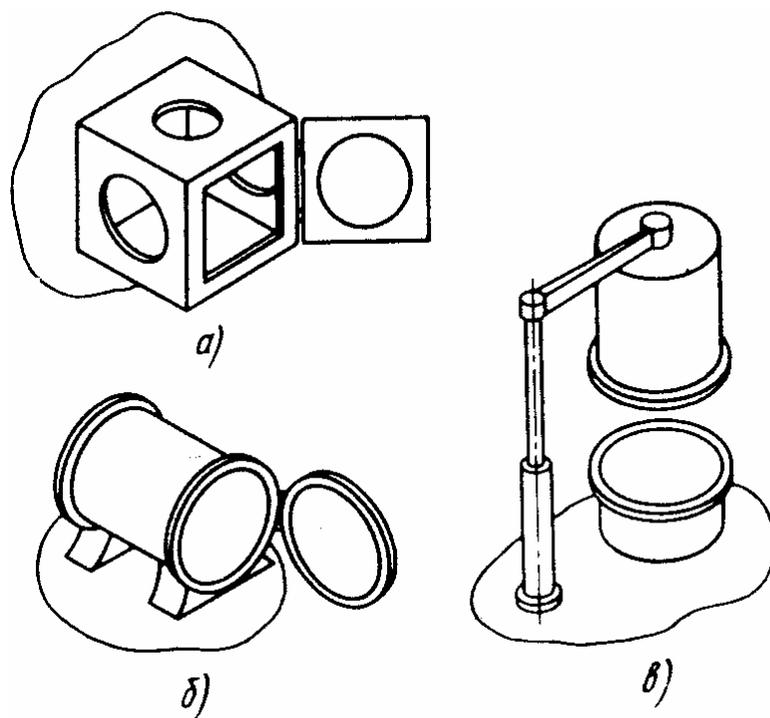


Рис. 61. Основные схемы конструкций сварочных камер

В конструкциях сварочной камеры кроме проемов для загрузки и выгрузки свариваемых изделий, закрепления сварочного инструмента, смотровых иллюминаторов имеются также технологические отверстия для подвижных и неподвижных вводов, датчиков измерения давления, электрических вводов, кранов-натекателей и т. д.

Средства откачки сварочных камер. Откачные (вакуумные) системы в сварочных установках служат для создания и поддержания в рабочем объеме разрежения при сварке в вакууме или для удаления воздуха из объема камеры перед наполнением ее инертным газом.

Откачные системы состоят из вакуумных насосов, коммутирующих элементов, вакуум-проводов и средств измерения давления.

На схеме (рис. 62) представлена наиболее распространенная в промышленных установках для сварки в высоком вакууме (предельный вакуум  $1 \times 10^{-6}$  мм. рт. ст., или  $1,33 \times 10^{-4}$  Па) схема откачной системы. Она состоит из высоковакуумного агрегата 1 типа ВА, вакуумных вентилях или клапанов 2, предохранительного электромагнитного клапана 3, перекрывающего систему при внезапном отключении энергии, клапанов для напуска воздуха 4, форвакуумного насоса 5, ловушки 6, манометрических датчиков и приборов измерения давления 7.

При сварке в камерах, заполняемых инертным газом, применяется, как правило, откачка форвакуумным насосом. Схема его подключения к камере показана на рис. 60 (16, 17).

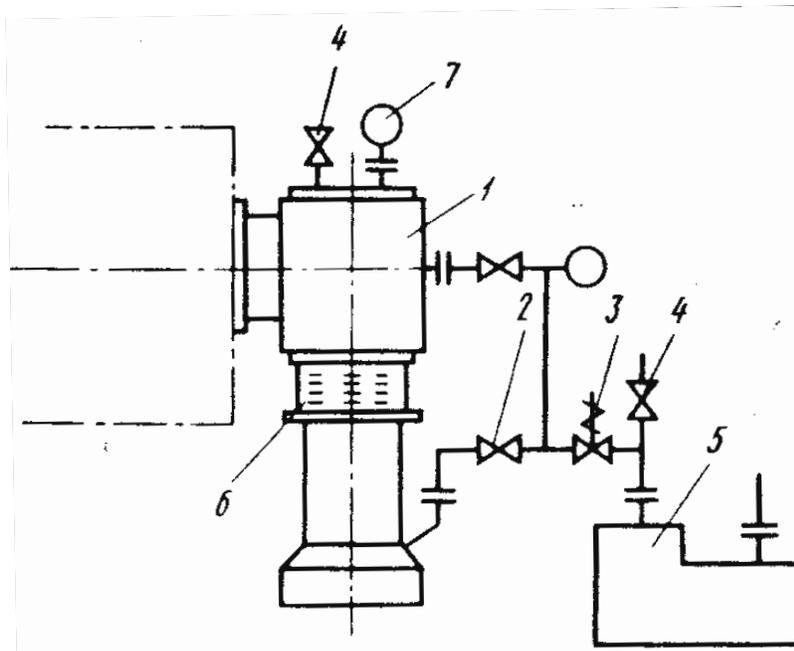


Рис. 62. Схема откачной системы

Система напуска инертного газа. Эта система представлена на рис. 60 (1, 2, 17). После откачки сварочной камеры до необходимого вакуума насос отключается и в камеру подается инертный газ из баллона. Газ в баллоне находится под большим давлением. Поэтому перед его напуском давление на выходе из баллона понижают с помощью газового редуктора 2 (см. рис. 60).

После напуска в сварочной камере создается небольшое избыточное давление, которое не допускает проникновения атмосферного воздуха внутрь камеры и облегчает открывание камеры после окончания сварки.

Сварка в вакуумной камере или в камере, наполненной инертным газом позволяет осуществить общую защиту свариваемого изделия от воздействия газов окружающей среды ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  и др.).

Однако в некоторых случаях при сварке ответственных узлов электронных приборов применяют струйную защиту места сварки. Защита в этом случае осуществляется путем подачи к месту сварки защитного газа специальной деталью сварочной горелки, называемой соплом.

При истечении газового потока из сопла горелки 1 его центр с турбулентным потоком 3 окружен тонким слоем ламинарного потока 2 (рис. 63), толщина ламинарного слоя и его длина на выходе из горелки зависят от конфигурации сопла, расхода газа и от других факторов. При выходе из сопла горелки ламинарный слой начинает разрушаться за счет взаимодействия газового потока с окружающим воздухом. Таким образом, воздух отделен от центра газового потока горелки ламинарным слоем, который действует как защитный относительно центральной части газового потока.

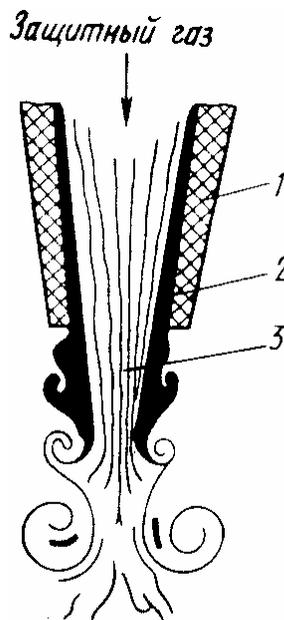


Рис. 63. Схема газовых потоков при истечении их из сопла горелки:  
1 – сопло, 2 – ламинарный поток, 3 – турбулентный поток

В систему создания струйной газовой защиты (рис. 64) входят баллон с инертным газом 1, вентиль 2, газовый редуктор 3, ротаметр 4, служащий для измерения расхода газа, сварочная горелка 5 с соплом определенной формы.

При струйной защите в зону сварки непрерывно подается газ, который рассеивается, унося с собой продукты реакций, проходящих в сварочной ванне. В этом случае процесс сварки идет в относительно уравновешенной (с точки зрения загрязненности) атмосфере, а концентрация примесей  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  и  $H_2O$  в основном определяется наличием их в защитном газе, подаваемом из баллона. Недостатком этого метода является трудность' защиты обратной стороны сварного шва.

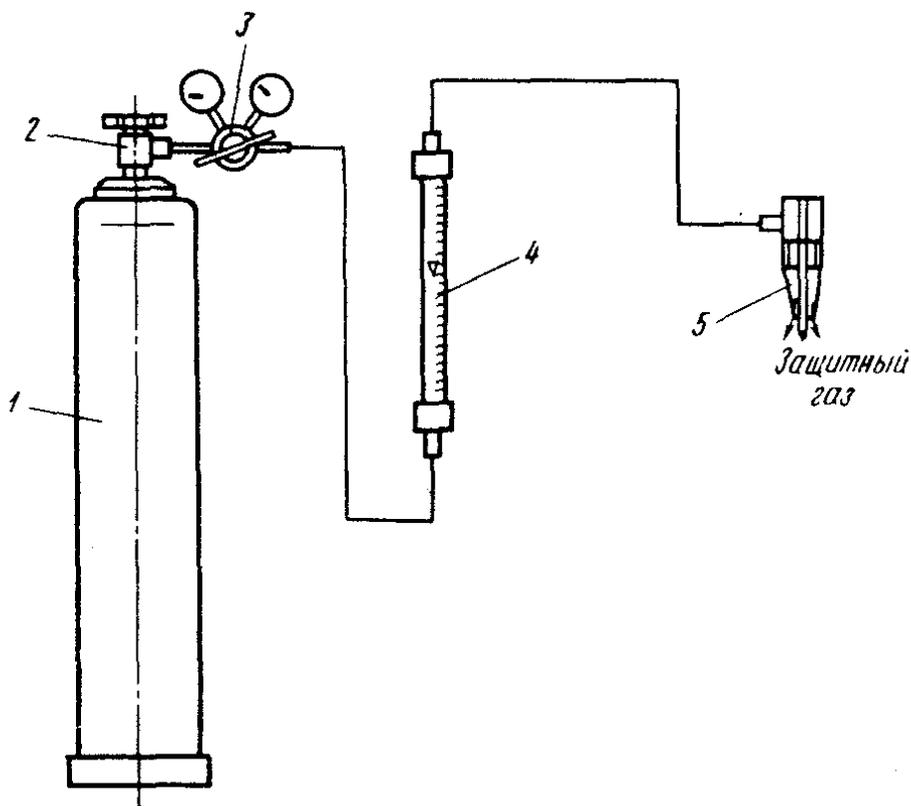


Рис. 64. Схема системы создания струйной газовой защиты

**Механизмы перемещения.** Механизмы перемещения в оборудовании для сварки плавлением предназначены для центровки и фиксации свариваемых деталей, перемещения свариваемого изделия и сварочного инструмента (электронной пушки, сварочной горелки и т. д.).

Технологические возможности сварочных установок в значительной мере зависят от конструкции механизма перемещения свариваемых деталей. Конструкция механизма перемещения определяет конфигурацию шва, его максимальные размеры, количество швов различной конфигурации, выполняемых на одной и той же установке (т. е. степень универсальности установки, ее производительность и т. д.).

Обычно для сварных конструкций электронных приборов характерны следующие конфигурации сварных швов: прямолинейные швы и круговые с горизонтальной, вертикальной и наклонной осями вращения, точечные соединения. В соответствии с этим в универсальных установках имеются устройства для перемещения свариваемого изделия по двум координатам в горизонтальной плоскости (обычно вдоль и поперек сварочной камеры) и вращения вокруг вертикальной, горизонтальной или наклонной осей.

Конструктивные решения механизмов перемещения свариваемых изделий весьма разнообразны. В основном в практике наметились три основных направления:

- создание универсальных механизмов с большим количеством степеней свободы;
- создание упрощенных сменных механизмов (например, отдельный механизм для сварки кольцевых швов с вертикальной осью вращения, отдельно механизм для сварки с горизонтальной осью вращения и т. д.);
- создание механизмов, предназначенных для сварки одного типа изделий в специализированных сварочных установках (например, в установках для герметизации корпусов микросхем).

В первом случае выполняются универсальные конструкции, обеспечивающие широкие технологические возможности. Однако сложность таких конструкций обуславливает их высокую стоимость. Применение этих механизмов целесообразно при единичном и мелкосерийном производстве.

Механизмы во втором и третьем случаях значительно проще по конструкции и дешевле в изготовлении. Основным их недостатком являются дополнительные затраты времени на переналадку. При крупносерийном и массовом производстве сменные устройства и механизмы, приспособленные для сварки конкретного изделия, позволяют получать максимальный эффект.

Конструкция механизма перемещения деталей в значительной степени зависит от способа закрепления сварочного инструмента. Наиболее сложные конструкции механизмов характерны для установок с неподвижно закрепленным в корпусе сварочным инструментом (в установках для лазерной сварки лазерная головка неподвижно закреплена на корпусе). В этом случае все рабочие, установочные и транспортные перемещения, в том числе и регулировку положения изделия по вертикали, выполняют механизмом перемещения изделия.

Для перемещения изделия при сварке прямолинейных швов (на рис. 65 направление обозначено осью  $x$ ) используется простой механизм в виде тележки, передвигающейся по направляющим корпуса механизма.

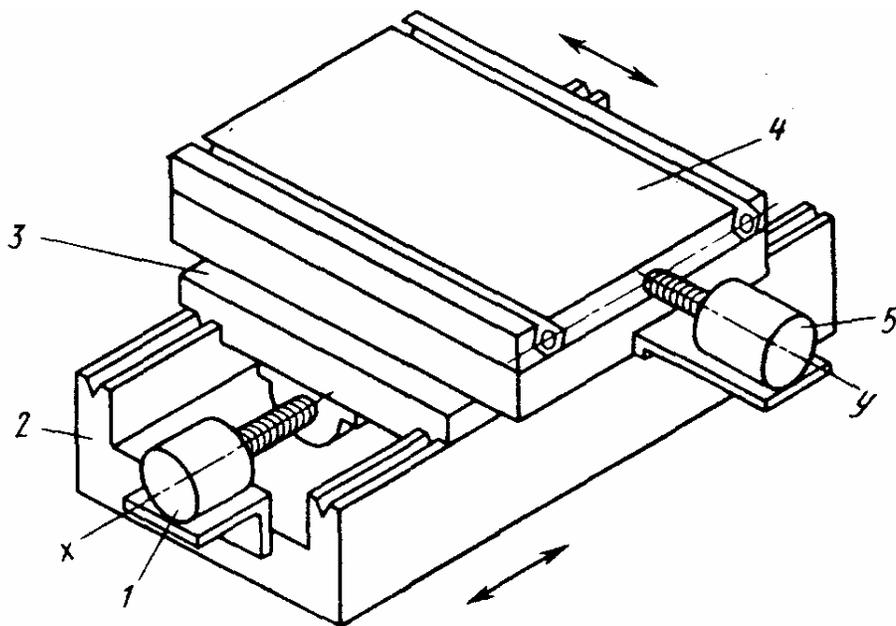


Рис. 65. Схема конструкции двухкоординатного стола: 1 – привод нижней каретки, 2 – основание, 3 – нижняя каретка, 4 – верхняя каретка, 5 – привод верхней каретки

Тележка движется от привода механизма через элемент типа «винт–гайка». Если к продольному перемещению добавляется поперечное (по направлению оси  $y$ ), то на продольной тележке устанавливают поперечные направляющие с дополнительной кареткой. Поперечная каретка снабжается самостоятельным приводом. Рассмотренный механизм получил название двухкоординатного стола. Он широко используется самостоятельно или служит базой для более сложных механизмов перемещения изделия (например, в комплекте с двухкоординатным столом используют различного типа вращатели).

Один из таких вращателей представлен на рис. 66. Он предназначен для сварки кольцевых швов на деталях с горизонтальной осью вращения. Устанавливается вращатель на двухкоординатном столе установки.

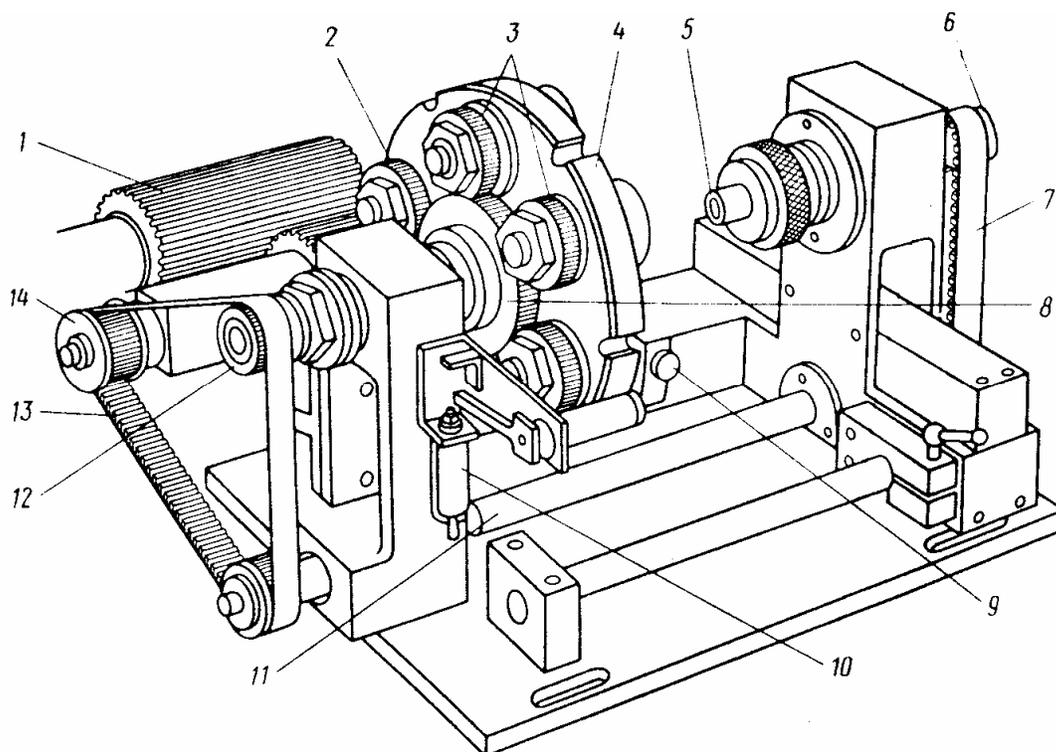
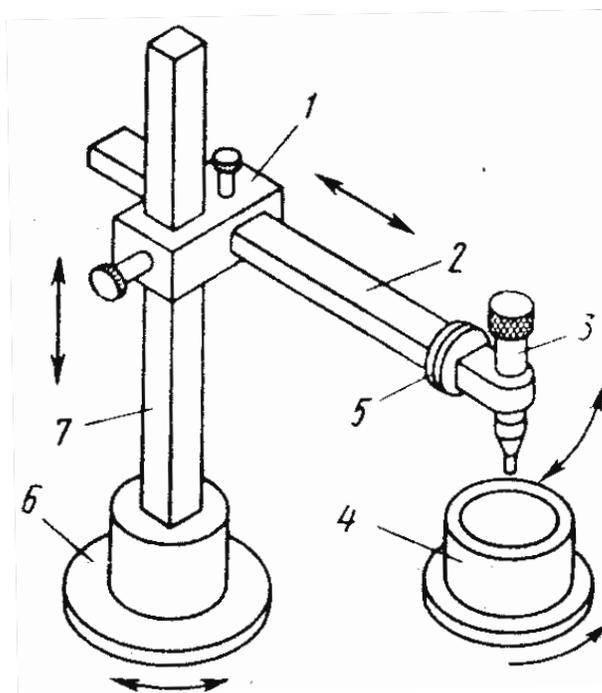


Рис. 66. Шестипозиционный механизм перемещения свариваемых деталей

От удлиненной приводной шестерни 1 вращение передается специальной шестерне 14, вращающей бесконечную зубчатую эластичную ленту 13. Лента приводит в движение шпиндель 12 и через вал 11 и вторую зубчатую ленту 7

вращает шпиндель 6. Этот шпиндель с поддерживающим центром 5 имеет прижимную пружину для удержания изделия между опорами. При групповой сварке шести изделий на шпиндель 12 устанавливается шестипозиционная планшайба 4, имеющая шесть свободно вращающихся втулок 3 с зажимными патронами и пружинами. Каждая втулка имеет шестерню 2, зацепляющуюся с центральной шестерней 8 шпинделя 12. Для фиксации положения планшайбы на сварочной позиции используется палец 9 с приводом от электромагнита 10. Планшайба 4 имеет шесть шлицев, в которые попадает палец. Использование многоместных сварочных механизмов перемещения позволяет повысить производительность установок за счет сокращения доли вспомогательного времени, необходимого для загрузки камеры, ее герметизации, откачки, разгерметизации и выгрузки деталей.

Упростить конструкцию механизма перемещения деталей можно, если разделить функции между механизмами перемещения изделий и сварочным инструментом (электронно-лучевой пушки, дуговой или плазменной горелки). В этом случае вместо одного сложного механизма создаются более простые механизмы.



На рис. 67 представлена схема расположения свариваемой детали 4 и механизма крепления и корректировки положения сварочной горелки. Регулировочные перемещения горелки 3 по вертикали выполняются с помощью каретки 1, которая крепится на стойке 7. Поперечное регулировочное перемещение горелки осуществляется движением штанги 2 в каретке 1. Наклон горелки осуществляется путем ее вращения в узле крепления 5. Кроме того, горелка может перемещаться по окружности вокруг оси стойки 7, закрепленной на основании 6. Все установочные перемещения производятся в камере до ее герметизации. Разделение функций перемещений позволяет упростить конструкцию механизма перемещения деталей. В этом случае для перемещения деталей относительно сварочного инструмента используется простой вращатель.

Приводы механизмов перемещения могут располагаться как вне, так и внутри камеры. Механизмы с приводом, работающим вне вакуумной камеры, состоят из электродвигателя, механического редуктора, герметичного вакуумного ввода, исполнительных механизмов. Наиболее совершенными являются приводы с двигателями постоянного тока: они обеспечивают постоянную мощность на валу в широком диапазоне скоростей. Для редукторов характерны большие значения передаточных чисел, одно- или двухскоростные схемы кинематических цепей, обеспечивающие возможность работы на сварочной или маршевой скорости, и высокая точность изготовления.

Размещение приводных механизмов внутри сварочной камеры значительно упрощает конструкцию. Исключаются подвижные вакуумные вводы и, следовательно, уменьшается натекание газа в рабочий объем камеры. Значительно упрощаются сложные и громоздкие передаточные механизмы.

Однако при этом возникает ряд осложнений. Например, при работе электродвигателей в вакууме ухудшаются условия их охлаждения,

увеличивается износ щеточно-коллекторного узла и подшипников, повышается газоотделение в сварочную камеру.

При проектировании механизмов особое внимание уделяется достижению необходимой точности взаимных перемещений свариваемого изделия и сварочного инструмента, а также стабилизация скорости сварки. Требование точности перемещения вызвано необходимостью точно вести сварочный инструмент по стыку свариваемых кромок. Допустимо отклонение в пределах от нескольких микрометров до 0,5 мм в зависимости от размеров пятна нагрева сварочного источника и толщины свариваемых кромок. Необходимая точность взаимного перемещения сварочного инструмента и изделия достигается использованием механизмов перемещения повышенной точности и механизмов корректировки положения сварочного инструмента относительно свариваемого стыка.

Нестабильность скорости сварки вызывает образование различных дефектов: прожогов, непроваров, неравномерности глубины проплавления и т. п. С целью стабилизации скорости сварки механизмы перемещений снабжаются безлюфтовыми передачами, устройствами для устранения зазоров, тормозными механизмами, обеспечивающими выборку всех зазоров на одну сторону и т. д. Электропривод свариваемых механизмов часто снабжается стабилизатором входного напряжения, а в ряде случаев электронным регулятором с обратной связью, позволяющим стабилизировать скорость сварки с точностью  $\pm 1\%$  от номинальной.

**Сварочные инструменты.** Сварочная горелка используется при дуговой сварке в среде защитных газов. С помощью горелки возбуждается сварочная дуга, а также формируется и направляется струя защитного газа. В горелке закрепляется электрод и создаются условия для его охлаждения.

Конструкция сварочной горелки должна обеспечивать безопасность работы, стабильность процесса сварки, эффективную газовую защиту зоны сварки, удобство работы.

На рис. 68 представлена конструкция горелки для аргонодуговой сварки. В корпусе 4 горелки установлен зажим, в котором с помощью цанги 2 и гайки 1 крепится вольфрамовый электрод 6.

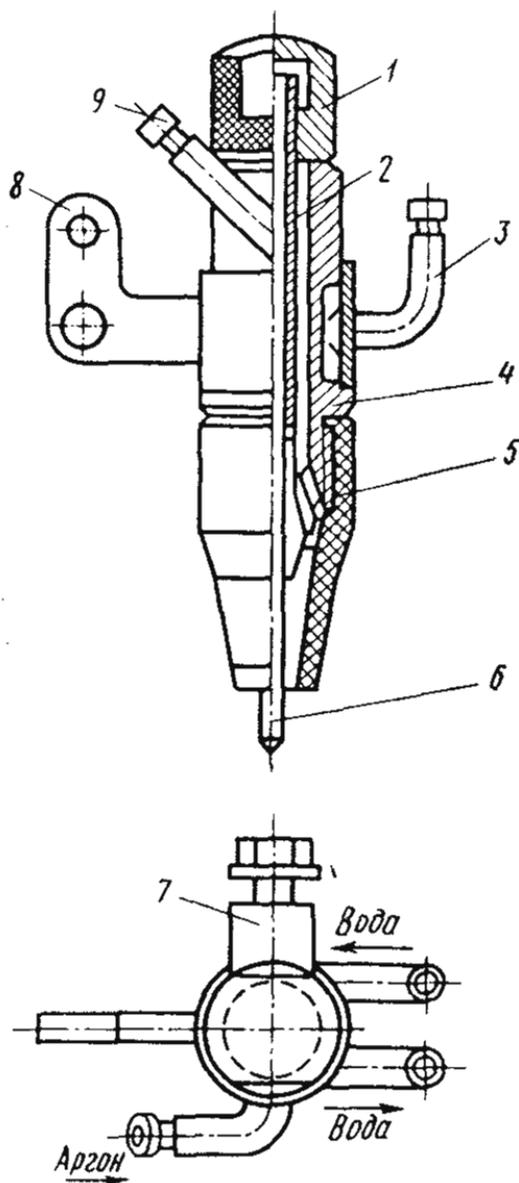


Рис. 68. Конструкция горелки для аргонодуговой сварки

В нижней части корпуса горелки крепится керамическое сопло 5, формирующее поток защитного газа. Защитный газ поступает через штуцер 9, проходит в зазоре между цангой и корпусом горелки и через боковые отверстия выходит в пространство между электродом и керамическим соплом. Здесь он формируется в ламинарный поток, обеспечивающий защиту места сварки.

В верхней части корпуса горелки крепятся штуцеры 3 для подачи и отвода воды, охлаждающей корпус горелки. Здесь же размещен токоподвод 7. Для закрепления горелки в сварочной установке используется кронштейн 8.

Плазмотрон (микроплазменная горелка) используется для создания микроплазменной дуги. Он обеспечивает многократное надежное зажигание и стабильное горение плазменной дуги в заданном диапазоне токов и напряжений. Кроме того, плазмотрон обеспечивает надежную защиту сварного шва от вредного воздействия окружающей среды.

На рис. 69 представлена конструкция микроплазменной горелки. В полиэтиленовый корпус 1 горелки заформован неразъемный металлический корпус 7, в нижнюю часть ввинчен керамический наконечник 6 и металлическое сопло 5. В верхней части корпуса 10 установлены колпачок 15 и устройства для установки и закрепления вольфрамового электрода 4. Электрод 4 с помощью цанги 3 и гайки 12 зажимается в керамической втулке 2 и может с помощью головки 14, винта 13 и пружины 9 с опорным кольцом 11 устанавливаться с необходимым зазором от сопла 5. В верхней части горелки имеется кнопка 16, при нажатии на которую система с зажатым электродом 4 перемещается вниз (сжимая пружину 9) и происходит закорачивание электрода и сопла. Таким образом, возбуждается вспомогательная дуга. Верхняя и нижняя части корпуса разделены керамической изоляционной втулкой 8.

Внутренняя металлическая часть горелки и сопла 5 охлаждается водой, которая подводится по боковым медным трубкам, заформованным в корпусе горелки. По двум остальным трубкам подводятся плазмообразующий газ (аргон) и защитный газ (гелий или аргоногелиевая смесь). Плазмообразующий газ течет вниз вдоль электрода 4 и выходит из сопла 5. Защитный газ вытекает между охлаждаемым 5 и керамическим соплом 6.

Для обеспечения маневренности плазмотрона, присоединяемые к нему шланги и электрические провода делают гибкими и прочными. При этом элементы водных и газовых коммуникаций плазмотрона (шланги, уплотнения, прокладки и др.) должны выдерживать давление не менее  $1,01 \times 10^4$  Па.

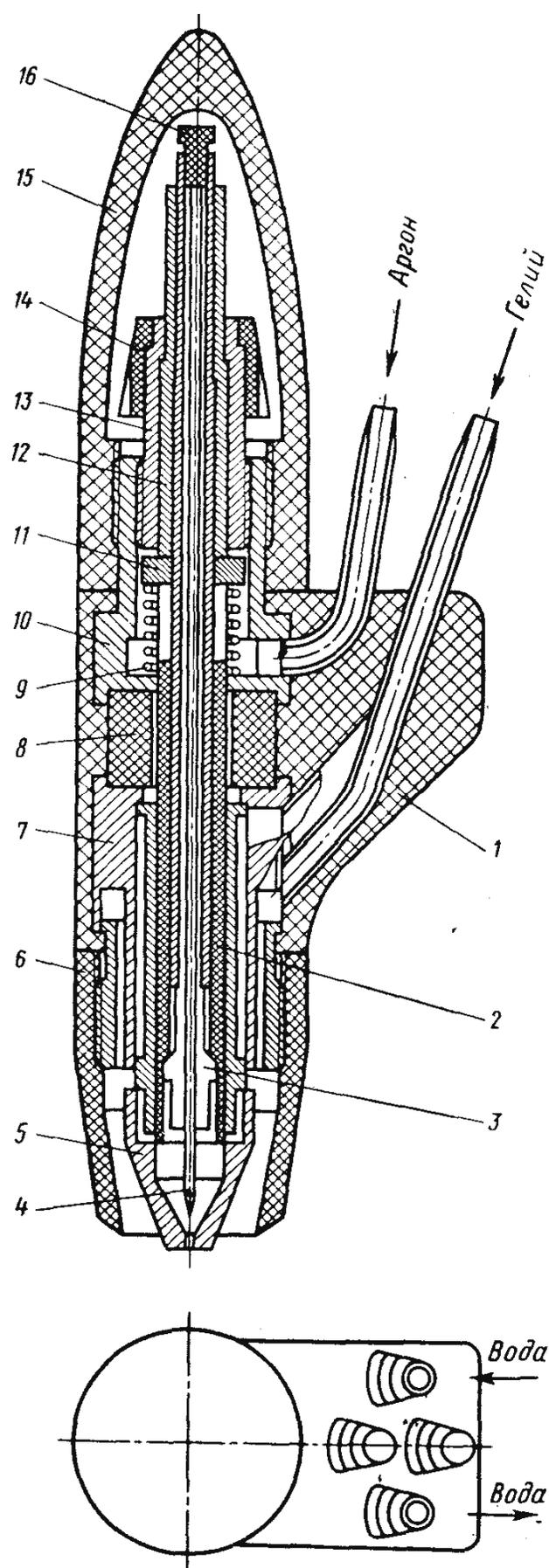


Рис. 69. Конструкция микроплазменной горелки

**Лазерная головка** вырабатывает мощный световой импульс в виде параллельного пучка лучей, который поступает в оптическую систему, фокусирующую излучение на поверхности свариваемых деталей в пятно требуемого размера.

На рис. 70 представлена схема оптической системы лазерной головки. Резонатор лазера образован двумя сферическими зеркалами 1.

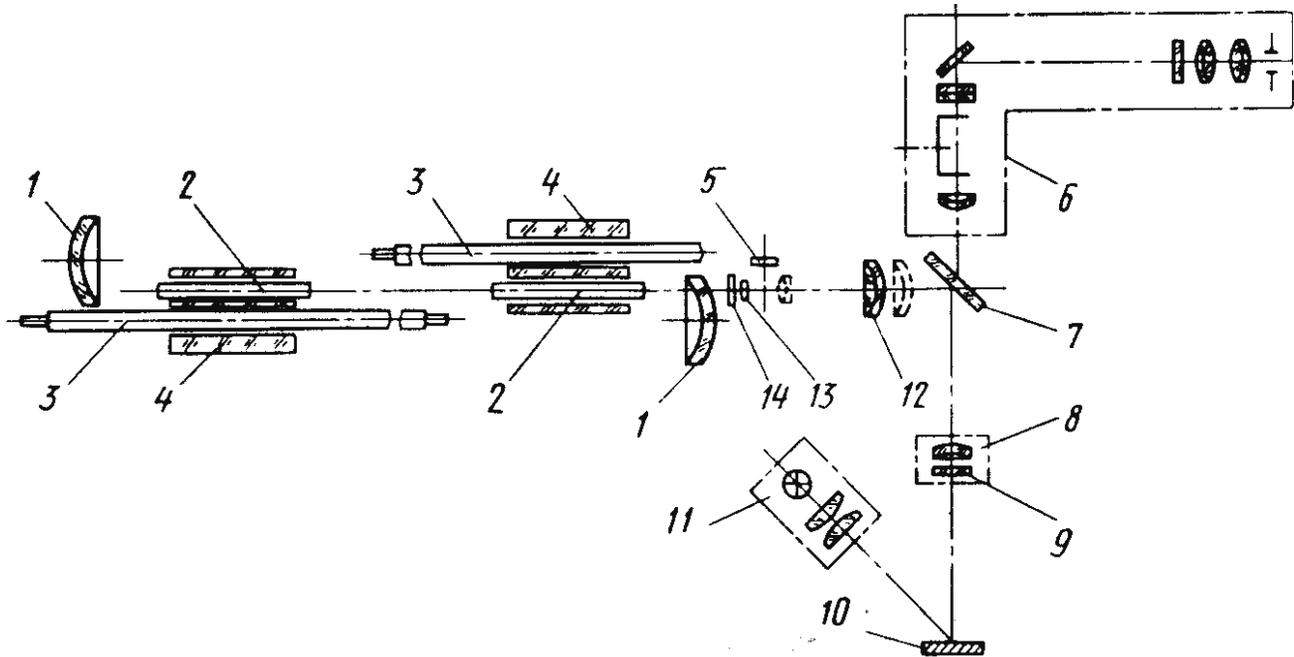


Рис. 70. Оптическая схема лазерной головки

Между зеркалами резонатора расположены два соосно установленных осветителя, состоящих из активного элемента 2, импульсной лампы накачки 3 и осветительной камеры 4 в виде стеклянного цилиндрического блока. Излучение проходит через линзы (14, 13, 5, 12) телескопической системы, позволяющие изменить расходимость луча. Зеркалом 7 излучение направляется на объектив 8, который фокусирует его на поверхность обрабатываемых деталей 10. Защитное стекло 9 предохраняет объектив от загрязнения продуктами взаимодействия излучения с материалом свариваемых деталей. Наводка излучения и визуальный контроль места сварки осуществляется встроенной

оптической системой 6. Для освещения свариваемых деталей служит осветитель 11.

На рис. 71 представлена конструкция лазерной головки. Лазерная головка имеет основание 8, на котором установлены осветители 2, стойки 1 с зеркалами резонатора, оптическая головка 4 с устройством для наблюдения за процессом сварки. Стойки снабжены винтами для юстировки и прижимными устройствами для крепления зеркал.

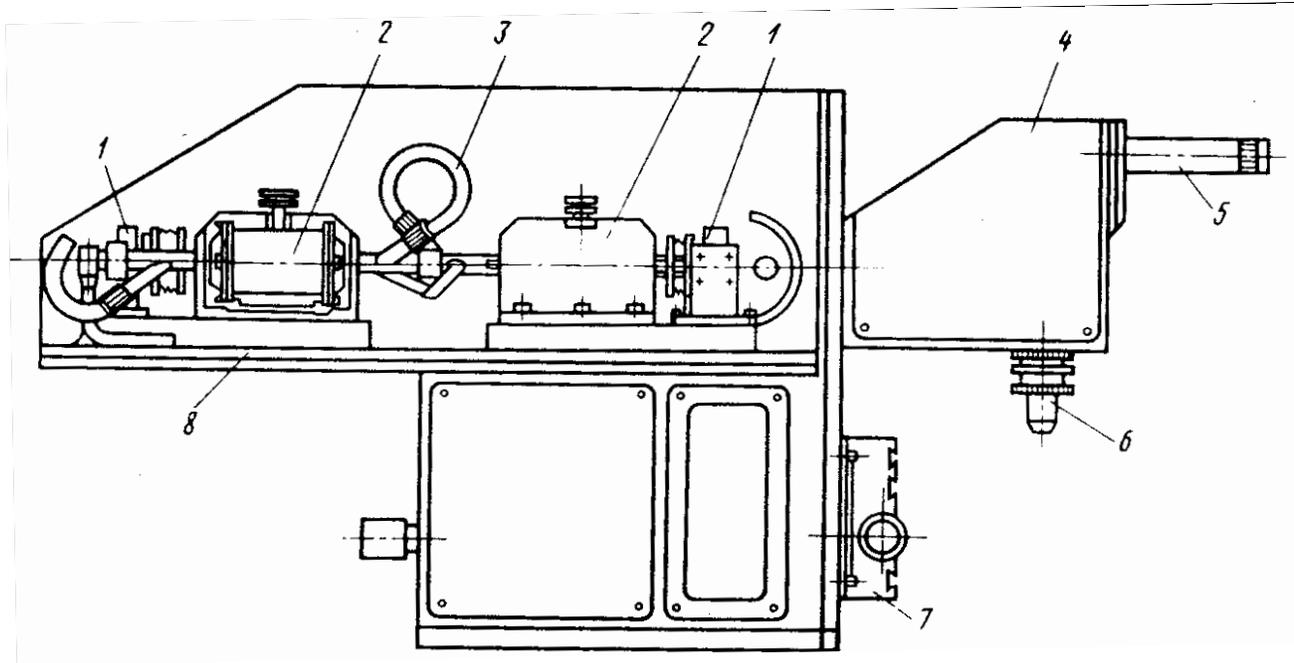


Рис. 71. Конструкция лазерной головки

Осветитель 2 представляет собой герметичный корпус, закрытый крышками, в котором закреплены активный элемент, импульсная лампа и отражатель. Охлаждение осветителя осуществляется дистиллированной водой, поступающей от устройства охлаждения в трубки 3.

Фокусирующий объектив 6 крепится в нижней плоскости оптической головки 4. Узел визуального наблюдения 5 расположен в верхней части корпуса лазерной головки. В визуальном канале предусмотрено устройство, предохраняющее оператора от светового излучения с поверхности обрабатываемой детали.

В нижней части корпуса лазерной головки расположены направляющие 7 для крепления механизма перемещения свариваемых деталей.

**Сварочная электронная пушка** – сложный электронный прибор, обеспечивающий формирование и фокусирование электронного луча до минимальных размеров при значительной мощности. Важно, чтобы пучок при этом сохранял высокую удельную мощность на большом расстоянии от пушки. Это необходимо для облегчения наведения луча на свариваемые кромки и управления им в процессе сварки.

На рис. 72 показана конструкция электронной пушки. Основные ее элементы (катод 1, управляющий электрод 2, анод 3 и фокусирующая магнитная линза 5) собираются в единый корпус, который размещается в вакуумной камере.

Катод служит для получения свободных электронов в вакууме. Конструктивно катоды сварочных электронных пушек выполняются прямонакальными и с косвенным подогревом. Прямонакальные катоды выполняются из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, тантала или их сплавов).

В катодах с косвенным подогревом используются таблетки из гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ). Катоды электронных пушек работают при высоких температурах (1700–2400 °С), что снижает их срок службы. На работоспособность катодов влияют также пары металлов, которые попадают на катод из сварочной ванны. Для ускорения и предварительного фокусирования электронов, эмиттированных катодом, используется управляющий электрод 2 и ускоряющий электрод – анод 3. Управляющий электрод называют также фокусирующим или прикатодным электродом. Анод обычно представляет собой диафрагму с отверстием.

Катодный узел пушки, включающий катод и прикатодный электрод, крепится на высоковольтном изоляторе 4, к которому через высоковольтный кабель подается электрическое питание. Ток электронного пучка регулируется подачей отрицательного управляющего напряжения на прикатодный электрод,

изменением ускоряющего напряжения или изменением тока накала катода.

Фокусировка пучка электронов осуществляется магнитной линзой 5.

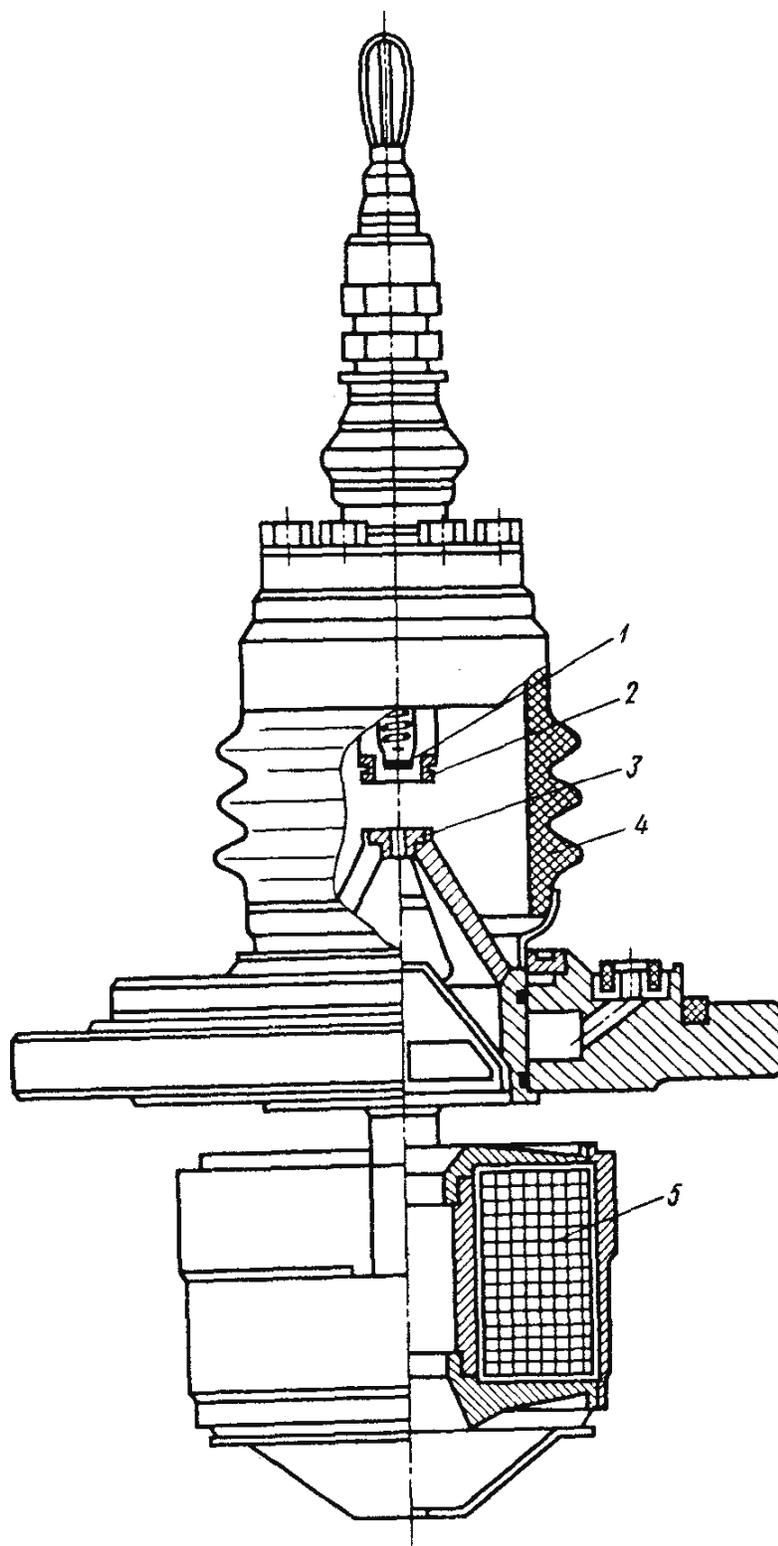


Рис. 72. Конструкция сварочной электронной пушки: 1 – катод, 2 – управляющий электрод, 3 – анод, 4 – изолятор, 5 – фокусирующая магнитная линза

Для уменьшения диаметра пучка линзу располагают далеко от анода и близко к изделию. Магнитная фокусирующая система обычно размещается в герметизированном стакане и закрепляется в нижней части корпуса пушки.

Корректировку положения пучка относительно кромок свариваемого материала выполняют магнитные отклоняющие системы (показанная на рис. 72 пушка не имеет такой системы).

При отсутствии отклоняющей системы электронный луч наводится на свариваемые кромки путем механического перемещения пушки.

**Системы наблюдения.** Сварка плавлением узлов электронных приборов характеризуется высокой точностью совмещения сварочного инструмента и стыка свариваемых кромок, малыми зазорами между кромками, небольшими толщинами кромок свариваемых деталей. Кроме того, оператор, как правило, находится на некотором расстоянии от места сварки и отделен от него стенками вакуумной камеры. Поэтому вопросы наблюдения за процессом сварки, совмещения инструмента со свариваемым стыком и корректировки взаимного положения сварочного инструмента и стыка свариваемых кромок во время сварки имеют первостепенное значение. Даже тогда, когда работа установки автоматизирована, наблюдение необходимо для первоначальной настройки и периодического контроля.

В настоящее время в промышленных установках получили распространение системы наблюдения трех основных типов: смотровые окна, оптические и телевизионные системы. Такие системы могут быть использованы как раздельно, так и в различных комбинациях.

Смотровые окна являются неременным элементом любой сварочной установки, обеспечивающей сварку в камере. Их форма, размеры, конструкция, а также расположение на сварочной камере в каждом конкретном случае выбираются из условия удобного наблюдения. При этом к смотровым окнам предъявляются требования: зона обзора должна быть максимальной, окна должны быть прочны и герметичны, оператор должен быть защищен от

излучения сварочного источника нагрева, в процессе выполнения сварки должна сохраняться прозрачность стекол.

На рис. 73 показано смотровое окно установки для электронно-лучевой сварки.

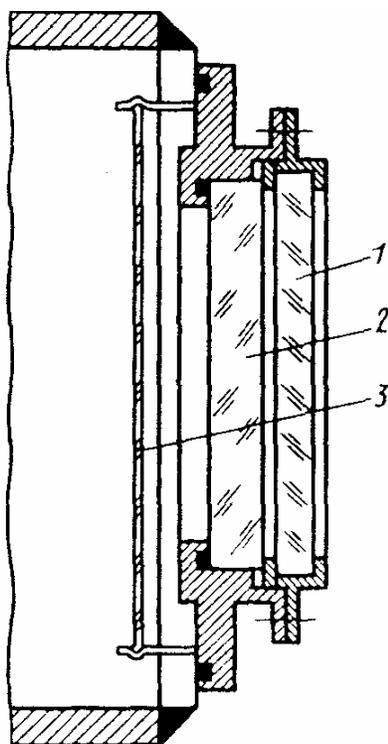


Рис. 73. Смотровое окно

Внутреннее иллюминаторное стекло 2 воспринимает всю нагрузку, создаваемую атмосферным давлением. С внешней стороны расположено рентгеновское (свинцовое) стекло 1, обеспечивающее защиту оператора-сварщика от рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии электронного луча со свариваемым материалом. Для защиты от запыления смотрового окна при сварке в вакууме предусмотрено быстросъемное стекло 3. На установках для дуговой или лазерной сварки вместо свинцового стекла ставится соответствующее защитное стекло.

При сварке мелких деталей визуального наблюдения через смотровые окна установки становится недостаточно. В этих случаях используются оптические

устройства, увеличивающие объект наблюдения в 5–50 раз. Они могут быть независимыми и встроенными в конструкцию смотрового окна или сварочного инструмента.

Независимые оптические устройства устанавливают вне камеры у смотровых окон. Простейшими конструкциями являются моно- и биноккулярные стандартные устройства общего применения (бинокли, микроскопы), которые крепятся на кронштейнах у смотровых окон установок.

Наиболее перспективным является способ наблюдения за процессом сварки с помощью телевизионных систем. Эти системы обеспечивают качественную передачу изображения на большие расстояния и дают возможность производить наблюдения в труднодоступных местах. Однако использование таких систем для телевизионного наблюдения за процессом сварки связано с рядом трудностей. Применение их осложняется большой контрастностью освещения сварочной ванны и основного металла, высокой интенсивностью света в видимой области спектра, нагревом передающей камеры от сварочного инструмента, внешними электромагнитными наводками и запылением оптики.

Схема телевизионной системы для наблюдения за процессом электронно-лучевой сварки приведена на рис. 74. Для получения высокого качества изображения место сварки подсвечивается лампой 1 с встроенным зеркальным параболическим отражателем. Изображение места сварки проектируется посредством зеркала 4 на объектив передающей телевизионной камеры 5.

Такая система позволяет дистанционно корректировать электронный луч по стыку свариваемых кромок и визуально контролировать качество соединений.

Источники питания сварочных инструментов. Основное назначение схем питания установок для сварки – преобразование сетевого напряжения достаточной мощности для питания всех устройств (и прежде всего сварочного инструмента).

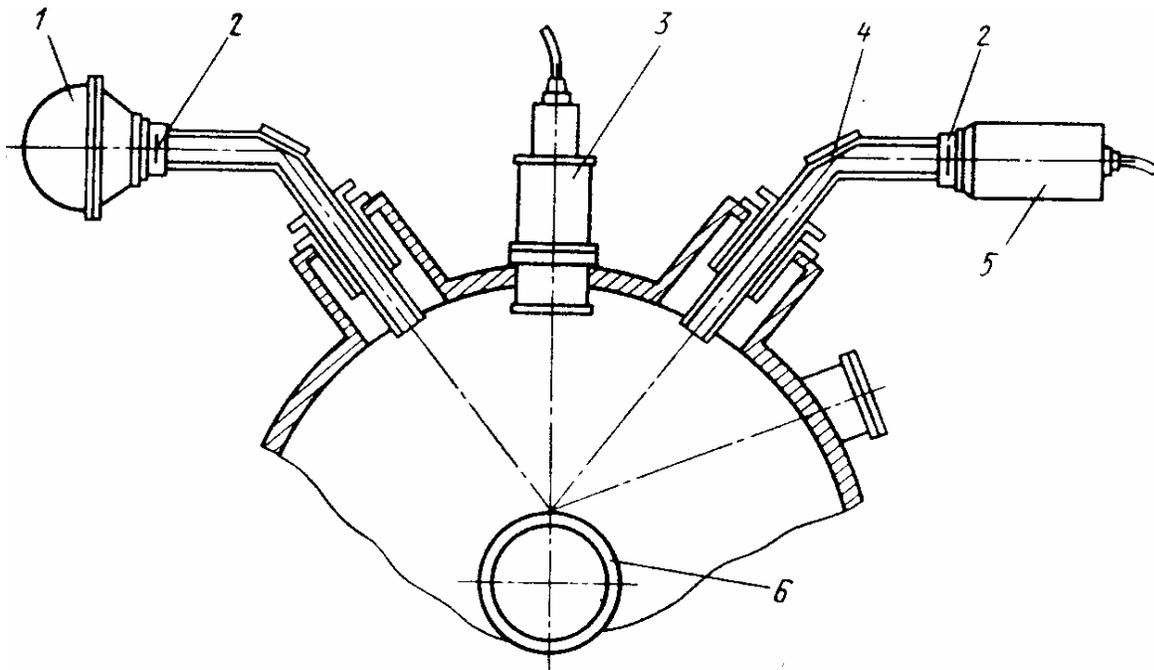


Рис. 74. Схема устройства для наблюдения за процессом электронно-лучевой сварки:  
 1 – лампа подсветки с параболическим отражателем, 2 – защитное стекло,  
 3 – электронно-лучевая пушка, 4 – воспринимающее зеркало, 5 – передающая телекамера,  
 6 – свариваемое изделие

Источники питания сварочного инструмента должны обеспечить стабильность параметров проплавления. Это достигается стабилизацией удельной мощности в пятне нагрева при общей постоянной мощности источника нагрева.

Источники питания сварочной дуги. Функциями источника питания являются снижение напряжения питающей сети до необходимых значений и обеспечение стабильного горения дуги, независимости тепловложения в свариваемые детали от внешних возмущений на дугу, возможности широкого регулирования силы тока.

В электронной промышленности для питания сварочной дуги используют, как правило, выпрямители, обладающие высоким КПД, отсутствием вращающихся частей, бесшумностью работы, высокой надежностью по сравнению с генераторами.

Источники питания – выпрямители – состоят из силового трансформатора, выпрямительного блока и системы управления.

Источники питания микроплазменной дуги выполняются так же, как и выпрямители для дуговой сварки. Однако внешние характеристики таких источников питания отличаются. Источник предполагает наличие вертикальной вольтамперной характеристики, т. е. обладает свойствами стабилизации сварочного тока, обеспечивая его постоянство независимо от изменения длины дуги.

Источники питания лазерных установок предназначены для питания лампы накачки и представляют собой батарею конденсаторов, заряжаемую от высоковольтного выпрямителя. Блок поджига, состоящий из конденсатора с самостоятельной зарядной цепью и импульсного трансформатора, служит для начальной ионизации разрядного промежутка лампы.

Источник питания для электронно-лучевой сварки состоит из высоковольтного выпрямителя, стабилизатора ускоряющего напряжения, блока накала катода, модулятора, источника питания электромагнитных линз.

Системы управления. Системы управления выполняют различные функции. Первая и наиболее простая функция – это обеспечение протекания процесса сварки плавлением в строгой последовательности. Системы управления включают и выключают элементы сварочной установки в нужный момент в соответствии с заданной программой.

Вторая функция системы управления – обеспечение требуемого качества сварки за счет регулирования параметров процесса, поддержания их стабильности при внешних возмущениях и управления процессом сварки с помощью математических моделей.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое сварка плавлением?
2. Каковы основные стадии образования сварного шва при сварке в отбортовку?

3. Какие основные процессы протекают при образовании соединения при сварке плавлением?
4. По каким признакам классифицируются способы сварки плавлением?
5. Какие основные процессы протекают при горении электрической сварочной дуги?
6. В чем заключаются особенности микроплазменной дуги?
7. Как формируется поток электронов при электронно-лучевой сварке?
8. Какие процессы протекают в лазерной головке при формировании лазерного луча?
9. Каковы технологические особенности процесса сварки плавлением изделий электронной техники?
10. Каковы особенности сварки плавлением материалов электронной техники?
11. Какие функции обеспечивает оборудование для сварки плавлением изделий электронной техники?
12. Каковы основные узлы и механизмы установок для сварки плавлением?

# ГЛАВА 3. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

## 3.1. Образование соединений при сварке давлением

Использование механической энергии для получения сварных соединений позволяет выделить большой класс способов сварки давлением. Приложенное давление является той силой, которая обеспечивает образование монолитного соединения из отдельных самостоятельных элементов.

Если при сварке плавлением механизм образования соединения достаточно нагляден (его можно непосредственно наблюдать по расплавлению свариваемых кромок и изменению размеров сварочной ванны), то при сварке давлением образование прочного соединения (схватывание) элементов происходит в твердой фазе, т. е. зона соединения недоступна для непосредственного наблюдения. В схватывании участвует огромное число атомов (примерно  $10^{14}$  ат/см<sup>2</sup>) со стороны каждого из материалов, а на скорость образования соединения влияет большое число внешних (температура, состав среды, давление и характер его приложения) и внутренних (структура материала, его механические свойства, состояние поверхности, условия пластической деформации и др.) факторов.

В проблему объяснения механизмов схватывания материалов в твердой фазе внесли существенный вклад советские ученые: академики С. Б. Айбиндер, А. А. Бочвар, К. К. Хренов, профессора А. П. Семенов, Ю. Л. Красулин, К. А. Кочергин, М. Х. Шоршоров, Э. С. Каракозов, В. П. Алехин и многие другие.

Были выдвинут ряд гипотез о ведущем влиянии того или иного физического явления на механизм схватывания материалов в твердой фазе. Получен ряд расчетных методов, позволяющих произвести оценку влияния отдельных факторов на механизм схватывания и на этой основе с определенной степенью точности рассчитывать режимы сварки. Однако единой теории образования сварных соединений давлением не существует.

Прежде всего была обоснована энергетическая целесообразность рассматриваемого процесса. Действительно, поскольку при сварке «исчезают» в зоне стыка части поверхности соединяемых элементов, соответственно уменьшается и поверхностная энергия. Так как любая система стремится к состоянию с меньшей свободной энергией, то процесс сварки является энергетически выгодным.

С другой стороны, известно, что переход из одного устойчивого состояния в другое, более устойчивое, не может произойти самопроизвольно. Для этого необходимо активировать поверхностные атомы, т. е. затратить дополнительную энергию на их способность перехода в новое состояние. Количество энергии активации зависит от свойств материала и его энергетического состояния перед сваркой. Предварительный наклеп или подогрев частично возбуждают поверхностные атомы и поэтому требуется меньшая энергия для схватывания.

Свою гипотезу схватывания материалов профессор А. П. Семенов назвал энергетической. Он показал, что для начала процесса необходимо обеспечить контакт поверхностей, очищенных от загрязнений и окислов, т. е. таким образом провести пластическую деформацию в зоне контакта, чтобы поверхностный загрязненный слой был не только разрушен, но и вынесен (выдавлен) из зоны соединения. Одним из важнейших достижений энергетической гипотезы является введение количественного критерия процесса схватывания – относительной деформации схватывания  $\varepsilon$ , т. е. той минимальной степени деформации, при которой он начинается (рис. 75).

Исследуемые материалы (пластины 2) предварительно подвергаются деформированию усилием  $P$  в пуансонах 1, 3 (рис. 75, а), а затем полученное соединение разрушается с помощью клина 4 (рис. 75, б) с целью определения минимальной глубины вдавливания пуансона ( $h_{\min}$ ).

Относительную деформацию схватывания  $\varepsilon$  определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{h_{\min}}{\delta} \cdot 100 \quad \%,$$

где  $h_{\min}$  – минимальная глубина вдавливания пуансона, при которой началось схватывание;  $\delta$  – начальная толщина пластины в месте схватывания.

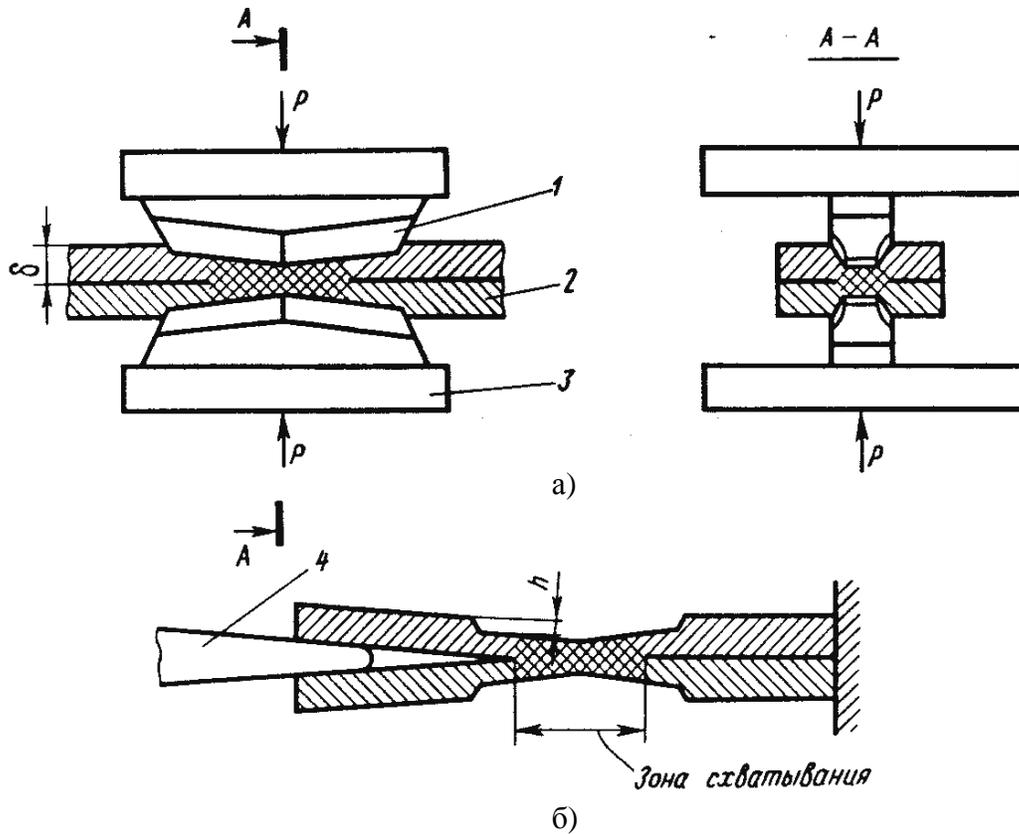


Рис. 75. Схема холодной сварки симметрично наклоненными пуансонами:  
 а – схема деформирования, б – схема разрушения для определения зоны схватывания;  
 1, 3 – наклоненные пуансоны, 2 – пластины, 4 – клин

Этот очень удобный показатель способности к схватыванию зависит как от свариваемого материала, так и от условий сварки и широко применяется многими исследователями, как единая характеристика способности материала образовывать сварные соединения в заданных условиях.

К сварке давлением относятся все способы, при которых металл может иметь в зоне соединения любую температуру, от комнатной и до температуры плавления, но соединение происходит под действием давления.

Физическая природа связей, обуславливающих образование прочного соединения при сварке плавлением и давлением, одинакова, однако пути создания условий для схватывания различны. Процесс схватывания в твердой

фазе представляют как химическую реакцию на поверхности (топохимическую реакцию), в результате которой между атомами соединяемых поверхностей устанавливаются связи, аналогичные связям в объеме кристаллической решетки. Обычно это взаимодействие (реакция) проходит несколько последовательных стадий.

Идеализированная схема соединения монокристаллов А и В одного и того же вещества, обладающих идеальной кристаллической решеткой с параметром «а», с одинаково ориентированными кристаллографическими осями, с абсолютно ровными и чистыми поверхностями I-I и II-II, когда процесс происходит в вакууме, показана на рис. 76. Поверхностные атомы твердого тела обладают некоторым избытком свободной энергии, так как они окружены меньшим числом соседей, и их связи не все задействованы равномерно. Поэтому поверхность твердого тела обладает способностью притягивать атомы и молекулы различных веществ из окружающей среды – способностью к адсорбции.

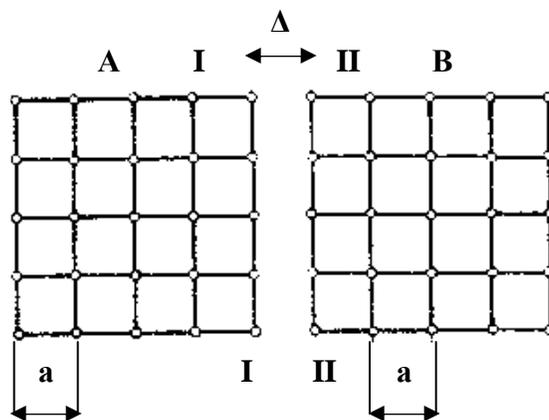


Рис. 76. Идеализированная схема схватывания монокристаллов одинакового вещества с полной когерентностью поверхности

Для того чтобы взаимодействие между монокристаллами стало принципиально возможным, необходимо их сблизить на расстояние Δ, соизмеримое с расстоянием между атомами кристаллической решетки. Для этого к соединяемым элементам прикладывается давление. Эта стадия

процесса схватывания носит название стадии образования физического контакта. Только после образования такого контакта можно говорить о следующей стадии – взаимодействия поверхностных атомов с целью создания единой кристаллической решетки в месте соединения двух монокристаллов. К моменту образования физического контакта на поверхности раздела существуют слабые силы притяжения – силы Ван-дер-Ваальса. Следующий этап взаимодействия – создание единой и непрерывной кристаллической решетки за счет возникновения химических связей (для металлов – металлических связей) между поверхностными атомами. Свободная энергия монолита будет меньше суммы свободных энергий монокристаллов на значение двух поверхностных энергий с исчезнувших в процессе соединения поверхностей I-I и II-II. Таким образом, процесс образования монолита приводит систему в более устойчивое состояние с меньшим запасом свободной энергии. Значит ли это, что процесс образования химических связей, процесс сварки после образования физического контакта будут происходить самопроизвольно? Конечно, нет. Как камень, устойчиво покоящийся на склоне (крыше здания), самопроизвольно не скатится в долину, не реализует избыточный запас потенциальной энергии без дополнительной энергии, выводящей его из этого устойчивого положения; так и поверхностные атомы монокристалла должны получить дополнительную энергию активации, чтобы перейти в новое устойчивое состояние.

Таким образом, следующая стадия образования соединения – образование химических связей – также требует введения энергии в соединяемые вещества.

Для соединения материалов сварщики пользуются практически всеми видами и разновидностями энергии, которые освоило человечество (солнечная, химическая, механическая, электрическая, электромагнитная, энергия возбужденных атомов и нейтронов и т. д.). Особенностью сварки материалов в твердом состоянии является то, что для образования физического контакта и создания условий для химического взаимодействия материалов без

расплавления к ним необходимо приложить механическую энергию – энергию, затрачиваемую на сближение кристаллических решеток. Поэтому все способы сварки материалов в твердом состоянии в сварочной классификации относятся к способам сварки с приложенным давлением или называются просто сваркой давлением. По виду энергии активации поверхности эти способы относятся к М-процессам (механическая активация).

### **3.2. Классификация способов сварки давлением по методам активации**

Основным параметром, обеспечивающим схватывание материалов, находящихся в твердом состоянии, является давление, под действием которого в зоне соединения возникает химическое взаимодействие поверхностных атомов, сопровождающееся объемной диффузией и образованием прочного сварного шва. Ряд внешних факторов или дополнительных способов активации кристаллической решетки в зоне соединения может существенно ускорить процесс схватывания, уменьшить время его протекания. К таким факторам относится нагрев соединяемых материалов в процессе сварки. Существует большой арсенал сварочных средств и приемов повышения температуры материала в зоне соединения, включая простой нагрев изделия в печах или на нагревательных столиках и выделение теплоты за счет прохождения электрического тока в зоне соединения или наведения в изделии токов Фуко индуктором от генератора высокой частоты. Весьма существенное влияние на процесс схватывания оказывают такие внешние факторы, как среда, в которой протекает процесс сварки, время и активирующее трение, т. е. взаимное перемещение соединяемых поверхностей.

Каждый из таких факторов может, повлияв на процессы соединения материалов, изменить технологию сварки, вызвать необходимость создания принципиально нового оборудования, в котором учтено сочетание и наличие

этих факторов, определить вид получаемого соединения, его эксплуатационные и экономические характеристики.

Рассмотренные соображения являются основой более детальной классификации методов сварки материалов в твердой фазе.

Процессы соединения металлов с приложением давления Р (Р-процесс). К этому виду активации в чистом виде относится холодная сварка, которая производится при комнатной температуре (температура окружающей среды) только за счет сжатия (взаимного сдавливания) соединяемых элементов (стержней, пластин).

Основным процессом здесь является повышение энергии атомов при пластическом деформировании поверхностных слоев, приводящее к существенному локальному повышению температуры. Повышение энергии атомов поверхности происходит как при разрушении отдельных зерен, так и при дроблении и скалывании окисных пленок. Одновременно ускоряются процессы диффузии, иногда развиваются рекристаллизация (образование и рост новых зерен на границах смятых, деформированных и нагретых зерен), генерация и движение в зону контакта дефектов кристаллической структуры соединяемых материалов (дислокаций и вакансий). Современными исследованиями установлено, что тонкий поверхностный слой толщиной менее 1 мкм разогревается до температуры плавления.

Для холодной сварки большое значение имеет состояние и строение поверхности, а также условия ее пластической деформации. Значение и необходимость пластической деформации в зоне контакта хорошо иллюстрируются опытом академика К. К. Хренова.

В прочную обойму (рис. 77) вкладывали два алюминиевых стержня с хорошо зачищенными поверхностями контакта и сжимали их стальными пуансонами под прессом с усилием Р. Признаков сварки не обнаруживалось даже при усилии в 10 раз большем, чем необходимо для холодной сварки алюминия, так как обойма препятствует деформации образцов в зоне контакта.

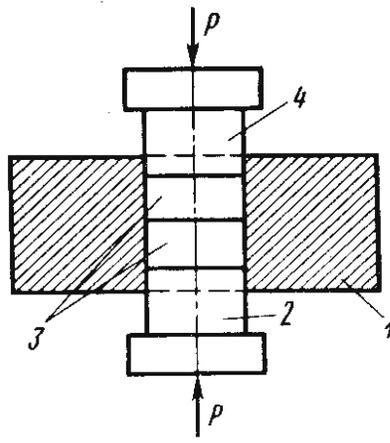


Рис. 77. Схема опыта холодной сварки: 1 – стальная обойма, 2 и 4 – стальные пуансоны, 3 – алюминиевые цилиндры

Сварное соединение образуется только тогда, когда есть условия выноса (выдавливания) из зоны контакта части поверхностного металла вместе с окисной пленкой.

Было установлено также, что прочность соединения зависит от относительной пластической деформации металла и не зависит от времени выдержки в сжатом состоянии.

Процессы соединения металлов с приложением давления  $P$  при нагреве до температуры  $T$  (РТ-процессы). Нагрев деталей активно влияет на процесс сварки и все его стадии.

Сварка давлением с нагревом производится достаточно быстро, за короткие промежутки времени (так как повышение температуры существенно уменьшает время протекания всех стадий процесса) и поэтому может быть выполнена без специальной защиты на воздухе, что делает процессы простыми, удобными, высокопроизводительными и экономичными. Этот процесс охватывает большую группу способов сварки, имеющих важное промышленное значение. Характерной особенностью всех этих способов является пластическая деформация, в ходе которой непосредственно формируется соединение. Наиболее широкое применение находят способы сварки с приложением давления при нагреве:

- прессовая сварка: газопрессовая (нагрев газовым пламенем), термопластическая (сдавливание после нагрева в печах), термокомпрессионная (нагрев деталей и сдавливание на предметных столиках);
- сварка электроконтактная: нагрев сопротивлением, нагрев с оплавлением кромок;
- сварка токами высокой частоты, сварка радиочастотная.

В электронной технике широко применяются термокомпрессионная и электроконтактная сварки.

По температуре в зоне сварки Т-процессы делятся на низкотемпературные, когда температура сварки близка к температуре рекристаллизации ( $T_{\text{нагр}} = 0,4T_{\text{пл}}$ ), высокотемпературные без расплавления; высокотемпературные с расплавлением.

Нагрев деталей может быть общим (в печах) или местным, сразу по всему свариваемому сечению (при газопрессовой сварке) или последовательным (при радиочастотной сварке). Источники нагрева соответственно делятся также на внешние (печи, газовое пламя) и внутренние (электрический ток, токи высокой частоты и т. д.).

Общим для всех РТ-процессов является их осуществление на воздухе, при этом окисные пленки, как правило, разрушаются и удаляются при пластической деформации зоны соединения на заключительной стадии процесса сварки. При более детальной оценке влияния температуры на условия сварки давлением без защиты при кратковременном нагреве необходимо отметить следующее: прочность металлов и сплавов с ростом температуры снижается, а сопротивление пластической деформации уменьшается.

Нельзя говорить, что любое повышение температуры улучшает условие схватывания при РТ-процессах. Нагрев резко ускоряет окисление поверхности металла при контакте с воздухом, способствуя образованию достаточно толстых окисных пленок. Поэтому он одновременно благоприятно и неблагоприятно влияет на условия образования соединения. Однако

высокотемпературный нагрев, сопровождаемый оплавлением металла или расплавлением окисла, может способствовать свободному и полному удалению их из зоны сварки и образованию качественного соединения.

Нагрев оказывает влияние не только на сам процесс образования соединения, но может вызвать изменение кристаллической структуры, и, следовательно, механических свойств всей зоны металла, нагреваемой в процессе сварки.

Процессы соединения металлов с приложением давления Р при нагреве до температуры Т в защитной атмосфере А (РТА-процессы). Использование защитных сред, проведение процесса сварки в искусственной атмосфере, не содержащей свободного кислорода, а тем более в газовой среде, способной к восстановлению окислов, может существенно улучшить процесс схватывания и образования качественного соединения.

При сварке давлением применяют инертные газы (аргон, гелий, азот) и активные восстановители (водород, окись углерода, метан, ацетилен). Газы в защитной атмосфере используют как в чистом виде, так и в смесях.

В настоящее время применяются следующие РТА-процессы:

- при сварке в твердой фазе (без оплавления): газопрессовая сварка с наружным нагревом, сварка с нагревом токами высокой частоты и сопротивлением;
- при сварке с оплавлением: газопрессовая сварка с нагревом разведенных торцов горелками, контактная сварка оплавлением.

В электронной промышленности все эти методы не нашли широкого применения.

Процессы соединения металлов с приложением давления Р при нагреве до температуры Т в защитной атмосфере А в течение времени t (РТАt-процессы). В результате продолжительного нагрева в вакууме ( $1,33 \cdot 10^{-1}$ – $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па) или в восстановительной атмосфере сварные соединения получают при относительно небольших давлениях и при невысоких температурах нагрева за

счет развития процессов схватывания во времени. При этом сравнительно мало изменяются свойства соединяемых, часто разнородных материалов, что делает РТAt-процессы особенно эффективными и целесообразными.

Как и во всех других процессах сварки давлением, в РТAt-процессах важнейшим является удаление поверхностных окислов из зоны соединения. Так как процесс проводят при небольших удельных давлениях, то нельзя говорить о выдавливании окислов из зоны контакта за счет пластической деформации.

При сварке различных металлов в условиях глубокого вакуума возможны четыре механизма удаления окислов: сублимация окисла; удаление окисла за счет его диссоциации; его восстановление за счет диффузии кислорода в металл (возможно при высокой температуре); восстановление элементами-раскислителями, находящимися в сплаве и диффундирующими при нагреве к границе «металл–окисел».

РТAt-процессу относится диффузионная сварка в вакууме.

Процессы соединения металлов с приложением давления  $P$  при нагреве до температуры  $T$  при взаимном перемещении  $f$  кромок (РТf-процессы). Взаимное перемещение свариваемых кромок используется при сварке трением и ультразвуковой сварке. При этом энергия, которая выделяется при трении, превращается в теплоту и обеспечивает нагрев зоны сварки; с другой стороны, при трении разрушаются поверхностные окисные пленки и обнажаются поверхности металла, находящиеся в активном состоянии и способные легко устанавливать химические связи. Наконец, совместное действие нормальных и касательных напряжений в зоне сварки облегчает пластическую деформацию, что также способствует сварке. При этом роль трения при ультразвуковой сварке и сварке трением несколько различна.

При сварке трением в простейшем случае круглые детали (стержни, трубы) вращаются относительно друг друга и сжимаются осевой силой.

При ультразвуковой сварке упругие колебания с частотой 44, 66 или 88 кГц и с определенной амплитудой инструмента передаются на свариваемые детали, размещенные на опорной площадке установки, а амплитуда в каждом контактном звене (электрод–верхняя деталь–нижняя деталь–опора) постепенно уменьшается. Ультразвуковая сварка начинается со сглаживания поверхностных неровностей и разрушения поверхностных пленок. При этом идет одновременное окисление активированных поверхностей так, что толщина внедренных в области соединения окислов оказывается больше толщины окисной пленки, которая была на поверхности перед сваркой. Ультразвуковые колебания интенсифицируют тепловыделение в трех областях: в контакте «инструмент–деталь» в контакте «деталь–деталь» и по наружному периметру зоны контакта. Характер общего нагрева зависит от многих параметров: амплитуды колебания инструмента, усилия сжатия, материала, состояния поверхности и формы инструмента, материала и состояния поверхности свариваемых деталей и т. д.

### **3.3. Технологические схемы процессов сварки давлением**

#### Способ сварки с приложением давления Р (Р-процесс). Холодная сварка.

Активация соединения при холодной сварке осуществляется только приложенным давлением.

Холодной сваркой соединяются металлы, имеющие высокую пластичность при комнатной температуре (Al, Au, Ag, Си, Ni, Pb, Sn и др.). Сварочным инструментом производится сдавливание элементов по различным схемам соединения (рис. 78). Прочность соединения зависит от относительной глубины вдавливания инструмента и качества подготовки поверхности. Минимальная глубина вдавливания инструмента определяется свойством материала.

Для получения качественного соединения перед сваркой материал необходимо тщательно зачищать от окисных пленок и обезжировать.

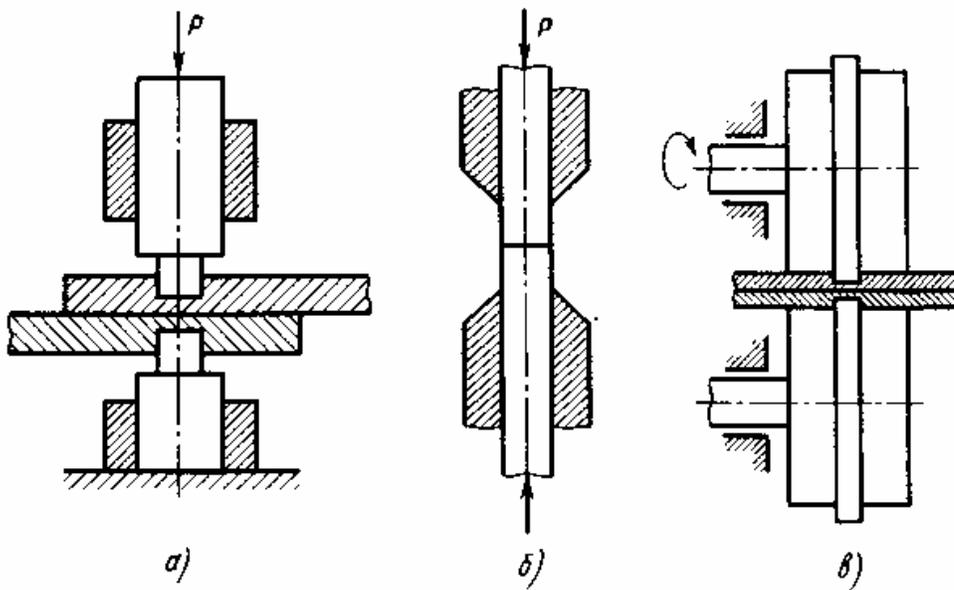


Рис. 78. Схема холодной сварки: а – сварка внахлестку, б – сварка встык, в – шовная сварка

Минимальная относительная деформация (относительная глубина вдавливания пуансона), необходимая для сварки различных металлов, имеет следующие значения:

Металл .....	Au	Sn	Ag	Al	Cu	Ni
$\delta_{\min}, \%$ .....	20	40	50	60	80	90

В электронной технике холодная сварка применяется для герметизации по контуру полупроводниковых приборов, для стыкового соединения электродов радиолампы, для пережима металлических штенгелей электровакуумных приборов после их откачки.

Способы сварки с приложением давления  $P$  в процессе нагрева до температуры  $T$  (РТ-процессы). Термокомпрессионная сварка. Принцип образования соединения близок к принципу холодной сварки. Детали прижимают друг к другу специальным инструментом, обеспечивающим необходимую пластическую деформацию в зоне соединения. Благодаря постоянному подводу теплоты детали находятся в нагретом состоянии, что обеспечивает получение качественного соединения при значительно меньшей деформации элементов, чем при холодной сварке (рис. 79). Нагрев деталей осуществляется контактным способом по одному из трех возможных

вариантов: нагрев столика до 450 °С, нагрев инструмента до 300 °С или одновременный нагрев столика и инструмента (рис. 80). В качестве свариваемых материалов могут быть использованы золото, серебро, алюминий.

Широкая область применения термокомпрессионной сварки в электронике - это разварка выводов от контактных площадок кристаллов на траверсы внешних выводов корпуса. В качестве выводов обычно используется золотая проволока диаметром 10–50 мкм, а контактные площадки из золота или алюминия толщиной до 1 мкм наносятся на поверхность кристаллов.

Время, необходимое для образования соединения, составляет 0,7–1,0 с. Для изготовления инструмента используют капилляры из стекла, а также стержни карбидов вольфрама и быстрорежущей стали.

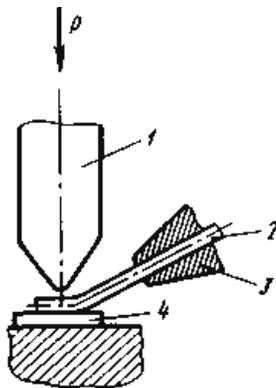


Рис. 79. Принцип термокомпрессионной сварки: 1 – клин, 2 – электродная проволока, 3 – капилляр, 4 – контактная площадка на кристалле

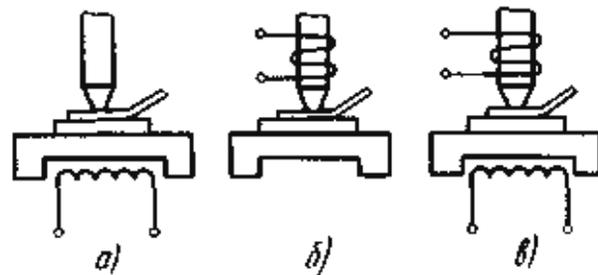


Рис. 80. Варианты нагрева деталей контактным способом: а – нагрев столика, б – нагрев инструмента, в – одновременный нагрев столика и инструмента

Электроконтактная сварка. Это один из самых распространенных методов сварки металлов давлением, который имеет очень много вариантов. Процесс образования соединения металлических частей при электроконтактной сварке происходит в результате их местного нагрева протекающим электрическим током с одновременным сжатием деталей в месте контакта.

Количество теплоты, которое выделяется в проводнике при прохождении электрического тока, определяется законом Джоуля-Ленца.

Особую роль в нагреве места сварки играет контактное сопротивление. Так как в месте контакта детали соприкасаются только отдельными

микровыступами, сопротивление здесь значительно выше, а значит происходит большее тепловыделение и контакт нагревается до более высоких температур. Главенствующая роль тепловыделения в контакте от прохождения электрического тока и определила название процесса «электроконтактная сварка» или просто «контактная сварка». Этот способ сварки изобрел русский инженер Н. Н. Бенардос, который в 1885 году получил патент на способ точечной электросварки клещами с угольными электродами.

Позднее этот способ был усовершенствован (угольные электроды были заменены медными) и появились новые способы контактной сварки: роликовая, стыковая, рельефная и т. д.

Схемы основных современных способов контактной сварки приведены на рис. 81.

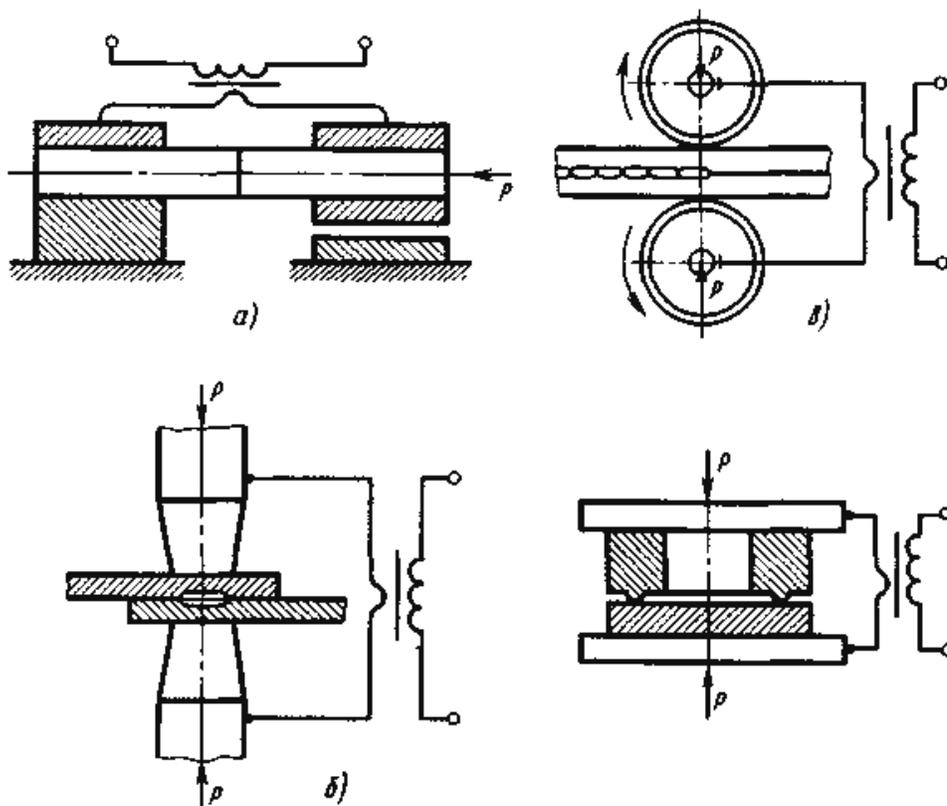


Рис. 81. Основные способы контактной сварки: а – стыковая, б – точечная, в – роликовая, г – рельефная

Они отличаются сопряжением деталей в месте соединения, особенностями токоподвода и приложения сварочного давления.

Стыковая сварка (рис. 81, а). Соединяемые детали пристыковываются друг к другу, и соединение образуется по всей плоскости касания (стыка). Различают стыковую сварку сопротивлением (при пропускании тока через постоянно сжатый контакт с последующей осадкой деталей) и стыковую сварку оплавлением (при медленном сближении подключенных к источнику тока деталей с последовательным образованием отдельных микроконтактов, взрывным их оплавлением и последующим сжатием оплавленных торцов).

Точечная сварка (рис. 81, б). Соединяются детали внахлестку на ограниченном участке под сжимающими электродами, к которым подводится электрический ток. Образуется соединение в виде сплюсненной капли расплавленного металла в стыке «деталь–деталь» од электродами, которая и кристаллизуется при отключении тока под сжимающим давлением  $P$ . От усадки кристаллизации электроды слегка деформируют поверхность (вдавливаются в нее), оставляя отпечаток в виде точки. Так что и по характеру соединения, и по внешнему виду это действительно «точечная сварка».

Шовная (роликовая) сварка (рис. 81, в). Соединение внахлестку между листами образуется в виде непрерывного ряда точек от электродов-роликов, между которыми под давлением прокатываются соединяемые детали. Соединение получается в виде сплошного герметичного шва, отсюда и название «шовная сварка» (по виду электродов эта сварка называется «роликовой»).

Рельефная сварка (рис. 81, г). Это соединение двух деталей по большой площади, когда сварка происходит в местах их касания, образованных предварительно сделанными выступами (рельефами) на одной из соединяемых деталей. Получается как бы одновременная многоточечная сварка.

Электроконтактная сварка широко применяется в электронной технике при изготовлении полупроводниковых и электровакуумных приборов, интегральных микросхем и радиокомпонентов. Контактной сваркой соединяют разнообразные металлы и сплавы: тугоплавкие (вольфрам, молибден, тантал,

ванадий), жаропрочные (титан, ниобий, никель, ковар), с высокой теплопроводностью (медь, золото, серебро, алюминий), конструкционные (железо и его сплавы), а также материалы плакированные, композиционные, многослойные, металлокерамические и т. д. Контактной сваркой соединяют проволочные элементы (электроды, выводы), трубы, полосы, листы; герметизируют корпуса приборов и интегральных микросхем, осуществляют монтаж приборов на платы и т. п.

Дугопрессовая сварка. Для присоединения деталей типа шпилек и болтов к пластине или плате используется дугопрессовая сварка (рис. 82). При отводе шпильки от пластины между ними возбуждается дуговой разряд, в результате которого торец шпильки и материал пластины под ней нагреваются до расплавления, после чего ударом шпильки о пластину при отключенном токе происходит соединение. Поверхностные загрязнения и окислы при этом выдавливаются из зоны контакта вместе с жидким металлом и образуется соединение высокого качества. Для повышения качества соединения дугопрессовая сварка может производиться в защитной среде, например в среде азота, и тогда этот метод следует относить к (ТМ)-процессу. Одновременно следует обратить внимание, что традиционный источник нагрева для сварки плавлением – электрическая сварочная дуга – используется и как источник нагрева для сварки давлением.

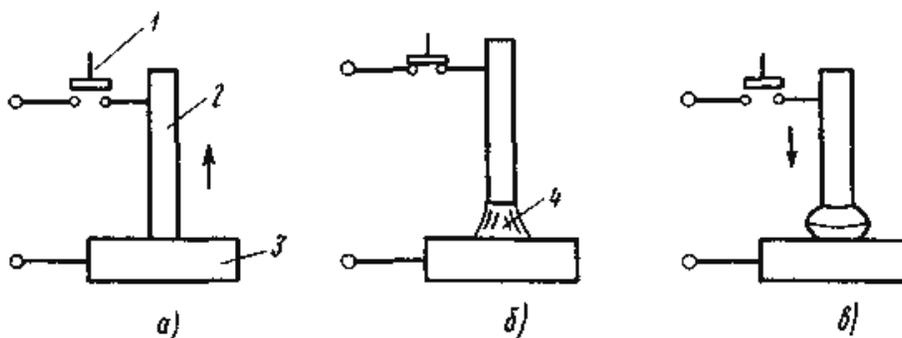


Рис. 82. Принципиальная схема дугопрессовой сварки:

а – исходное положение, б – разогрев свариваемых кромок, в – соединение деталей;  
 1 – выключатель тока, 2 – шпилька, 3 – пластина, 4 – дуговой разряд; стрелкой показано движение шпильки

Ударно-конденсаторная сварка. Эта сварка по характеру протекания процессов близка к дугопрессовой сварке. В момент перемещения под действием пружинного механизма одной из деталей (типа шпильки) по направлению к другой на них подается мощный разряд конденсаторной батареи. В промежутке длиной 1–3 мм между деталями образуется искровой пробой, переходящий в дуговой разряд, который успевает частично подплавить торец шпильки и место ее посадки на второй детали. К моменту удара шпильки о вторую деталь энергия, запасенная в конденсаторе, расходуется полностью, а при ударном сжатии соединяемых деталей жидкая поверхностная прослойка между ними вытесняется из зоны контакта, что способствует образованию качественного сварного соединения.

Способы сварки с приложением давления  $P$  в процессе нагрева до температуры  $T$  в защитной атмосфере (РТА-процессы). Одновременно с положительным воздействием нагрева и давления защитная атмосфера в зоне сварки интенсифицирует образование качественного соединения.

Газопрессовая сварка. Здесь используется традиционный источник нагрева, характерный для сварки плавлением – газовое пламя. Применяя различные типы многопламенных горелок, детали прогревают или с поверхности стыка, или с торца до температур пластичного состояния нагреваемых элементов, а затем, прикладывая давление, обеспечивают образование соединения (рис. 83). Регулируя расход газов в горелке, можно получать как окислительную, так и восстановительную атмосферу в газовом факеле и этим оказывать определенное положительное воздействие на процесс образования соединения. Газопрессовая сварка достаточно широко применяется при работе со стеклянными колбами электровакуумных приборов и при отпайке штенгелей этих приборов в месте вакуумирования, а также при нагреве кромок стекла с металлом (ковар, платинит) во время их сварки друг с другом.

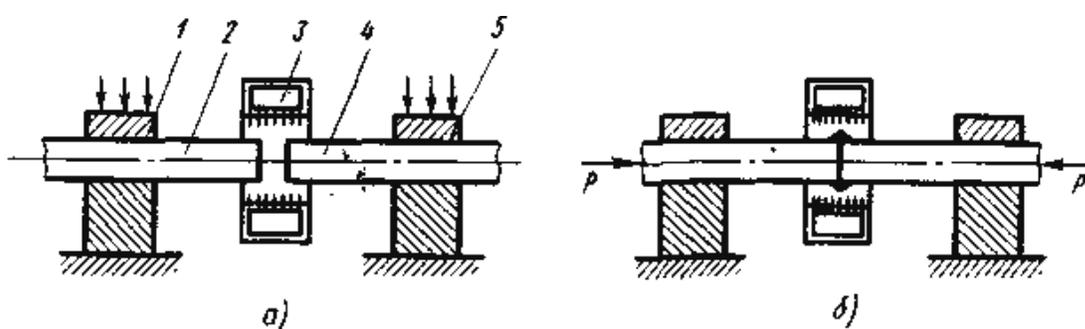


Рис. 83. Принцип газопрессовой сварки: а – перед сваркой, б – после сварки; 1, 5 – зажимы, 2, 4 – свариваемые детали, 3 – кольцевая горелка

Способы сварки с приложением давления  $P$  в процессе нагрева до температуры  $T$  в защитной атмосфере  $A$  в течение времени  $t$  (РТАт-процессы).

На процесс схватывания и развития прочного соединения влияют не только чисто энергетические факторы, какими являются температура и давление, но и время взаимодействия соединяемых материалов. Увеличивая время сварки, можно одновременно существенно снизить температуру и давление. Это особенно важно при соединении материалов с низкой пластичностью. Одновременно длительный процесс требует применения специальных защитных атмосфер для торможения окисления в зоне контакта.

Диффузионная сварка. Процесс осуществляют в специальных камерах в вакууме примерно  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. Иногда камеры заполняют инертным газом или газом, обладающим восстановительными свойствами. Нагрев деталей производят в собранном состоянии до температур, равных  $0,5-0,7$  температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых металлов при относительно небольшом давлении (рис. 84). Защитная среда способствует удалению поверхностных окислов или за счет их разложения (диссоциации) в вакууме или за счет восстановления, а также за счет частичного растворения в основном металле. В зависимости от вида соединяемых материалов прочное соединение образуется за 5 минут и более. Основные параметры диффузионной сварки (давление, температура нагрева, степень разрежения и время) программируются, и процесс автоматизируется. Соединения в самых различных сочетаниях материалов (разнородные металлы, металлы с

керамиками и стеклами, тугоплавкие металлы) получают высокого качества из-за низкого давления и малого нагрева деталей при сварке.

Широкое применение диффузионная сварка находит в электронной технике при создании металлокерамических узлов, катодных узлов, вакуумно-плотных соединений из разнородных металлов.

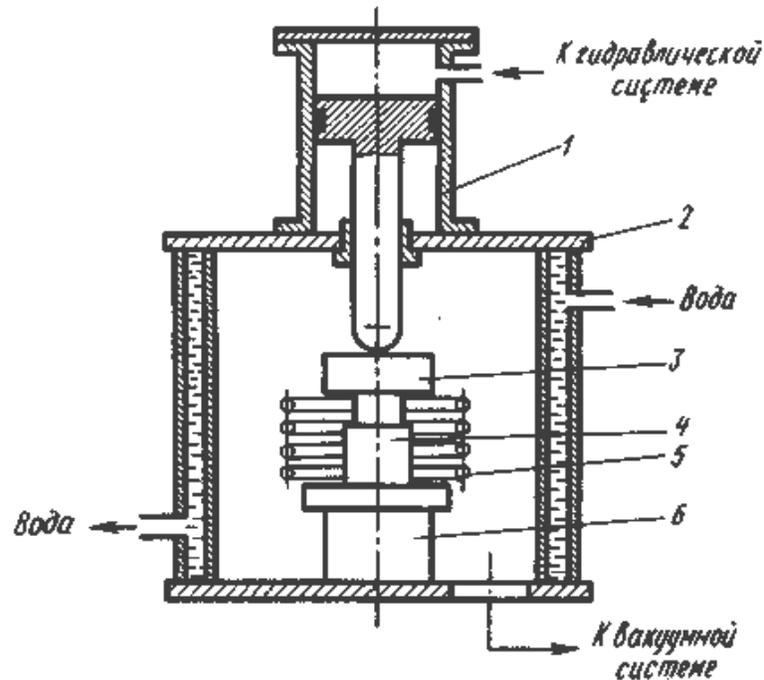


Рис. 84. Принципиальная схема диффузионной сварки: 1 – механизм создания давления, 2 – рабочая камера, 3, 6 – оправки, 4 – свариваемые детали, 5 – нагреватель

Способы сварки с приложением давления  $P$  в процессе нагрева до температуры  $T$  при взаимном перемещении  $f$  кромок (PTf-процессы).

Использование эффекта трения при сварке благоприятно потому, что свариваемые поверхности не только разогреваются, но и разрушаются поверхностные окислы. Это особенно необходимо при сварке металлов, имеющих прочную, трудноудаляемую пленку окисла.

Ультразвуковая сварка. Механические колебания с частотой свыше 18 кГц называются ультразвуковыми и могут быть созданы в преобразователях, изготовленных из так называемых магнитострикционных материалов, которые обладают способностью изменять свои размеры при воздействии на них магнитного поля. Переменный электрический ток создает в

магнитострикционном материале преобразователя переменное магнитное поле. При этом периодически изменяются размеры преобразователя (при каждом полупериоде тока, т. е. упругие колебания генерируются с двойной частотой относительно частоты переменного тока). Возбужденные в преобразователе колебания по волноводу передаются на инструмент и далее к свариваемым деталям (рис. 85). В зависимости от конструкции волновода и крепления инструмента в зоне сварки можно получить продольные, поперечные и крутильные колебания. Их амплитуда бывает обычно 10–30 мкм.

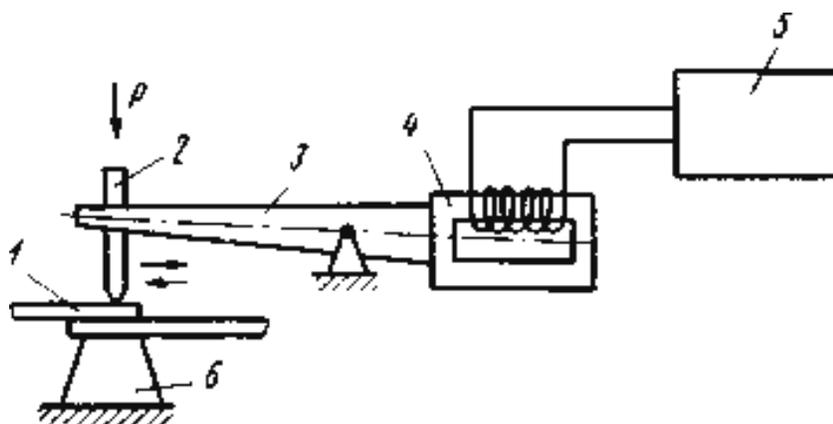


Рис. 85. Принцип ультразвуковой сварки: 1 – свариваемые детали, 2 – инструмент, 3 – волновод, 4 – преобразователь, 5 – генератор ультразвуковых колебаний, 6 – опора

В электронной технике ультразвуковая сварка широко применяется для разварки выводов с кристалла на ножки прибора алюминиевыми проволоками диаметром 10–50 мкм. Использование ультразвуковых колебаний существенно снижает степень деформации проводника и способствует получению качественного соединения благодаря активному разрушению окисной пленки.

### 3.4. Технологические особенности сварки давлением электронных приборов

Виды соединений. При изготовлении электронных приборов используются различные виды соединений. Их можно подразделить на соединения проволочных элементов (рис. 86), листовых элементов (рис. 87) и проволочных

элементов с листовыми (рис. 88). Отдельно приводятся виды соединений, выполняемых диффузионной сваркой (рис. 89).

При соединении проволок возникает большое количество вариантов, реализуемых в конструкциях приборов. Так, при получении многозвенных выводов приемно-усилительных ламп соединяются проводники как одного, так и разных диаметров.

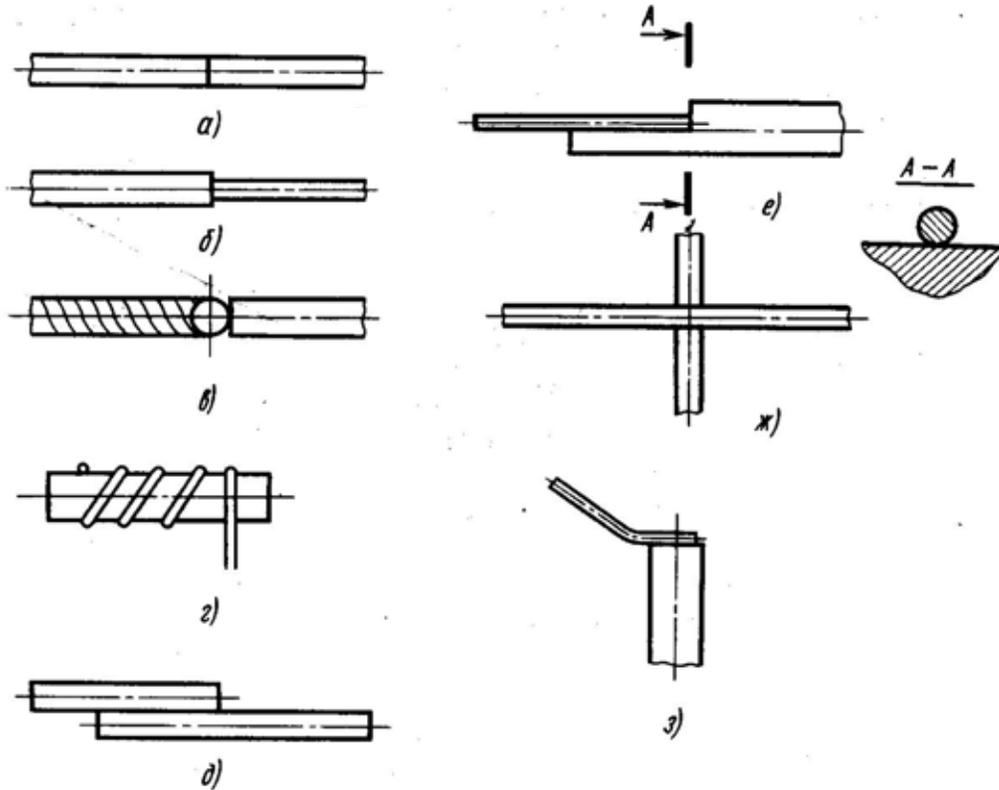


Рис. 86. Виды проволочных соединений:

- а – встык проволок одинакового диаметра, б – встык проволок разного диаметра, в – встык многожильного провода с проволокой, г – соединение с навивкой более тонкой проволоки, д – параллельное соединение проволок одинакового диаметра, е – параллельное соединение проволок разного диаметра, ж – нахлесточное соединение, з – соединение проволок разного диаметра по торцу проволоки большего диаметра

При этом материалы проводников могут быть различными. В конструкциях транзисторов внешний вывод может оканчиваться многожильным проводом. В этом случае соединяется проводник с многожильным проводом, оплавленным предварительно в шарик (рис. 86, в). При монтаже электровакуумных приборов широко распространены параллельное, крестообразное соединения и соединения с навивкой проволоки

малого диаметра (см. рис. 86, г, д, е, ж). При разварке кристалла микросхемы с внешним выводом корпуса используется соединение по торцу проволоки большего диаметра (рис. 86, б, з).

Используются при сборке электронных приборов и соединения из листовых материалов. Основным видом соединения в этом случае является нахлесточное (см. рис. 87, а), наиболее распространенное практически для всех способов сварки давлением.

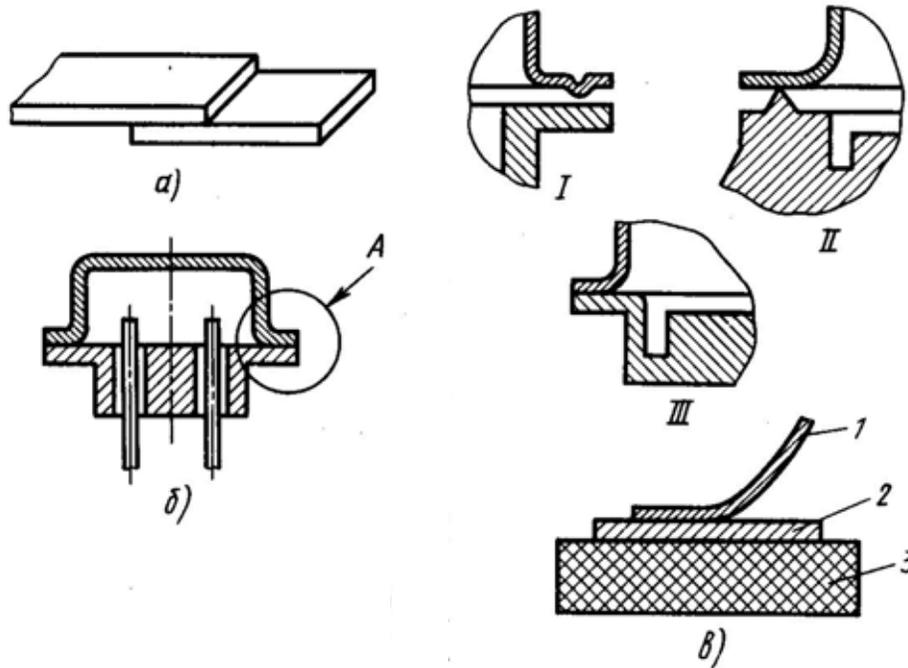


Рис. 87. Виды соединений из листовых материалов:

а – нахлесточное соединение, б – нахлесточное соединение для различных методов сварки (I, II – узел А для рельефной сварки, III – для холодной сварки), в – нахлесточное соединение ленты с пленкой контактной площадки; 1 – лента, 2 – контактная площадка, 3 – диэлектрическая подложка

Применительно к отдельным конструкциям электронных приборов в нахлесточное соединение вводятся элементы, облегчающие его образование или исключают разрушение прибора в процессе образования соединения. Так, при герметизации корпусов полупроводниковых приборов электроконтактной сваркой на одной из кромок выполняется рельеф (см. рис. 87, б, варианты I и II). При герметизации корпусов холодной сваркой

непосредственно за свариваемой кромкой на основании корпуса делается разгрузочная канавка (см. рис. 87, б, вариант III). Используют соединение ленточного вывода кристалла микросхемы с контактными площадками, напыленными на диэлектрик (см. рис. 87, в).

Во многих случаях в конструкциях приборов приходится соединять проволочные элементы с листовыми. Наиболее просто выполняются нахлесточные соединения (см. рис. 88, а, в, г). Выполнение тавровых соединений (см. рис. 88, б, д) требует использования специального капиллярного инструмента.

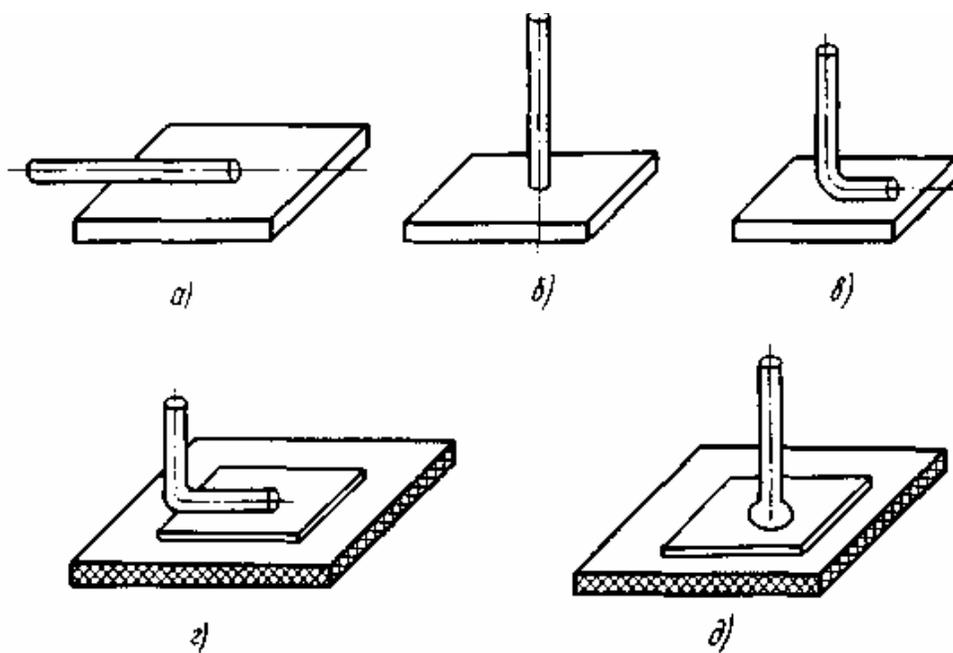


Рис. 88. Виды соединений проволоки с листовыми и пленочными материалами:  
а – соединение внахлестку, б – тавровое соединение, в – соединение «сапожок»,  
г – нахлесточное соединение проводника с пленкой контактной площадки, д – тавровое  
соединение проволоки с контактной площадкой t

При диффузионной сварке детали в месте соединения должны иметь большую поверхность (рис. 89).

Подготовка поверхности свариваемых деталей. На поверхности свариваемых металлов имеется пленка окислов, слой адсорбированных газов и влаги и, наконец, слой органических загрязнений, которые особенно затрудняют сварку давлением.

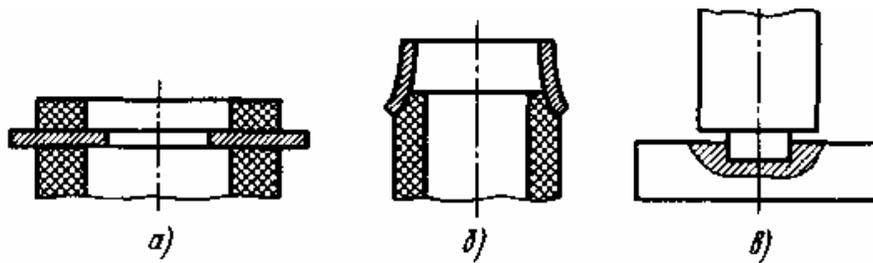


Рис. 89. Виды соединений, выполняемых диффузионной сваркой: а – торцовое соединение, б – соединение по конусу, в – тавровое соединение

Для обеспечения необходимого качества поверхности, отвечающего требованиям процессов сварки давлением, элементы, подлежащие сварке, должны пройти соответствующую подготовку: промывку, травление, обезжиривание, а в некоторых случаях – высокотемпературный отжиг в среде водорода или в вакууме.

Поскольку наибольшее влияние на качество сварных соединений, выполняемых давлением, оказывают органические загрязнения, особое внимание уделяют процессу обезжиривания соединяемых поверхностей. Для обезжиривания используют растворители, отличающиеся высокой растворяющей способностью, малой токсичностью, негорючестью, неагрессивностью к материалам, взрывобезопасностью, низкой стоимостью. Обычно в качестве растворителей используют трихлорэтилен, толуол, ксилол.

Очистку подложек и деталей корпусов полупроводниковых приборов и микросхем производят промывкой в кипящем изопропиловом спирте (2 раза по 5 минут), в деионизованной воде с наложением ультразвуковых колебаний (2 раза по 5 минут), в этиловом спирте (3 минуты). Сушат их в азоте при 120–150 °С в течение 30 минут.

Оснастка и инструмент. Так же, как и при сварке плавлением, при сварке давлением широко используется технологическая оснастка. Однако функции ее в этом случае несколько другие. Прежде всего, технологическая оснастка при сварке давлением обеспечивает требуемое взаимное расположение деталей до и

в процессе сварки. Помимо этой функции оснастка одновременно используется для других целей. Примером может служить оснастка для диффузионной сварки.

На рис. 90 представлено приспособление для сварки пакетированной замедляющей системы лампы бегущей волны. Конструкция системы включает полюсные наконечники 5 из армо-железа и медные диски 6. Для таких конструкций, состоящих из разнородных металлов, эффективно применение сборочно-сварочных приспособлений (оправок), обеспечивающих при сварке необходимое давление сжатия за счет разницы в термическом расширении материала детали и приспособления. Приспособление состоит из фланцев 1, стяжных болтов 2, съемного центрирующего стержня, вставленного в отверстие 3, и компенсирующих прокладок 4. Болты и фланцы изготавливаются из материала, имеющего меньший коэффициент термического расширения, чем свариваемые детали (например, используется молибден).

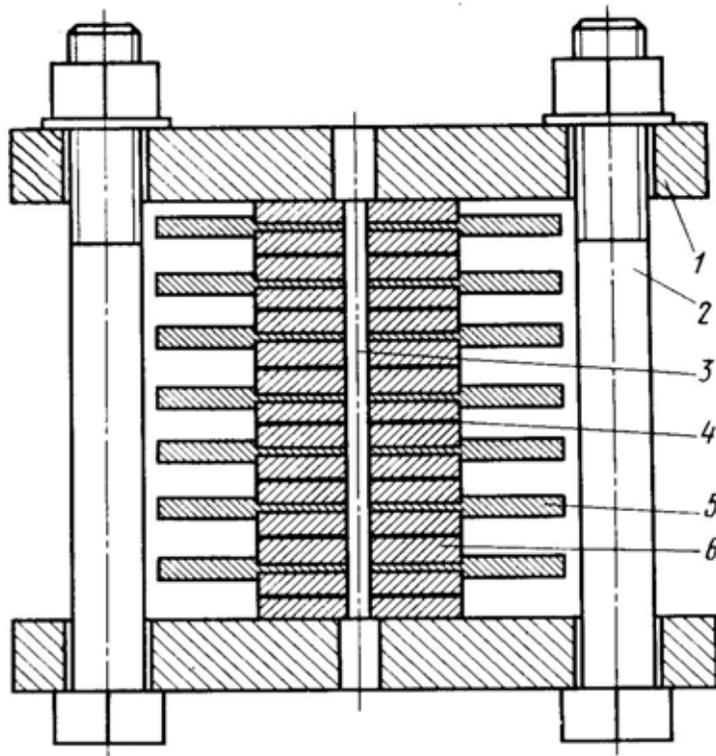


Рис. 90. Приспособление для диффузионной сварки пакетированной замедляющей системы с передачей давления за счет разницы в коэффициентах термического расширения:  
1 – фланец, 2 – стяжной болт, 3 – отверстие, 4 – компенсирующие прокладки,

Предварительная сборка пакета деталей производится с помощью центрирующего стержня, затем затяжкой гаек выбираются зазоры между всеми деталями без создания дополнительных усилий.

Во многих случаях конструкция технологической оснастки включает как составную часть сварочный инструмент. На рис. 91 представлено сварочное приспособление для герметизации корпусов приборов контурной контактной сваркой. Свариваемые детали (основание корпуса 1 и крышка 2) помещаются между составными сварочными электродами 3. Изготавливают электроды из меди, так как она обладает высокой электро- и теплопроводностью. Вставки 4, служащие для увеличения срока службы электродов, должны кроме хорошей электро- и теплопроводности обладать высокой механической прочностью при сжатии. Таким материалом является эльконайт (это псевдосплав, состоящий из 70–80 % вольфрама и 20–30 % меди, полученный методом порошковой металлургии). Кроме эльконайта электродным материалом может служить специальная бронза БрНБТ, представляющая собой сплав меди с 1,4–1,6 % никеля, 0,2–0,4 % бериллия и 0,05–0,15 % титана.

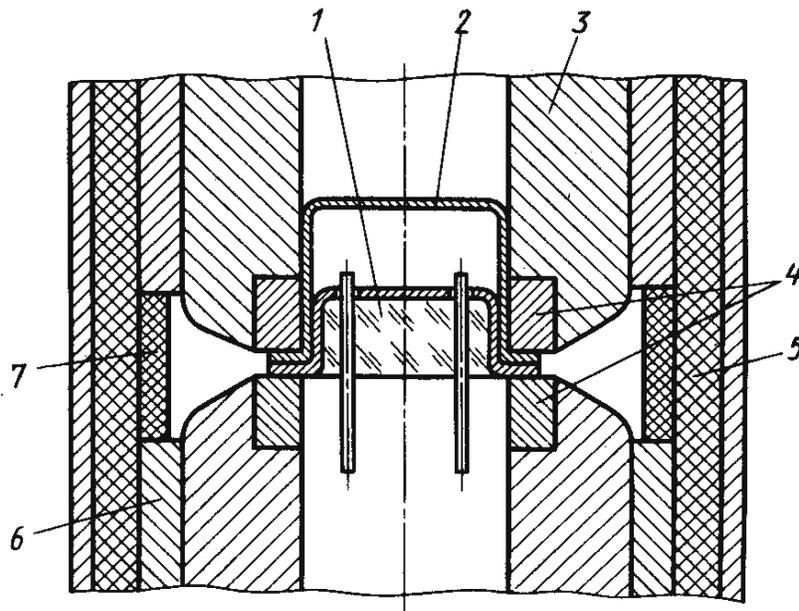


Рис. 91. Приспособление для герметизации корпусов приборов контурной контактной сваркой: 1 – основание корпуса, 2 – крышка, 3 – сварочные электроды, 4 – вставки,

Электроды центрируются запрессованными в текстолитовый стакан 5 стальными шлифованными втулками 6, разделенными изоляционной втулкой 7.

Аналогично центровка свариваемых деталей и инструмента с помощью оправок осуществляется и при герметизации корпусов полупроводниковых приборов холодной сваркой.

Сложной задачей при сварке давлением является совмещение свариваемых деталей и инструмента, особенно при выполнении межсоединений в микросхемах. Диаметр проводника в этом случае составляет 10–30 мкм. В конструкции инструмента предусмотрены элементы, через которые проводник подается к месту сварки. На рис. 92 показаны инструменты с совмещенной подачей проволоки. В основном применяются два основных типа инструмента: с центральным отверстием (капилляром) и с боковым. Электрод с центральным отверстием позволяет выполнять соединения внахлестку и тавровые соединения, электрод с боковым отверстием используется для сварки только внахлестку.

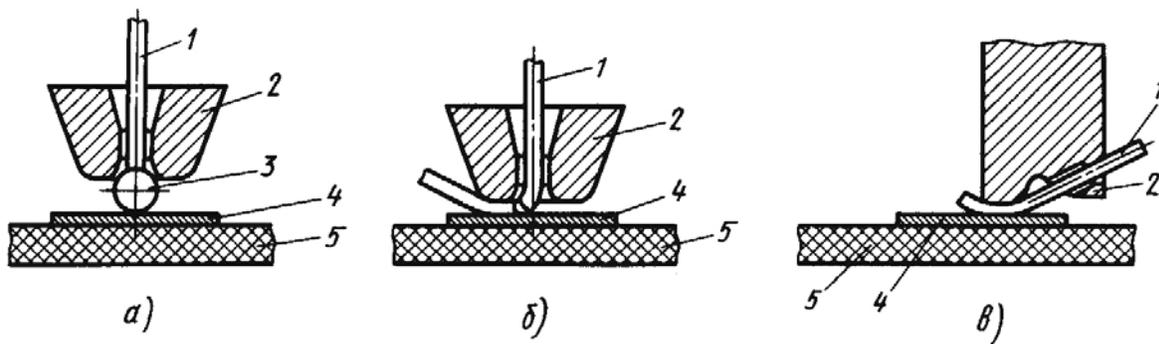


Рис. 92. Сварочный инструмент с совмещенной подачей проволоки: (а – капилляр с центральным отверстием, б – нахлесточное соединение, в – инструмент с боковым отверстием для подачи проволоки), 1 – проволока, 2 – электрод, 3 – оплавленный шарик, 4 – контактная площадка, 5 – диэлектрическая подложка;

В некоторых случаях для подачи проволоки в место сварки и совмещения ее с инструментом используют специальные направляющие устройства: боковой капилляр (рис. 93) и устройство типа «птичий клюв» (рис. 94).

Инструмент для сварки давлением является важнейшим элементом, который определяет качество сварных соединений, производительность процесса и т. д.

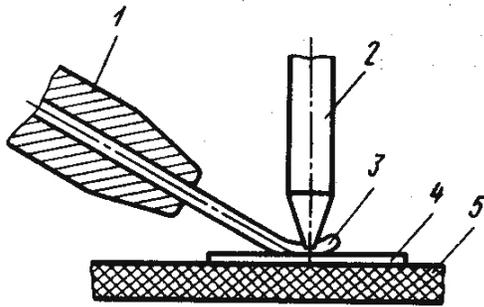


Рис. 93. Направляющее устройство с боковым капилляром: 1 – капилляр, 2 – инструмент-электрод, 3 – проволока. 4 – контактная площадка, 5 – диэлектрическое основание

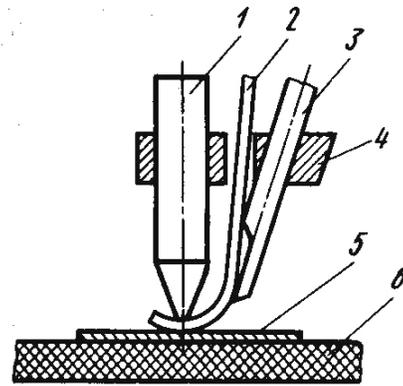


Рис. 94. Направляющее устройство типа «птичий клюв»: 1 – электрод, 2 – проволока, 3 – направляющая. 4 – планка, 5 – контактная площадка 6 – диэлектрическая подложка

Инструмент, предназначенный для присоединения электродных выводов (например, при соединении контактных площадок микросхем с внешними выводами корпусов приборов), должен отвечать ряду требований: обладать высокой механической прочностью и износостойкостью, обеспечивать концентрацию энергии в зоне сварки и совмещение проволоки с контактными площадками, не затруднять визуальный контроль процесса сварки и обеспечивать удобство в эксплуатации. Кроме того, к инструменту могут предъявляться дополнительные требования, отражающие специфику используемого способа сварки выводов (термокомпрессионная, ультразвуковая или электроконтактная сварка). Например, к инструменту для термокомпрессионной сварки требования можно сформулировать следующим образом: малая теплопроводность при сварке холодным инструментом и большая – при сварке нагретым; слабая окисляемость при нагреве до 400 °С; высокая химическая стойкость к взаимодействию со свариваемыми материалами (алюминием, золотом). Процесс термокомпрессионной сварки может выполняться с отдельной (от инструмента) или совмещенной подачей

проволоки. Конструкции таких электродов были рассмотрены ранее (см. рис. 92–94).

При термокомпрессионной сварке с отдельной подачей проволоки иногда применяют составные электроды (рис. 95). В металлические держатели вклеиваются вставки двух типов: конусные (рис. 95, а) и призматические (рис. 95, б). Вставки изготавливаются из синтетического корунда (лейкосапфира или искусственного рубина).

Материалом для инструментов с совмещенной подачей проволоки обычно служит твердый сплав ВК6М. Для термокомпрессионной сварки с импульсным нагревом инструмента, иначе называемой сваркой косвенным импульсным нагревом, в качестве материала инструмента используется вольфрам. Конструкция такого инструмента представлена на рис. 96.

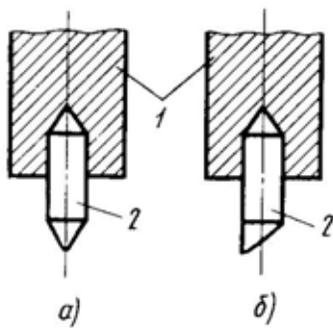


Рис. 95. Конструкция составных электродов:  
а – с конусной вставкой,  
б – с призматической вставкой;  
1 – держатель, 2 – вставка

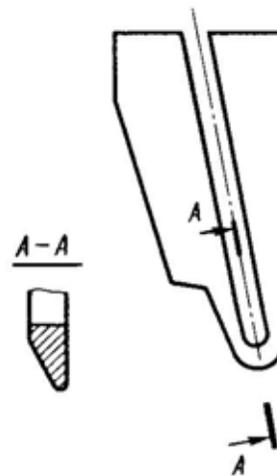


Рис. 96. Конструкция инструмента для сварки косвенным импульсным нагревом

Инструмент для ультразвуковой сварки изготавливается из материала, который обеспечивает эффективную передачу энергии ультразвуковых колебаний и не вступает во взаимодействие со свариваемым материалом. Обычно при изготовлении инструмента для ультразвуковой сварки используются твердый сплав ВК6М, карбиды титана или вольфрама, а также

корундовая керамика. Инструмент обычно имеет вид стержня с заточкой на конце в виде клина.

Очень важным элементом инструмента для ультразвуковой сварки является форма его торцевой поверхности. Торцевая поверхность электрода может быть гладкой, с продольной, с поперечной, с продольной и поперечной, или с крестообразной канавками (рис. 97, а–д).

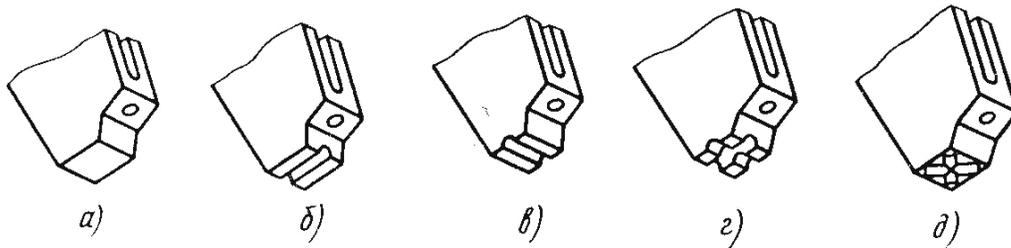


Рис. 97. Конструкция торцевой части сварочного инструмента с боковой подачей проволоки: а – с гладким торцом, б – с продольной канавкой, в – с поперечной канавкой, г – с продольной и поперечной канавками, д – с крестообразной канавкой

Жесткие требования предъявляются и к инструменту для односторонней электроконтактной сварки. Инструмент (рис. 98) в этом случае представляет собой склеенные через диэлектрическую прокладку с определенным зазором или отдельные электроды, закрепленные в сварочной головке, обеспечивающей регулирование зазора между ними.

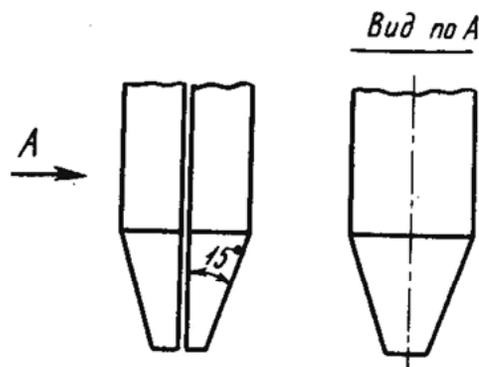


Рис. 98. Инструмент для электроконтактной сварки сдвоенным электродом

Материал таких электродов должен обладать малой окисляемостью для обеспечения хорошего электрического контакта с соединяемыми деталями, а также высокой твердостью, износостойкостью и химической стойкостью к

взаимодействию с материалом выводов при высокой температуре. Материалом для изготовления инструмента для этой сварки является карбидовольфрамокобальтовые твердые сплавы ВК6М, ВК2, ВК9. Существенное влияние на работоспособность инструмента оказывает процентное содержание в сплаве кобальта. Так, при содержании кобальта 2–3 масс. доли % в сплаве инструмент получается низкой прочности, имеет высокую износостойкость, а при содержании кобальта в количестве 15 масс. доли % и более – имеет высокую прочность, но низкую износостойкость. Низкое содержание кобальта в сплаве снижает способность инструмента к схватыванию с алюминиевой проволокой, при котором происходит постепенное удаление из твердого сплава частиц кобальта, что разрушает инструмент. При сварке золотой проволоки это явление усиливается, так как кобальт более интенсивно, чем алюминий, растворяется в золоте. Кроме твердых сплавов для изготовления инструмента для односторонней контактной сварки можно использовать молибден и вольфрам.

Двустороннюю электроконтактную сварку наиболее широко используют при сборке электровакуумных приборов. В качестве электродов в этом случае используют стержни из меди или специальных медных сплавов. Форма электродов представлена на рис. 99.

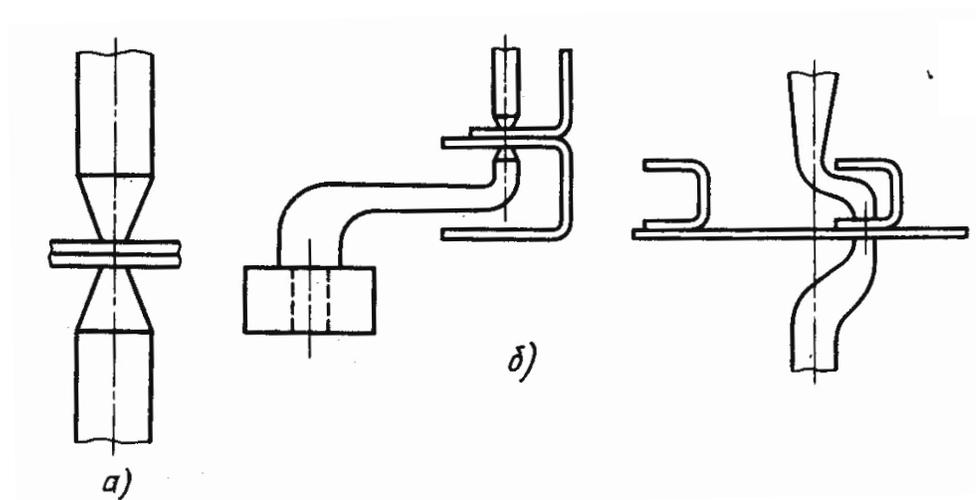


Рис. 99. Электроды для двусторонней точечной электроконтактной сварки: а – прямые электроды, б – фигурные электроды

Для изготовления электродов, также используется дисперсионно твердеющий сплав, стойкость которого превышает стойкость медных электродов в 3–5 раз.

При герметизации корпусов микросхем роликовой сваркой в качестве инструмента используются конические ролики (рис. 100), свободно вращающиеся на полуосях. Ролики изготавливаются из меди. Для увеличения стойкости используют также ролики из медно-кадмиевого сплава МК.

Правильная конструкция рабочих частей инструмента для холодной сварки определяет качество получаемого сварного соединения. Схема герметизации корпусов полупроводниковых приборов холодной сваркой представлена на рис. 101.

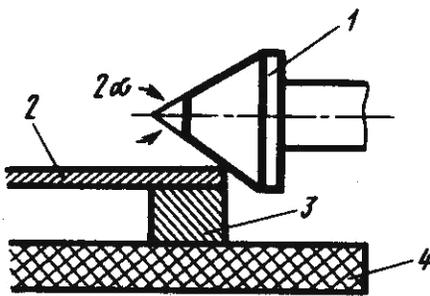


Рис. 100. Электрод для роликовой сварки при герметизации корпусов микросхем:  
1 – роликовый электрод, 2 – крышка микросхемы, 3 – металлический пояс, 4 – керамическое основание

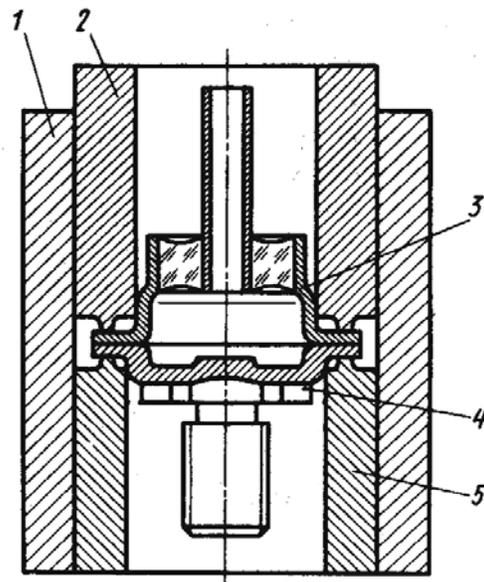


Рис. 101. Схема герметизации корпусов полупроводниковых приборов холодной сваркой: 1 – направляющий стакан, 2, 5 – верхний и нижний пуансоны, 3 – крышка корпуса, 4 – основание корпуса

Собранный узел устанавливают в приспособление для холодной сварки, состоящее из направляющего стакана 1 и сварочного инструмента (верхнего 2 и нижнего 5 пуансонов). Приспособление после загрузки помещают под шток гидроцилиндра пресса. На прессе задают предварительно выбранное давление и производят холодную сварку.

Рабочие части пуансонов должны иметь трапецеидальную форму с притуплением острых кромок с внутренней стороны для устранения подреза на утоненной части шва. Пуансоны для холодной сварки изготавливают из легированных инструментальных сталей марок Х12, Х12М, Х13Г, ШХ13, а также из твердых сплавов ВК20.

Техника выполнения соединений сваркой давлением. Качество сварных соединений, получаемых сваркой давлением, зависит от многих факторов: от правильного выбора способа сварки; подготовки поверхности свариваемых кромок; состояния сварочного инструмента; тщательности совмещения свариваемых элементов; от параметров режима сварки. Первые три из перечисленных факторов были рассмотрены ранее.

Тщательность совмещения свариваемых элементов особенно важна при выполнении микросоединений, т. е. при сварке проводников с контактными площадками микросхем. На рис. 102 представлена последовательность переходов при выполнении микросоединений термокомпрессионной сваркой с использованием инструмента с центральным, капилляром. Позиция I представляет исходное положение инструмента и контактной площадки микросхемы. Присоединяемый проводник на своем конце имеет оплавленный шарик. Далее происходит совмещение контактной площадки микросхемы с проводником (позиция II). Совмещенные элементы свариваются с приложением давления  $P$  и нагревом контактной площадки до температуры  $T$  (позиция III).

С помощью сварочной головки формируется петля – стежок (позиция IV). Форма петли определяется конструкцией прибора и его свойствами. Далее проводник совмещается с контактной площадкой корпуса прибора (позиция V). На позиции VI происходит приварка второго конца стежка и обрыв проволоки. Заканчивается цикл образования соединения контактных площадок с проводником оплавлением конца проволоки в шарик (позиция VII).

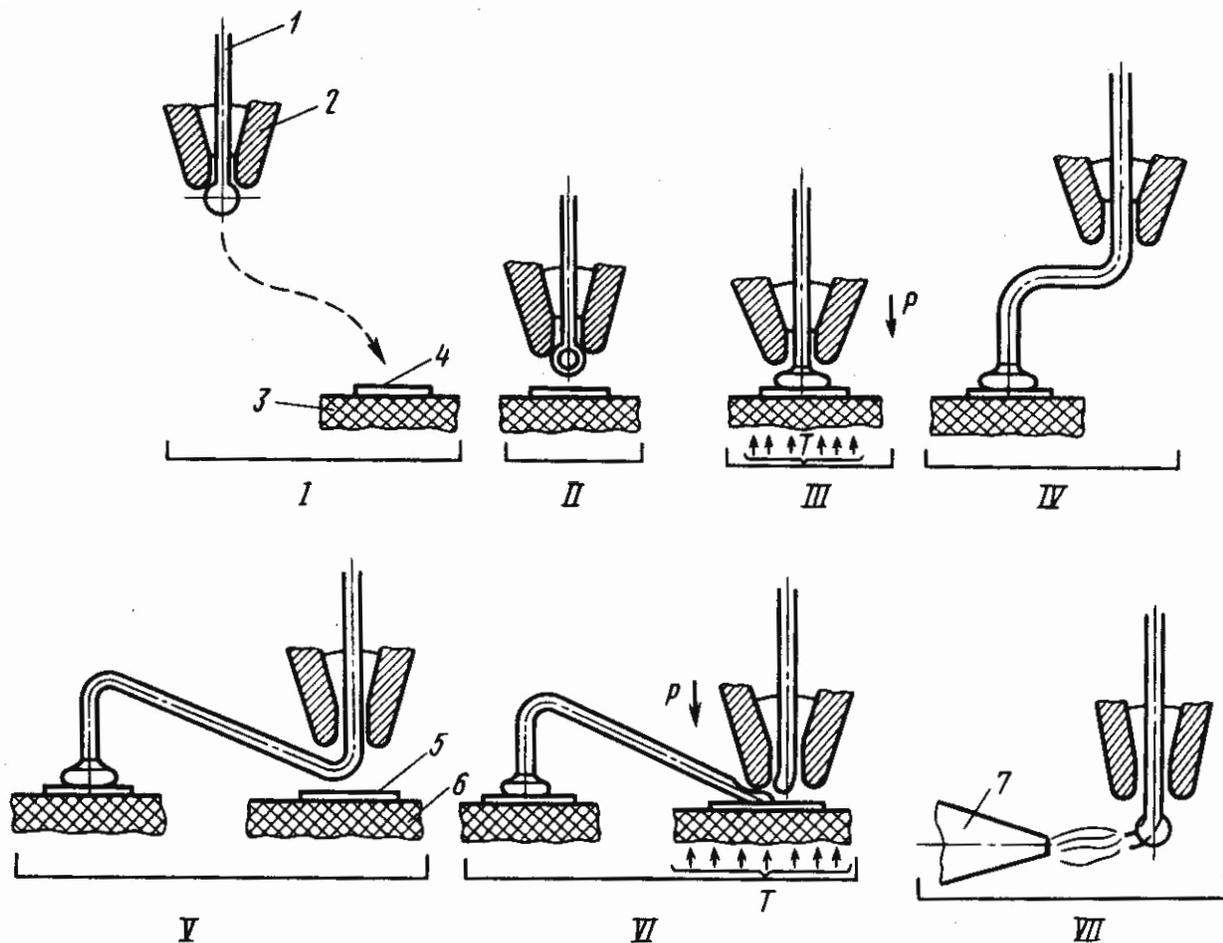


Рис. 102. Последовательность переходов при выполнении микросоединений:  
 1 – проволока, 2 – инструмент-капилляр, 3 – кристалл, 4 – контактная площадка микросхемы,  
 5 – контактная площадка корпуса, 6 – основание корпуса, 7 – газовая горелка

Такая последовательность переходов при выполнении соединения (за исключением оплавления проводника) характерна и для других способов микросварки (ультразвуковой, односторонней электроконтактной).

Погрешности, допускаемые при выполнении указанных переходов, могут привести к образованию следующих дефектов. Ошибки в поиске контактных площадок на позициях I и V могут привести к неправильной схеме их коммутации.

Неправильное выполнение совмещения проводника с контактной площадкой (позиции II и VI) может привести к тому, что центр шарикового контакта будет смещен к краю контактной площадки более чем на  $1/2$  диаметра проволоки и менее  $3/4$  сварного соединения будет находиться в пределах

контактной площадки. Манипулирование с проводником на позициях IV к V может вызвать обрыв проволочных проводников и разрушение выполненных ранее сварных соединений на позиции III. Кроме этого, возможны касания проволочных проводников друг с другом при выполнении серии стежков, чрезмерный натяг проволоки или сильный ее прогиб при формировании стежка, касание проволочных проводников края кристалла. При обрыве проволоки на позиции VI возможно образование «хвостов» длиной более трех диаметров проволоки, что является также недопустимым дефектом.

Размеры сварной точки при выполнении соединения (позиции III и VI) могут также выходить за пределы допустимого (диаметр шарикового контакта может быть меньше двух диаметров или в 4 раза больше диаметра проволоки, длина деформированного участка проволоки в сварной точке менее 3/4 или более трех диаметров проволоки). Эти дефекты возникают при неправильно выбранных параметрах режима сварки.

Основными параметрами режима способов сварки давлением являются (рис. 103) температура инструмента  $T_1$ , температура рабочего столика  $T_2$ , давление  $P$ , время сварки  $t$ , скорость деформирования  $V_p$ , параметры перемещения колеблющегося инструмента при ультразвуковой сварке  $f$ , параметры применяемой защитной среды  $A$ .

Температура нагрева в месте сварки не должна достигать температуры плавления соединяемых материалов. Давление определяется допустимой деформацией соединяемых деталей, а также допустимым механическим воздействием на прибор в целом. Длительность процесса устанавливается минимально возможной с целью повышения производительности процесса и недопущения возникновения хрупких прослоек в месте соединения при сварке разнородных материалов. Скорость деформирования в значительной мере определяет прочность соединения. Повышение скорости нагружения позволяет повысить относительную прочность (отношение прочности соединения к прочности проводника) сварного соединения.

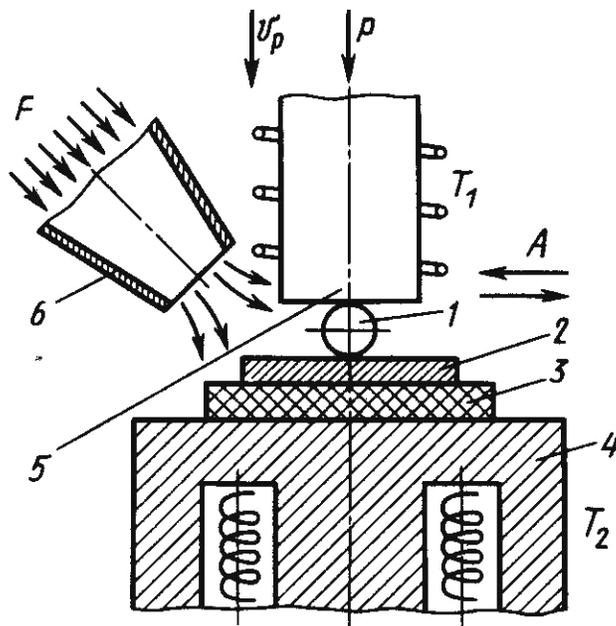


Рис. 103. Схема процесса и основные параметры режима сварки давлением:  
1–3 – свариваемые детали, 4 – столик, 5 – инструмент, 6 – сопло

Параметры перемещения вибрирующего инструмента при ультразвуковой сварке устанавливаются в зависимости от сочетания соединяемых материалов.

Параметры защитной среды (способ защиты, применяемые защитные газы) определяются требованиями к сварному соединению, способом сварки и свойствами соединяемых материалов.

#### Особенности сварки давлением материалов полупроводниковых приборов.

Количество материалов, свариваемых способами сварки давлением, в конструкциях полупроводниковых приборов и микросхем невелико. Это золото и алюминий, используемые для изготовления проводников, которые привариваются непосредственно к кремнию или к пленкам из золота или алюминия, нанесенных на него или диэлектрическую подложку, либо на внешний вывод корпуса прибора.

Сваркой давлением свариваются также такие материалы, как ковар (сплав 29НК) и медь, являющиеся основными материалами корпусов полупроводниковых приборов и микросхем.

Золото и алюминий соединяются микросваркой давлением (термокомпрессионной, ультразвуковой, односторонней электроконтактной).

По способности свариваться с другими материалами их можно разделить на следующие группы: металлы, образующие ряд твердых растворов (серебро–золото, золото–медь), обладают хорошей свариваемостью; материалы, образующие между собой низкотемпературные эвтектики (алюминий–кремний, золото–кремний), обладают удовлетворительной свариваемостью; металлы, которые в процессе сварки могут образовывать хрупкие интерметаллические соединения (золото–алюминий, золото–олово), обладают удовлетворительной свариваемостью, но при их соединении требуется тщательное соблюдение режимов сварки.

Указанные сочетания материалов по-разному свариваются различными способами сварки. Ультразвуковой сваркой хорошо свариваются проводники из алюминия с золотым покрытием, нанесенным на металл по подслою нихрома; алюминиевые проводники с алюминиевой пленкой, нанесенной на стекло, кремний или окисел кремния; золотые, алюминиевые проводники с золотым покрытием, осажденным на ковар по подслою никеля.

При термокомпрессионной сварке золотой проволоки и алюминиевых контактных площадок возможно образование хрупких интерметаллических соединений, ухудшающих качество и надежность сварных соединений.

Термокомпрессионная сварка с импульсным косвенным нагревом применяется для присоединения золотой и алюминиевой проволок к траверсам корпусов транзисторов и к подложкам и корпусам гибридных микросхем, изготовленных из ковара, никеля, ситалла, покрытых золотом.

Электроконтактной односторонней сваркой соединяют проволочные выводы диаметром более 20 мкм из золота, серебра, меди с контактными площадками, покрытыми золотом, медью, никелем, а также с выводами корпуса (подложкой), покрытыми этими же металлами.

При герметизации корпусов полупроводниковых приборов и микросхем холодной сваркой свариваются следующие сочетания материалов: медь–медь, медь–сталь, ковар–медь. Для получения нужного сварного соединения

холодной сваркой необходимо, чтобы поверхности были тщательно подготовлены.

Одним из способов такой подготовки является нанесение на основание корпуса из ковара и медные крышки химическим или гальваническим методом пленок никеля. Хорошие результаты получают при герметизации корпусов с предварительно химически нанесенным слоем никеля толщиной 3–6 мкм и последующим вжиганием его в течение 45 мин в атмосфере водорода при 400 °С. Термообработка увеличивает микротвердость покрытия, стабилизируя процесс герметизации холодной сваркой.

Для герметизации корпусов, изготовленных из ковара, применяют электроконтактную рельефную сварку или роликовую электроконтактную сварку.

При соединении разнородных металлов в конструкциях, требующих надежный тепловой и электрический контакт, а также для соединения керамики с металлом применяется диффузионная сварка в вакууме.

*Холодной сваркой* при изготовлении электровакуумных приборов пережимают медные штенгели в процессе съема прибора с откачного поста.

### **3.5. Оборудование для сварки давлением изделий электронного машиностроения**

Состав сварочных установок. Прежде всего, нужно подчеркнуть, что любое сварочное оборудование является в значительной мере специализированным, т. е. задумано, спроектировано и построено для выполнения, как правило, одного сварочного процесса. Для массового производства, каким является производство изделий электронной техники, когда одни и те же приборы, одни и те же их элементы выпускаются в количестве десятков и сотен тысяч единиц, оборудование для сварки специализируют. И, конечно, в производстве наиболее эффективно применение не только механизированного и автоматизированного сварочного

оборудования, но и гибких производственных модулей. Из робототехнических устройств составляют целые системы, которые можно легко перенастраивать на сварку узлов, отличающихся друг от друга по месту сварки и размеру сварного соединения. Подобные системы, имея собственные склады-накопители и транспортные системы, способны работать без участия человека целую смену и более длительное время. В каждой установке для сварки давлением легко можно выделить следующие главные системы и механизмы:

- станина или основание, или корпус, на котором монтируется вся установка;
- основные исполнительные механизмы данного процесса сварки (механизм давления, механизм нагрева и т. д.);
- системы обеспечения работоспособности исполнительных механизмов (привод механизма давления, энергопитание механизма нагрева и т. д.);
- системы подачи заготовок к месту сварки и их фиксация перед сваркой;
- системы управления (включатели, реле, системы автоматизации и т. п.);
- системы контроля режимов и наблюдения за процессом сварки;
- системы транспортировки и складирования готовых элементов.

Многие сварочные установки электронной техники выполняются в виде рабочего столика и называются сварочными или монтажными столами. Таким образом, станина в виде одно- или двух тумбового рабочего стола является довольно распространенным типом основания установки, так как относительно небольшие применяемые мощности установки позволяют легко разместить здесь все агрегаты и системы. При изучении оборудования целесообразно рассматривать не конструкции конкретных установок, а принципиальные схемы и узлы, обеспечивающие заданный сварочный процесс.

Механизмы давления сварочных установок. Все установки для любого способа сварки давлением должны содержать основной исполнительный орган – механизм давления. Механизм давления должен обеспечивать необходимое усилие сжатия в зоне сварки, возможность регулирования этого усилия для

изменения режимов и возможность управления давлением по заданной программе во время сварки..

Необходимое сварочное усилие определяется толщиной соединяемых элементов и объемом пластически деформируемого металла в процессе сварки. Механизм давления должен обладать достаточным быстродействием, чтобы обеспечивать высокую производительность установки.

Для процессов микросварки, когда сварочное давление измеряется величинами в несколько грамм-сил, давление проще всего создать и отрегулировать специальным механизмом типа рычажных весов, на одном конце которого находится сварочный инструмент, а на другом – плавно регулируемый перемещающийся разновес (рис. 104). Такие механизмы называют грузовыми. Усилие в схеме этого механизма определяется по формуле

$$P = G \frac{l_3}{l_1} \frac{l}{l_2 - l}$$

где  $l$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – длина рычагов.

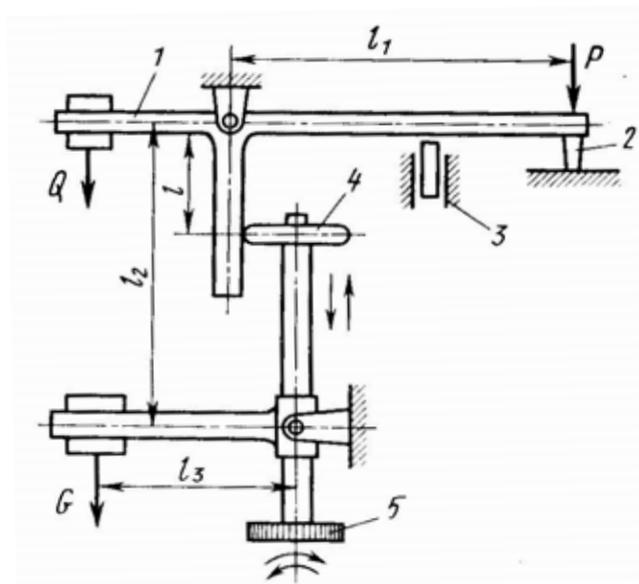


Рис. 104. Схема грузового механизма давления установки СКИН-1: 1 – верхний рычаг с инструментом и уравнивающим грузом Q, 2 – инструмент, 3 – подвижной упор, 4 – подвижной контакт для регулирования усилия изменением плеча  $l_3$  с помощью винта за счет груза G, 5 – винт

Относительно небольшие давления можно создать и с помощью пружинного механизма (рис. 105).

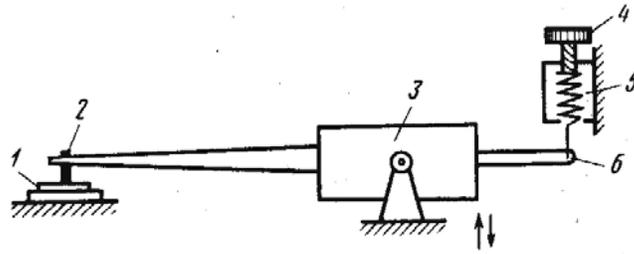


Рис. 105. Схема пружинного механизма давления установки типа УСКМ-2,5

Механизм давления пружинного типа обеспечивает прижим инструмента и усилие сжатия с помощью пружины с регулировкой ее натяга. Детали 1 прижимаются инструментом 2, соединенным с магнитоэлектрическим приводом 3, который поднимается и опускается приводом установки. При перемещении вниз усилие прижима определяется действием пружины 5, отрегулированной винтом 4, через плечо 6.

Механизм давления с электромагнитным приводом (рис. 106) обеспечивает давление при втягивании сердечника 2, на котором через кронштейн 1 крепится инструмент. Усилие на электроде регулируют изменением напряжения питания электромагнита 3.

Для точной подстройки положения электромагнита используется гайка 4, в которой на внутренней резьбе ходит шток, соединенный с корпусом электромагнита 3. Разница хода в резьбах гайки 4 для штока 5 и корпуса 6 позволяет плавно изменить положение электромагнита относительно сердечника 2.

В ряде машин при холодной и электроконтактной сварке для создания давления используют пневматические приводы (рис. 107).

Пневмопривод двустороннего действия имеет подачу воздуха в верхнюю 1 и нижнюю полости 2 камеры. Необходимое усилие на инструмент 3 передается при подаче сжатого воздуха в верхнюю полость и определяется давлением воздуха и площадью поршня.

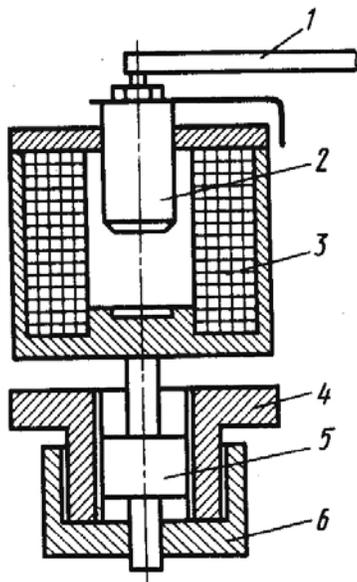


Рис. 106. Схема привода механизма давления электромагнитного типа

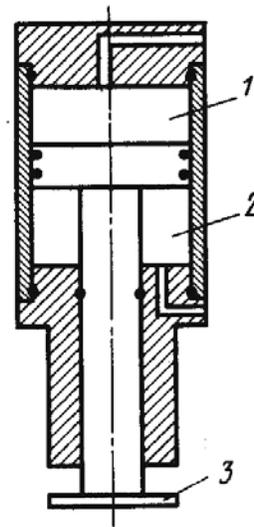


Рис. 107. Схема пневматического привода

Обычно нижняя полость в это время сообщается с окружающей средой. Однако расширить диапазон сжимающих давлений можно, если подавать сжатый воздух под разными давлениями в верхнюю и нижнюю полости камеры. Даже при равном давлении воздуха в полостях камеры усилие сжатия поршня вниз будет больше из-за разности площадей поршня сверху и снизу.

Наконец, для создания больших усилий сжатия, способных вызвать значительную деформацию большого объема металла, особенно в холодном состоянии, применяются гидравлические приводы.

Гидравлический привод обеспечивает плавный ход рабочих органов машин, отличается долговечностью вследствие самосмазывания и имеет простую и надежную конструкцию. Основным исполнительным органом (гидроцилиндр) по своей конструкции аналогичен приведенному на рис. 107 пневматическому цилиндру. В состав гидравлической системы входят насосно-аккумуляторная станция, нагнетающая гидравлическую жидкость (обычно специальные масла) в гидроцилиндр, и система регулирования давления жидкости в напорной полости цилиндра.

обеспечивающие нагрев при сварке давлением, используют внутренние и внешние источники нагрева. При электроконтактных методах сварки нагрев производится током. Этот принцип относится к внутреннему типу тепловыделения. Таким образом, для нагрева зоны сварки через свариваемые детали необходимо пропустить импульс электрического тока. В то же время не имеет смысла нагревать части машины, осуществляющие токоподвод, поэтому токоподводы электроконтактных машин выполняют из материалов с небольшим удельным сопротивлением (медь и ее сплавы) и большим сечением.

Так как из закона Джоуля-Ленца следует, что количество выделяемой теплоты пропорционально квадрату тока, то целесообразно подводимую электрическую энергию пропустить через детали в виде тока больших значений (100–10 000 А) при низком напряжении (1–10 В).

Таким образом, сварочная машина должна содержать преобразователь энергии – сварочный трансформатор – с возможностью регулирования режимов для сварки деталей различной толщины. Обычно у машин электроконтактной сварки понижающие трансформаторы с коэффициентом трансформации до 150 имеют вторичную обмотку в один виток; регулирование же производят, изменяя число включенных в сеть витков первичной обмотки, специально секционированных на 4–8 ступеней.

Сварочный трансформатор располагают возможно ближе к электродам, чтобы уменьшить индуктивные потери мощности в токоведущих шинах вторичного контура.

Таким образом, схема источника нагрева при электроконтактных способах сварки содержит следующие компоненты (рис. 108): на яре трансформатора 1 располагаются первичная 3 и вторичная 2 обмотки и секционированный регулятор коэффициента трансформации 4. Ток к деталям 8 поступает по токопроводам 6 к электродам 7. Регулирование времени сварки осуществляют дозированным во времени включением первичной обмотки в сеть специальным

электронным прерывателем 5, способным регулировать время включения с точностью до 0,02 с.

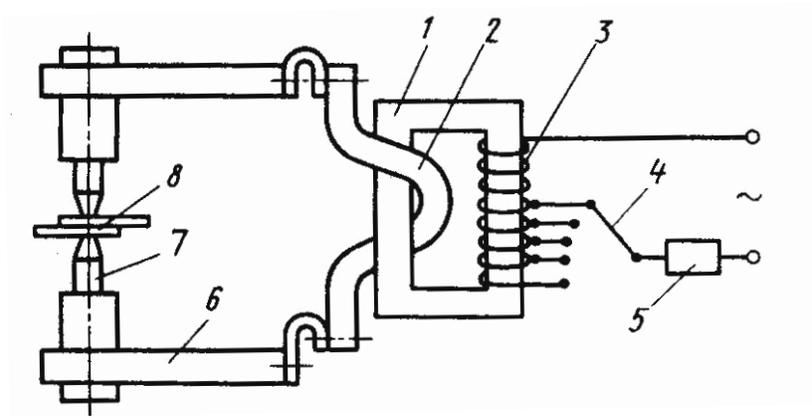


Рис. 108. Схема источника нагрева при электроконтактной сварке:  
 1 – трансформатор, 2 – вторичная обмотка, 3 – первичная обмотка, 4 – регулятор коэффициента трансформации, 5 – прерыватель сварочного тока, 6 – токоподводы, 7 – электроды, 8 – свариваемые детали

Если к схеме добавить недостающие станину, привод давления, измерительные приборы и устройство, регулирующее последовательность включения механизмов, т. е. управление циклом сварки, получим все элементы электроконтактной машины для сварки.

Схема электроконтактной конденсаторной сварки представлена на рис. 109.

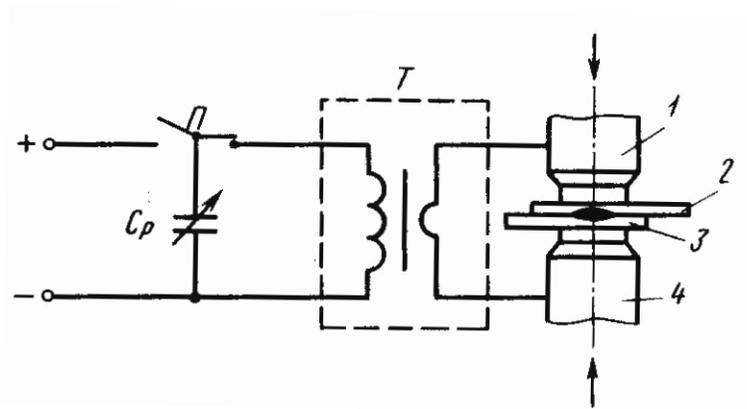


Рис. 109. Схема нагрева деталей при конденсаторной сварке

Разряд конденсаторов с регулируемой емкостью  $C_p$  преобразуется с помощью сварочного трансформатора  $T$ . В левом положении перекидного ключа  $\Pi$  происходит заряд конденсатора от источника постоянного тока

(на схеме не показан). Если перебросить ключ в правое положение, происходит разряд конденсатора на первичную обмотку трансформатора.

При этом во вторичной обмотке индуцируется ток большой силы, который, проходя через электроды 1 и 4 и детали 2 и 3, осуществляет их нагрев в зоне контакта до необходимой для сварки температуры.

Для очень мощных электроконтактных сварочных машин считается целесообразным использовать не переменный ток, а выпрямленный – для более равномерной загрузки сети, т. е. применять машины постоянного тока. Однако машины такой мощности (более 400 кВт•А) при сварке изделий электронной техники практически не применяются.

Другая группа источников нагрева относится к источникам поверхностного типа. Эти источники передают теплоту в зону сварки через контакт с поверхностью. К ним следует отнести газовое пламя (при газопрессовой сварке), электрическую дугу (при дугопрессовой, ударно-дуговой и ударно-конденсаторной сварках).

К поверхностному тепловыделению в плоскости контакта следует отнести тепловыделения при сварке трением и при ультразвуковой сварке.

Наконец, достаточно широко применяется при сварке давлением индукционный нагрев. Его производят вихревыми токами (токами Фуко), возникающими в металле, внесенном в переменное магнитное поле.

Для индукционного нагрева первостепенное значение имеет частота тока. При частотах более 100 кГц более 90 % теплоты выделяется в поверхностном слое металла толщиной 0,1–0,2 мм. Поэтому в состав установок с индукционным нагревом входит специальный генератор высокой частоты соответствующей мощности, от которого питание подается на нагревательное устройство (индуктор) в виде петли, охватывающей зону нагрева.

Устройства, обеспечивающие защитную атмосферу. При газопрессовой сварке защитная атмосфера (окислительная или восстановительная) создается регулированием расхода пламеобразующих газов.

При электрических способах нагрева соединение необходимо поместить в специальную защитную атмосферу или вести сварку в вакууме. Поэтому отличительной особенностью конструкции установок для РТА-процесса является наличие камеры, в которой производится сварка. К конструкции камеры предъявляется ряд требований для осуществления процесса сварки, что вносит ряд конструктивных дополнений в общую схему установки (см. § 10).

Механизмы, обеспечивающие взаимное перемещение кромок при сварке.

Как уже отмечалось, основным процессом данного типа в электронике является ультразвуковая сварка, которая нашла очень широкое применение в операциях разварки контактных площадок кристаллов полупроводниковых приборов.

Для возбуждения акустических волн в твердых телах наибольшее распространение получили магнитострикционный и пьезоэлектрический эффекты.

Ультразвуковые колебательные системы состоят из активного и пассивного элементов. Активным является магнитострикционный или пьезоэлектрический преобразователь, а пассивные элементы (концентратор, инструмент) служат для передачи акустических колебаний в зону сварки.

Стержневой магнитострикционный преобразователь (рис. 110) состоит из сердечника 1 и катушки 2.

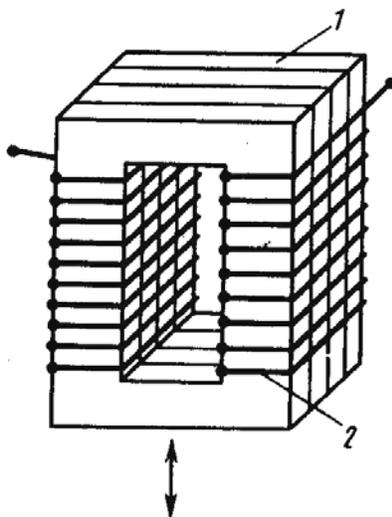


Рис. 110. Стержневой магнитострикционный преобразователь:  
1 – сердечник, 2 – катушка

Переменный ток возбуждает в катушке переменное магнитное поле, которое за счет магнитострикционного эффекта в направлении оси сердечника создает упругие напряжения и деформации, т. е. сердечник совершает продольные механические колебания с частотой переменного магнитного поля. Концентраторы (волноводы) используются для увеличения амплитуды колебаний в зоне сварки и обычно имеют вид стержней переменного сечения (рис. 111). Концентраторы бывают ступенчатой, конической и сложной геометрической формы (рис. 111, а–в).

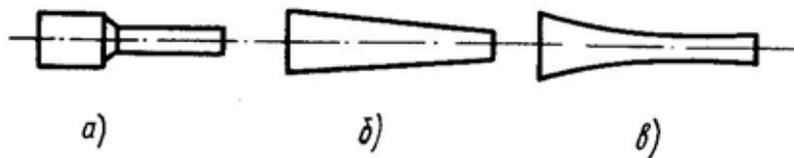


Рис. 111. Виды концентраторов: а – ступенчатый, б – конический, в – сложной геометрической формы

Продольные механические колебания, возбуждаемые в преобразователе, подаются на инструмент или преобразуются в другие типы колебаний, обусловленные технологией и реализуемые изменениями конструкции концентратора и инструмента (рис. 112).

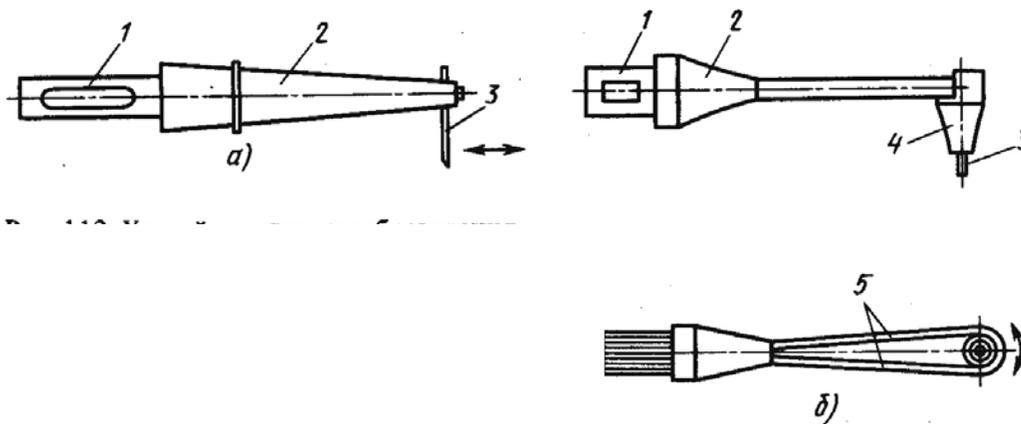


Рис. 112. устройства для преобразования колебаний: а – с помощью волновода продольных колебаний, б – с помощью волновода крутильных колебаний; 1 – преобразователь, 2 – концентратор, 3 – инструмент, 4 – концентратор крутильных колебаний, 5 – волновод продольных колебаний

Изгибные колебания можно возбудить волноводом продольных колебаний, если к волноводу перпендикулярно присоединить стержень 3 (рис. 112, а),

имеющий резонансные размеры по отношению к изгибным колебаниям заданной частоты. Крутильные колебания в зону сварки могут быть переданы различными способами, один из которых представлен на рис. 112, б.

Сварочный инструмент. При методах сварки давлением сварочный инструмент играет огромную роль в образовании соединения, так как именно через инструмент передается сварочное усилие, а форма и размеры инструмента обеспечивают необходимую направленную пластическую деформацию металла в зоне сварки. Особенно это относится к методам без подогрева или с низкотемпературным подогревом.

Для простых операций холодной сварки типа пережима металлических штангелей инструмент в форме ножей-пуансонов работает при встречном сжимающем усилии, поэтому его изготавливают из специальных хромистых сталей X12M, термически обрабатывают до высокой твердости и полируют рабочую часть. Форма рабочей части в этом случае достаточно проста (рис. 113).



Рис. 113. Плоская (а) и цилиндрическая (б) формы пуансонов для пережима штангелей и металлический штангель после холодной заварки (в)

Для холодной сварки по сложному контуру, например при герметизации корпусов полупроводниковых приборов, форма инструмента соответственно усложняется и принимает вид пуансона и матрицы соответствующих размеров (рис. 114).

Электроды для электроконтактной сварки как сварочный инструмент работают в сложных условиях нагрева до температур 400–800 °С и повышения давления до 25 Па. Стойкость электродов (способность сохранить форму, размеры и чистоту рабочей поверхности) определяет качество сварных соединений и производительность процесса.

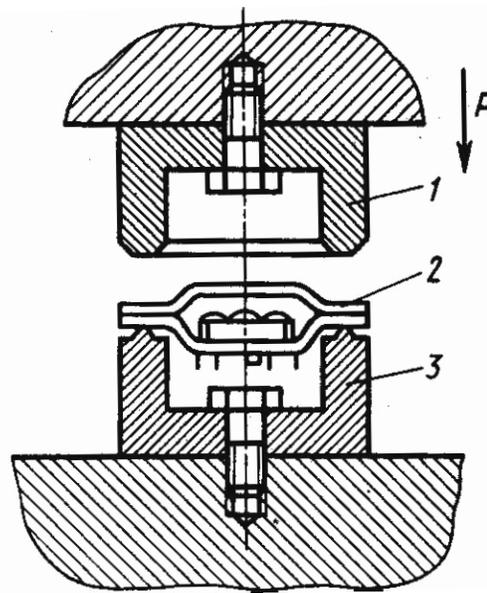


Рис. 114. Схема инструмента для герметизации корпусов полупроводниковых приборов по контуру: 1 – пуансон, 2 – свариваемое изделие, 3 – матрица

Основой электродных материалов является медь с легированием для износостойкости хромом, никелем, вольфрамом и другими элементами. Рабочая поверхность электродов плоская или сферическая с размерами, соответствующими толщине свариваемых материалов (рис. 115). Заданные размеры рабочей поверхности электродов периодически восстанавливаются заточкой специальными инструментами.

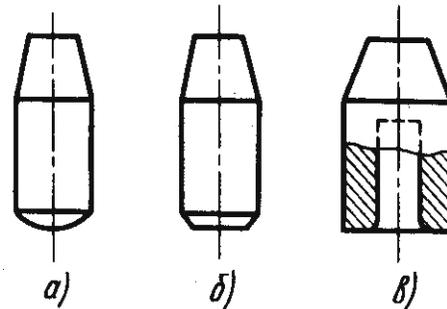


Рис. 115. Основные типы электродов для точечной электроконтактной сварки: а – со сферической рабочей поверхностью, б – с плоской рабочей поверхностью, в – с кольцевой рабочей поверхностью

Большое влияние на процесс и качество сварки оказывает геометрия и качество поверхности инструмента при ультразвуковой и термокомпрессионной сварке, особенно в случае разварки контактных площадок толщиной 10–50 мкм (рис. 116).

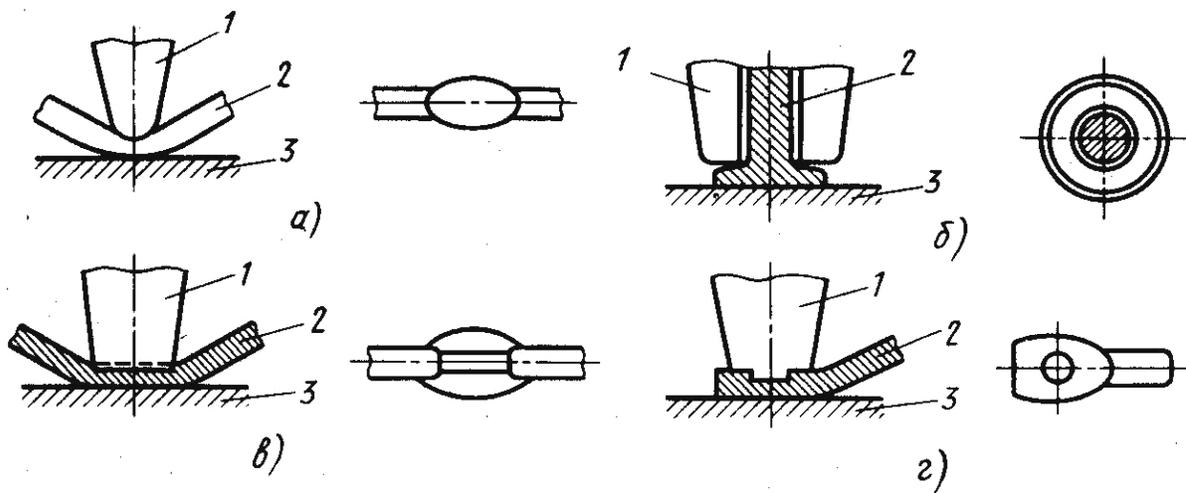


Рис. 116. Виды соединений и некоторые типы инструмента для термокомпрессии: а – термокомпрессия клином; б – соединение втавр из произвольно образованного шарика; в – инструмент с канавкой – соединение с ребром жесткости; г – инструмент с выступом – соединение типа «рыбий глаз»; 1 – инструмент; 2 – проволока; 3 – подложка

Кроме инструмента при сварке миниатюрных соединений важными являются элементы, предназначенные для сборки заготовок, и механизмы совмещения, в частности столы-манипуляторы (рис. 117), средства наблюдения за совмещением и процессом сварки (обычно микроскоп или видикон с телеэкраном), средства контроля качества полученного соединения.

Проработка средств автоматизированного перемещения свариваемых деталей и инструмента позволяет вплотную подойти к созданию промышленных роботов, гибких производственных модулей и систем.

Роботизация сварки давлением. Роботизированные установки целесообразно применять в массовом производстве, где одна и та же операция сварки повторяется многократно. Автоматизация процессов сборки микроэлектронных приборов необходима по многим признакам:

- качество соединений улучшается, так как не зависит от квалификации сборщика;
- снижается трудоемкость сборки, так как автоматы работают в 10–100 раз быстрее;
- невозможно без ошибок произвести ручную разварку 100 и более соединений в одном микроприборе;

– возможно высвободить большое число рабочих от выполнения монотонной и утомительной для зрения операции.

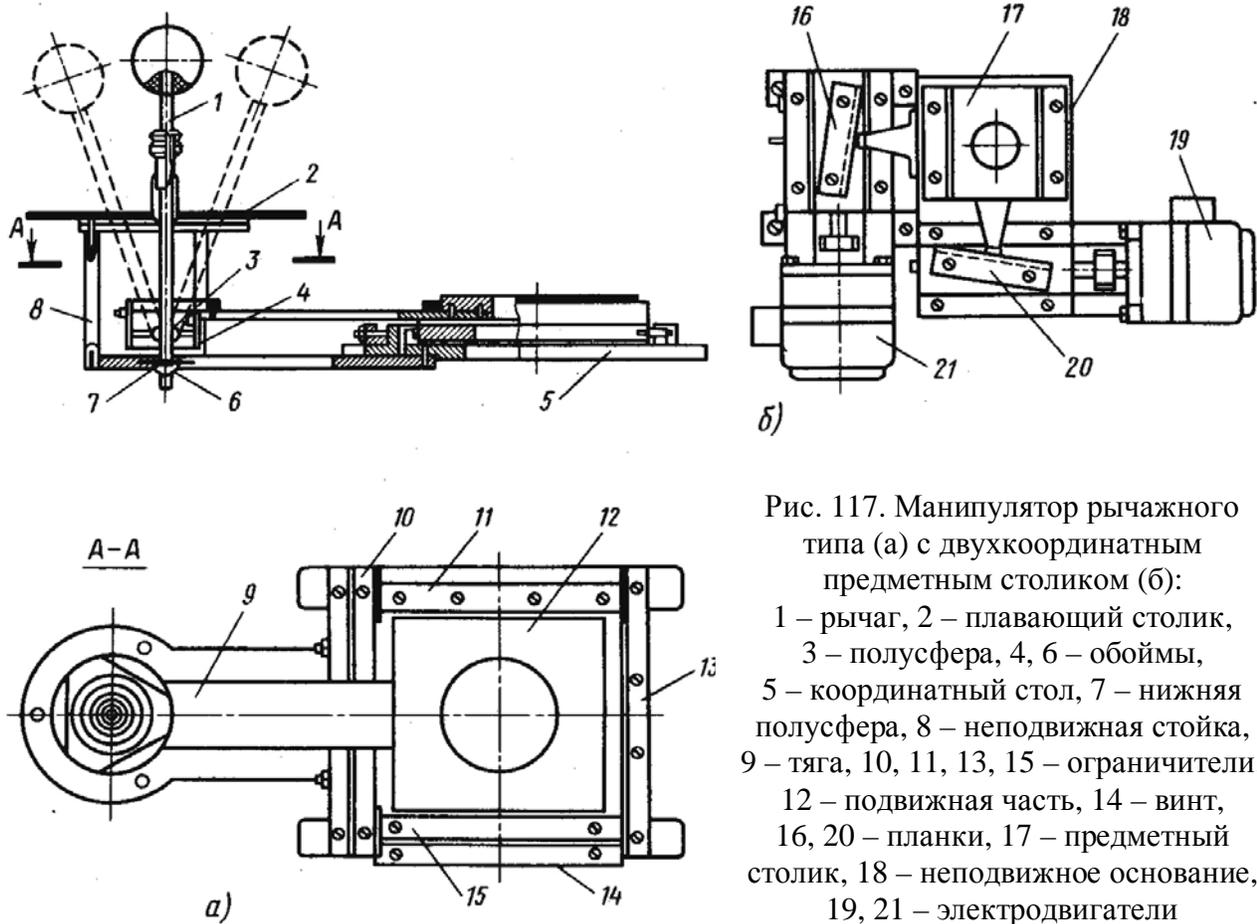


Рис. 117. Манипулятор рычажного типа (а) с двухкоординатным предметным столиком (б):  
 1 – рычаг, 2 – плавающий столик, 3 – полусфера, 4, 6 – обоймы, 5 – координатный стол, 7 – нижняя полусфера, 8 – неподвижная стойка, 9 – тяга, 10, 11, 13, 15 – ограничители, 12 – подвижная часть, 14 – винт, 16, 20 – планки, 17 – предметный столик, 18 – неподвижное основание, 19, 21 – электродвигатели

Основным способом сварки микросварки является ультразвуковая микросварка, обеспечивающая соединение между контактными площадками на кристалле и площадками на выводах корпуса с помощью алюминиевой проволоки диаметром 10–30 мкм.

Цикл образования электрического контакта состоит из следующих переходов (рис. 118):

I – инструмент 1 с поданной через его отверстие проволокой 2 устанавливается над контактной площадкой кристалла;

II – происходит сварка проволоки с контактной площадкой 3;

III – инструмент перемещается ко второй контактной площадке 4, свободно вытягивая проволоку через свой канал;

IV – инструмент опускается на вторую контактную площадку 4, формируя проволочную петлю, и обеспечивает сварку;

V – производится обрыв проволоки;

VI – подъем инструмента вверх с одновременной подачей проволоки для следующей сварки.

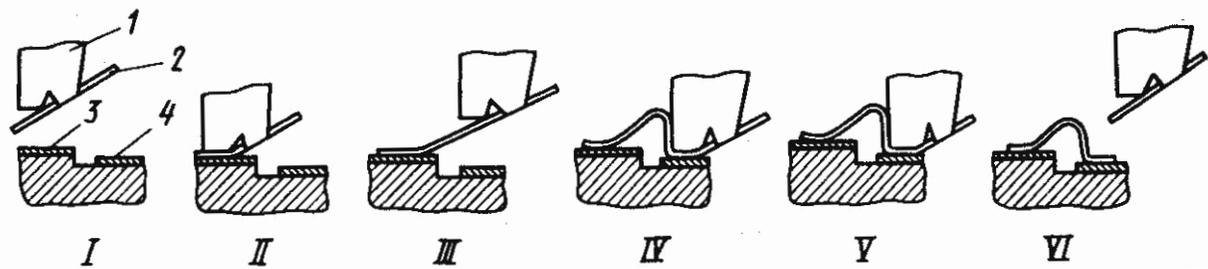


Рис. 118. Последовательность переходов ультразвуковой микросварки при монтаже соединений в полупроводниковых приборах

Так как разного типа интегральных микросхем выпускается несколько миллиардов штук в год, то роботизация сборки дает большой экономический эффект. Для решения этой задачи создаются репрограммируемые и адаптивные роботы. Репрограммируемый робот оснащают прецизионными шаговыми двигателями, обеспечивая совмещение контактных площадок с инструментом и оперативный контроль качества.

Системы управления репрограммируемых роботов управляют всеми исполнительными механизмами, включая автоматическую загрузку-выгрузку корпусов. Функции рабочего-оператора сводятся к занесению эталонной программы позиционирования и однократному выполнению операции коррекции реперных точек в случае неточной посадки кристалла в данном корпусе. На остальных точках совмещение происходит автоматически. Обслуживая два поста одновременно, оператор обеспечивает производительность до 20 тысяч сварок в час. Качество соединений обеспечивается программой, которая отслеживает энергетические характеристики процесса на каждой точке.



Манипулятор вертикального перемещения сварочной головки 1 имеет шаговый привод 2. Манипулятор позиционирования столика 3 имеет шаговые приводы 4 и 5, которые обеспечивают перемещение по осям X и Y. Поворот вокруг оси Z на заданный угол осуществляется приводом 6.

Совместная работа манипуляторов обеспечивает разварку по следующей схеме взаимодействия. После определения координат кристалла в корпусе прибора манипулятор позиционирования столика совмещает первую контактную площадку с инструментом, причем угол поворота выбирается так, чтобы перемещение ко второй контактной площадке могло быть в направлении вытягивания проволоки через инструмент. После отработки совмещения инструмента с контактной площадкой включается вертикальный манипулятор, обеспечивающий опускание сварочной головки в место сварки. После сварки на первой контактной площадке одновременное перемещение манипулятора столика по оси Y и вертикального манипулятора по оси Z обеспечивает формирование петли необходимого размера и конфигурации. После сварки на второй контактной площадке и обрыва проволоки вертикальный манипулятор поднимает сварочную головку, и манипулятор столика по координатам X, Y с поворотом на заданный угол перемещает изделие к следующему месту сварки.

Использование средств «технического зрения» позволяет провести подкорректировку каждой последующей сварной точки по положению в поле зрения реальной контактной площадки.

Адаптивный контроль технологических режимов основан на принципах саморегулирования процесса, на использовании управления по математическим моделям процесса, на неразрушающем контроле каждого соединения. Неразрушающий контроль основан на принципе нагружения образовавшейся петли специальным крючком с нагрузкой, меньшей, чем допустимая нагрузка на разрушение данного соединения. Если сварка выполнена некачественно и происходит обрыв петли при пробном нагружении, то ЭВМ, встроенная в робот, останавливает процесс и сигнализирует наладчику о причине остановки.

Рассмотренные микросварочные роботы типа ОЗУН нашли широкое промышленное применение, повышая в десятки раз производительность и улучшая качество производства микроэлектронных приборов. Класс адаптивных роботов составляет основу для создания гибких автоматизированных производств (ГАП) сборки микроэлектронных приборов. Для этого роботы и оснащены манипуляторами для подачи микроприборов в зону обработки и складами продукции, что позволяет им работать в течение смены без участия человека.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы основные стадии образования соединения при сварке давлением?
2. Каковы основные факторы, определяющие классификацию способов сварки давлением?
3. Какие способы относятся к способам сварки давлением?
4. Какие виды соединений используются при сборке электронных приборов способами сварки давлением?
5. Какие функции выполняет технологическая оснастка при сварке давлением?
6. Каковы особенности сварки давлением материалов электронных приборов?
7. Какие основные узлы входят в состав оборудования для сварки давлением?
8. В каких случаях целесообразно использовать автоматическое оборудование для сварки?

### 4.1. Образование соединений при пайке

Пайка – технологический процесс создания (получения) неразъемного соединения материалов в твердом состоянии с помощью припоев, которые при расплавлении смачивают паяемые поверхности, заполняют капиллярный зазор между ними и образуют паяный шов при кристаллизации. Припой – это металлы и сплавы, имеющие более низкую температуру плавления, вводимые между соединяемыми основными материалами.

На рис. 120 показана конструкция паяного соединения.

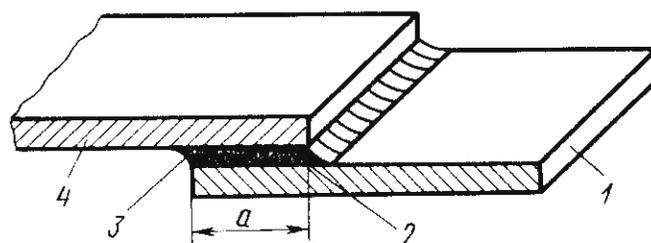


Рис. 120. Конструкция паяного соединения:

- 1, 4 – соединяемые основные материалы, 2 – паяный шов, 3 – галтель (плавный переход припоя, вышедшего за пределы соединяемых кромок);  
«а» – величина нахлестки паяного шва

Процесс образования паяного соединения состоит из следующих стадий: нагрев соединяемых деталей до температуры плавления припоя (рис. 121, а); плавление припоя (рис. 121, б); смачивание, растекание и заполнение капиллярного зазора жидким припоем (рис. 121, в); растворение основного металла в жидком припое и взаимная диффузия компонентов основного металла и припоя (рис. 121, г); охлаждение и кристаллизация паяного шва (рис. 121, д).

Практически все перечисленные стадии процесса пайки перекрываются, и окончание одной стадии трудно отделить от начала другой. Кроме того, эти стадии сопровождаются рядом других процессов (восстановление или разрушение пленки окислов, поглощение и выделение газов соединяемыми

материалами и припоем, отжиг и рекристаллизация материала соединяемых деталей, химическое взаимодействие материалов с окружающей средой, возникновение или снятие внутренних напряжений в деталях и т. д.).

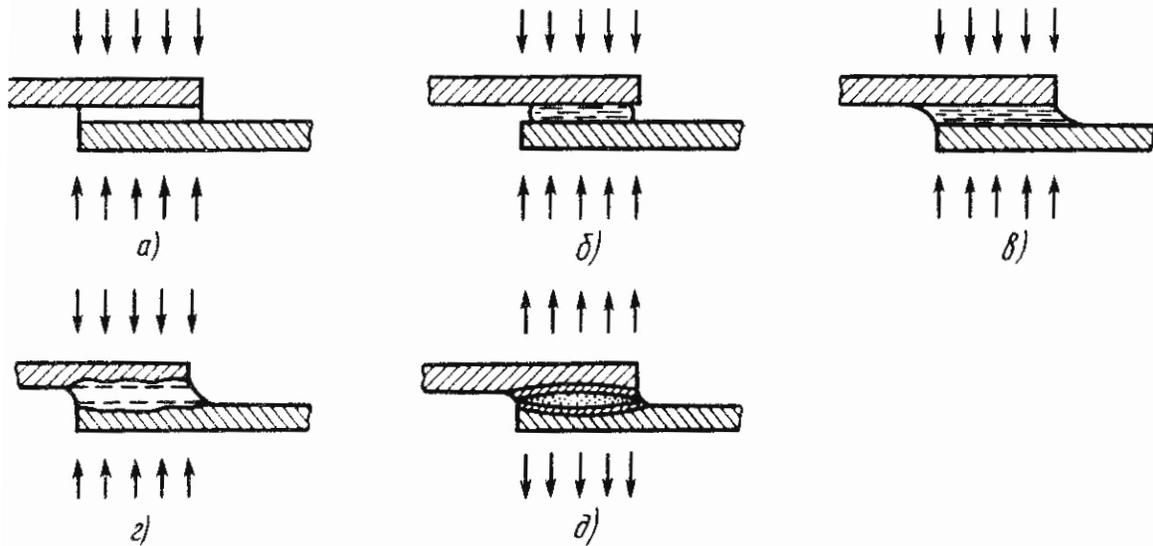


Рис. 121. Основные стадии образования паяного соединения (стрелками показано направление потоков теплоты)

Если каким-либо образом на поверхность холодного материала нанести расплавленный припой, то он быстро затвердеет и никакой связи его с соединяемым материалом не произойдет. Поэтому зона пайки или паяемое изделие целиком должны быть прогреты до температуры несколько выше температуры плавления припоя.

Расплавленный припой должен растечься по поверхностям соединяемых кромок, а это возможно лишь при хорошей смачиваемости их поверхности припоем.

Капля жидкого металла, попадая на поверхность нагретого твердого тела, может растекаться слоем жидкости (рис. 122, а), может сплющиваться, сохраняя форму капли (рис. 122,б), может занимать промежуточное положение, частично растекаясь на поверхности (рис. 122, в).

Смачиваемостью называется первая стадия физико-химического взаимодействия жидкости с поверхностью твердого тела, результатом которого

является растекание жидкости тонким слоем. Физическая сущность процесса смачивания состоит в том, что поверхность контакта твердого тела с атмосферой замещается поверхностью контакта с жидкостью.

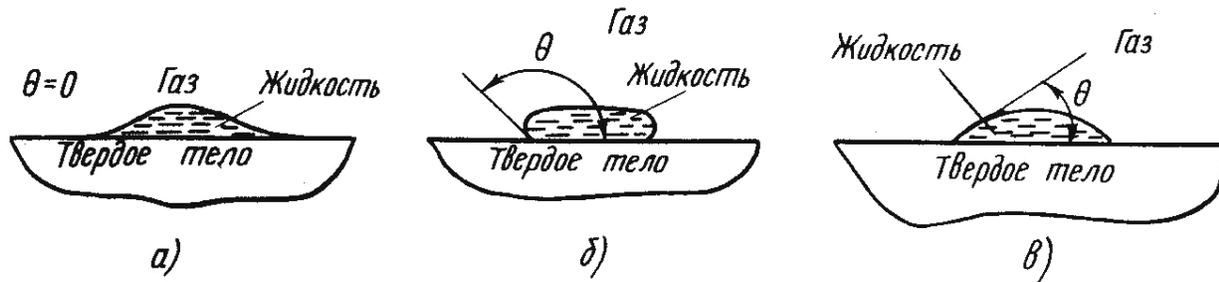


Рис. 122. Положение капли жидкости на поверхности твердого тела: а – полное смачивание, б – несмачивание, в – ограниченное смачивание

Количественным критерием смачиваемости является **краевой угол смачивания** (см. рис. 122), который определяется как

$$\cos\theta = (\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}) / \sigma_{ЖГ}$$

где  $\sigma_{ТГ}$  – поверхностное натяжение твердого тела на границе с газовой средой;  $\sigma_{ТЖ}$  – поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом;  $\sigma_{ЖГ}$  – поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой.

Различают следующие степени смачивания:

при  $\cos\theta = 1$ ,  $\theta = 0$  – полное смачивание поверхности твердого тела;

при  $1 > \cos\theta > 0$ ,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  – ограниченное смачивание (обычно  $\theta < 30\text{--}40^\circ$ );

при  $1 < \cos\theta < 0$ ,  $180^\circ > \theta > 90^\circ$  – несмачивание (капля собирается в шарик).

На степень смачивания оказывают влияние: характер взаимодействия в контакте соединяемого материала с припоем; наличие флюса и состав окружающей газовой среды (водород, инертные газы, вакуум и т. д.); состояние паяемых поверхностей (вид предварительной обработки, отсутствие окисных пленок, жировых загрязнений и т. д.); режим пайки.

Наличие окисной пленки на поверхностях соединяемых материалов и расплавленного припоя (за исключением спаев стекла с металлом) препятствует смачиванию. Для удаления пленки окислов в процессе пайки применяют флюсы, контролируемые газовые среды, вакуум и другие средства. Наиболее широко из этих средств используются флюсы, известные еще в древности.

Перед пайкой или в процессе пайки на соединяемые поверхности деталей и припой наносят флюс в виде водных, спиртовых или глицериновых растворов, паст, в порошкообразном виде. В определенном интервале температур флюс проявляет свое действие. Он обволакивает расплавленный припой и нагретые кромки деталей тонким слоем (рис. 123). При этом поверхности контакта твердого тела и расплавленного припоя с атмосферой замещаются поверхностью контакта с жидким флюсом. Флюс, взаимодействуя с окисной пленкой, обеспечивает протекание физико-химических процессов между припоем и соединяемыми материалами, начальной стадией которых является смачивание. В процессе воздействия флюса происходят также вытеснение флюса растекающимся припоем и защита места пайки от окисления.

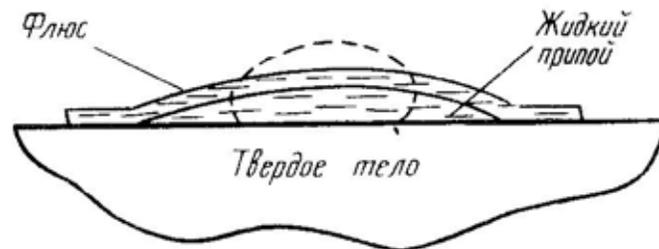


Рис. 123. Положение капли жидкого припоя на поверхности нагретого твердого тела при наличии флюса (пунктиром показано положение капли при отсутствии флюса)

Кроме флюсов для удаления окисных пленок с поверхности соединяемых кромок используется нагрев деталей в контролируемой атмосфере или в вакууме.

При этом происходят следующие процессы: диссоциация или возгонка окислов при нагреве в вакууме; их восстановление при нагреве в активных

газовых средах (например, в среде водорода); растворение окислов в материале соединяемых кромок при нагреве деталей в бескислородной атмосфере; их восстановление компонентами основного металла или расплавленного припоя.

Для получения качественного паяного соединения необходимо, чтобы припой хорошо растекался по поверхностям соединяемых материалов.

Под растекаемостью понимают свойство жидких металлов или сплавов (припоев) распространяться по поверхности или в зазоре соединяемых материалов, находящихся в твердом состоянии.

В условиях пайки на процесс растекания помимо смачиваемости оказывают влияние: жидкотекучесть, вязкость, поверхностное натяжение жидкости, шероховатость поверхности твердых металлов и другие факторы.

Количественно растекаемость припоев по поверхности металлов можно оценить коэффициентом  $K_p$ , равным отношению площади  $S_0$  припоя до пайки к площади  $S$ , занятой припоем после пайки ( $K_p = S_0/S$ ). Чем меньше значение  $K_p$ , тем лучше растекается припой по заданному металлу. Определение растекаемости припоев производится следующим образом: на середину диска из того или иного металла укладывается таблетка припоя диаметром 8 мм и толщиной 0,3 мм, которая в строго горизонтальном положении нагревается до расплавления, а затем охлаждается.

Нагрев производится со скоростью, близкой к скорости нагрева в реальных условиях пайки. Температура нагрева и время выдержки устанавливаются также аналогичными тем, которые наблюдаются при пайке. На охлажденном образце замеряется площадь, занятая припоем после пайки (рис. 124), и по указанной ранее формуле определяется значение  $K_p$ .

Для образования спая между основным металлом и припоем в отдельных случаях достаточно смачивания основного металла расплавом припоя.

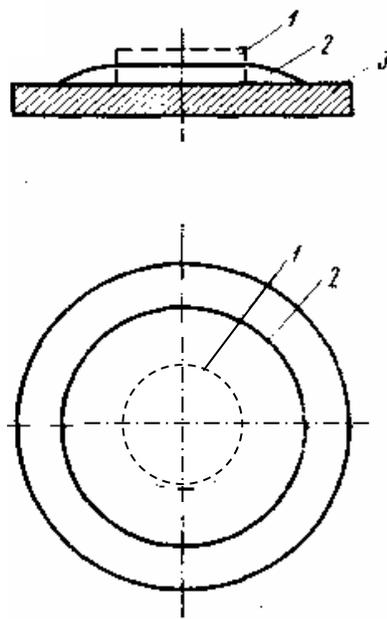


Рис. 124. Определение растекания припоя по поверхности паяемого металла:  
 1 – таблетка припоя до нагрева; 2 – растекшаяся капля припоя после нагрева; 3 – диск

Однако высокие скорости взаимодействия на границе между твердой и жидкой фазами, а также сравнительно их длительное взаимодействие, обусловленное технологией пайки, не позволяют в обычных условиях завершить процесс взаимодействия на стадии смачивания и растекания припоя. Уже в момент заполнения капиллярного зазора происходит интенсивное растворение основного металла в расплаве припоя и диффузия его в жидкости. Процесс растворения представляет собой разрушение кристаллической решетки твердого металла и переход его в жидкий металл. Внешним проявлением растворения основного металла в припое является смещение границы контакта твердой и жидкой фаз в сторону соединяемого материала (см. рис. 121, г).

Интенсивность растворения основного металла в расплаве припоя увеличивается с повышением температуры и длительности контакта твердой и жидкой фаз. Способность расплавленных припоев интенсивно растворять основной металл является отрицательным свойством, так как ухудшает смачивание и растекание припоя, вызывая хрупкость в соединении и появление эрозии основного материала.

Помимо растворения в системе «расплавленный припой–основной материал» протекают процессы диффузии. Диффузией в общем случае называют проникновение атомов одного вещества в другое.

Диффузия при пайке играет большую роль в процессе формирования паяного соединения. Смачивание, капиллярное течение, образование переходного слоя между основным металлом и металлом шва, выравнивание состава шва связаны с диффузией. В условиях пайки протекает диффузия компонента припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя. Диффузия атомов может проходить по поверхности (поверхностная диффузия), по границам зерен (граничная диффузия) и в объеме зерен (объемная диффузия). Схема диффузии по поверхности, по границам зерен и в объеме зерен представлена на рис. 125. Преобладающая роль диффузии по поверхности и границам зерен отрицательно сказывается на прочности паяных соединений.

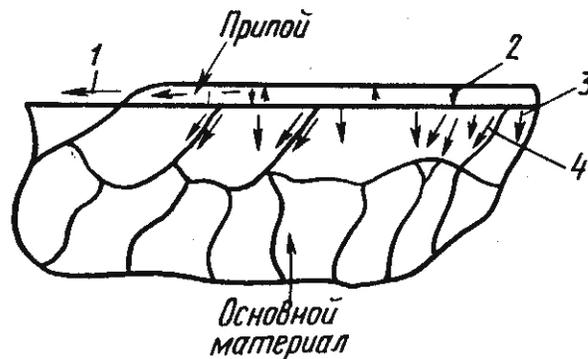


Рис. 125. Схема диффузионных потоков при взаимодействии припоя с основным металлом:  
1 – поверхностная диффузия, 2 – диффузия основного металла в припой, 3 – диффузия припоя в объеме зерна, 4 – диффузия по границам зерен

Интенсивность протекания процесса диффузии при пайке зависит от многих факторов: от состояния соединяемых материалов (в материалах, свободных от внутренних напряжений, диффузия протекает значительно медленнее); от размера зерна основного металла (чем мельче зерно, тем быстрее протекает диффузия); от температуры пайки; от времени выдержки при температуре пайки и т. д.

Заключительной стадией образования паяного соединения является кристаллизация, которая фиксирует процессы взаимодействия между основным металлом и расплавом припоя на том или ином уровне их развития. При кристаллизации происходит затвердевание тонкой прослойки расплавленного припоя, находящегося в зазоре, образованного поверхностями соединяемых деталей.

При температуре пайки в результате взаимодействия основного металла и расплавленного припоя в шве образуется сплав, отличающийся по составу и свойствам и от основного металла, и от припоя. Обычно он кристаллизуется в виде отдельных зон. При этом ближе к основному металлу образуются зоны, обогащенные компонентами основного металла, ближе к центру шва - компонентами припоя. Кристаллизация металла шва начинается в первую очередь на поверхности основного металла, кристаллиты которого являются как бы основой для роста кристаллитов припоя. Помимо этого центры кристаллизации могут возникать и в жидком металле шва.

В процессе кристаллизации в паяном шве могут фиксироваться:

- твердые растворы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться без нарушения однородности сплава;

- эвтектические структуры – механическая смесь твердых растворов компонентов, образующихся при затвердевании жидкого раствора и имеющих наиболее низкую температуру плавления по сравнению со смесями тех же веществ, взятых в других соотношениях;

- интерметаллические соединения – химические соединения в металлических сплавах.

Твердые растворы образуют металлы, имеющие общий тип кристаллической решетки и очень близкие значения межатомных расстояний. Твердые растворы являются желательными структурами, так как при этом обеспечивается высокая прочность и пластичность паяного соединения.

Эвтектические структуры в паяных швах возникают при пайке припоями эвтектического состава или образуются в результате взаимодействия припоя с

паяемым металлом. Эвтектические структуры возникают, если сходство металлов недостаточно для образования твердого раствора, а разница в свойствах и строении невелика, чтобы образовать интерметаллические соединения. Припой эвтектического свойства обладает высокой жидкотекучестью, и пайка с применением их протекает наиболее легко, однако прочность паяных швов при этом ниже, чем в случае образования твердых растворов.

Интерметаллические соединения образуют металлы преимущественно в том случае, если в параметрах их кристаллических решеток и в химических свойствах имеется большая разница. Интерметаллические соединения могут располагаться в виде одного или нескольких слоев по границе «основной металл–припой» или быть распределены в шве в виде включений. Качество паяного шва при образовании интерметаллических соединений между взаимодействующими металлами, как правило, будет ниже, так как эти соединения обычно имеют высокую хрупкость.

В результате протекания всех стадий процесса пайки между соединяемыми деталями возникает паяное соединение, схема строения которого представлена на рис. 126.

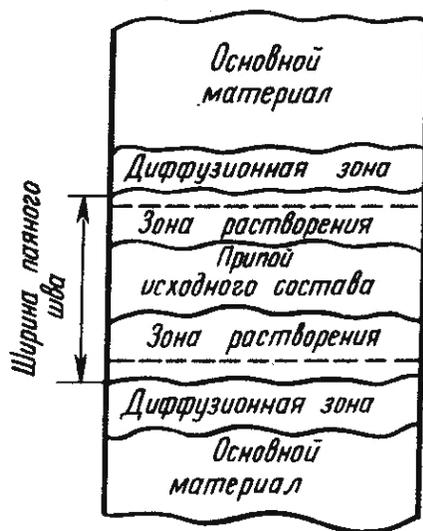


Рис. 126. Схема строения паяного соединения после кристаллизации (пунктиром показано первоначальное положение соединяемых кромок)

Исходя из представленной схемы, можно дать определения основным элементам соединения.

Паяное соединение (элемент соединяемых деталей) включает в себя паяный шов и прилегающие к нему участки основного металла.

Паяный шов – элемент паяного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации жидкой фазы.

Диффузионная зона – граничащий с паяным швом слой основного металла, образовавшийся в результате диффузии компонентов припоя в основной металл.

Рассмотренный тип образующегося спая носит название *растворно-диффузионный спай*. Характер диффузии и растворение в зоне спая зависят от типа соединяемых материалов и припоя, от температуры и времени их взаимодействия, поэтому в классификации спаев различают четыре основных типа:

1. *Растворно-диффузионный спай* – наиболее широко встречается в практике (структура и схема его образования подробно изложены ранее).

2. *Бездиффузионный спай* – образуется при использовании припоев с низкой температурой плавления, если температура нагрева под пайку близка к температуре плавления припоя, а время пайки ограничено временем, необходимым на смачивание и растекание. В этом случае ни заметного растворения основного металла в припое, ни диффузии припоя в основной металл практически не происходит. Соединение определяется прочностью сцепления припоя с поверхностью основного металла, а отсутствие диффузии практически не нарушает структуру паяемого элемента. Такой вид спая целесообразен при пайке полупроводниковых кристаллов на подложку мягкими припоями.

3. *Контактно-реакционный спай* – образуется в стыке двух материалов без припоя, если они способны образовать сплав с более низкой температурой плавления, чем температура плавления каждого из них. Например, кремний, имеющий температуру плавления 1423 °С, и золото с температурой плавления

1063 °С образуют эвтектический сплав, содержащий примерно 94 % золота с температурой плавления 370 °С. Поэтому, если кристалл кремния нагреть в контакте с золотой пленкой, то за счет взаимной диффузии образуется жидкая прослойка, которая выполнит роль припоя. Этот вид спая используют при посадке кристаллов полупроводниковых приборов в золоченые корпуса при температуре паяния 400 °С и времени образования спая ~ 1 с.

4. *Диспергированный спай* – образуется при пайке металлов с высокой температурой плавления. В этом случае наблюдается диффузия припоя в основной металл с образованием диффузионной зоны, но вместо растворения основного металла в припое происходит его размывание с отрывом мелкодисперсных частиц, которые остаются в припое во взвешенном твердом состоянии и после образования спая.

## **4.2. Классификация способов пайки**

Характер нагрева, способ ввода тепловой энергии, применяемые источники нагрева являются наиболее существенными признаками для процессов пайки. В табл. 5 приведена классификация способов пайки на основе вышеуказанных признаков. В процессе пайки может осуществляться *общий разогрев*, когда до температуры пайки нагревается все изделие, и *местный нагрев*, когда нагревается более или менее узкий участок изделия, прилегающий к месту соединения.

Тепловая энергия в зону соединения может быть введена за счет теплопроводности твердого тела, жидкости, газа, излучением различных видов и электрическим током. Следует отметить, что для многих способов пайки характерно преобразование одного вида энергии в другой, например электрической в тепловую и т. д. По разновидностям технологических приемов нагрева, связанных с различными источниками нагрева, пайка может быть разделена на большое число способов. В табл. 5 отражены способы нагрева при пайке, нашедшие в настоящее время применение в отечественной и зарубежной технике.

## Классификация способов нагрева при пайке

Характер нагрева	Способ ввода тепловой энергии	Источники нагрева
Локальный (места пайки)	За счет теплопроводности нагретым инструментом	Электросопротивление
	Потоком нагретого газа	Электросопротивление, плазменная горелка, газовая горелка
	Потоком нагретой жидкости	Волна припоя, струя припоя
	Концентрированными потоками энергии	Электронный луч, лазерное излучение, световой поток мощных ламп, инфракрасное излучение, токи высокой частоты, электросопротивление
Общий (соединяемых деталей)	За счет теплопроводности массы нагретой жидкости	Расплав припоя, соляная ванна
	Распределенными потоками энергии, теплопроводностью и излучением	Электросопротивление, токи высокой частоты

Каждый из указанных способов нагрева в свою очередь может быть разделен и по другим техническим признакам. Например, пайка нагретым инструментом может осуществляться с постоянным или импульсным нагревом, с наложением на инструмент механических колебаний ультразвуковой (50–70 кГц) или промышленной частоты (50 Гц)

Традиционно пайку делят на *низкотемпературную*, выполняемую припоями с температурой плавления до 400–500 °С, и *высокотемпературную*, выполняемую припоями с более высокой температурой плавления.

Низкотемпературная пайка применяется в основном при изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем, а также для соединения немногочисленных деталей внешней арматуры электровакуумных приборов. При изготовлении внутренней арматуры и сборке электровакуумных приборов (в основном СВЧ-приборов типа магнетронов, клистронов, мощных генераторных ламп, ламп обратной волны и др.) применяется высокотемпературная пайка.

Способы пайки могут быть также классифицированы по такому признаку, как среда, в которой происходит процесс пайки. По этому признаку способы пайки можно разделить на пайку на воздухе с использованием флюсов, в соляных ваннах, в контролируемой атмосфере или в вакууме.

По степени механизации и автоматизации способы пайки подразделяются на ручные, механизированные и автоматизированные.

### **4.3. Характеристика источников нагрева при пайке**

Локальный нагрев места пайки. Пайка нагретым инструментом (с использованием паяльника). Источником теплоты является твердое тело в виде постоянно (рис. 127) или импульсно (рис. 128) нагреваемого инструмента. При постоянном нагреве инструмент имеет, как правило, общий разогрев, обеспечивающий необходимый запас теплоты, аккумулируемой во всей массе инструмента (рис. 129). При импульсном нагреве разогрев и охлаждение места пайки и самого инструмента осуществляются в течение каждого цикла пайки. Необходимый тепловой режим пайки обеспечивают следующие характеристики паяльника: температура рабочего конца паяльного жала  $T_{п}$ , стабильность этой температуры, запас теплоты в паяльном жале и т. д. Температура рабочего конца жала задается обычно на 30–100° выше температуры плавления припоя.

Пайка нагретым газом. В качестве теплоносителя используют нагретые газы: аргон, водород, азот или смесь газов. В большинстве случаев стремятся исключить из состава теплоносителя кислород, окисляющий металл в процессе пайки.

При использовании электрических нагревателей (рис. 130) газ под избыточным давлением направляется в устройство нагрева и затем поступает к соплу рабочей головки. Для нагрева газа чаще всего используются электронагревательные элементы, устанавливаемые вокруг трубопроводов или в специальных камерах, по которым пропускают теплоноситель.

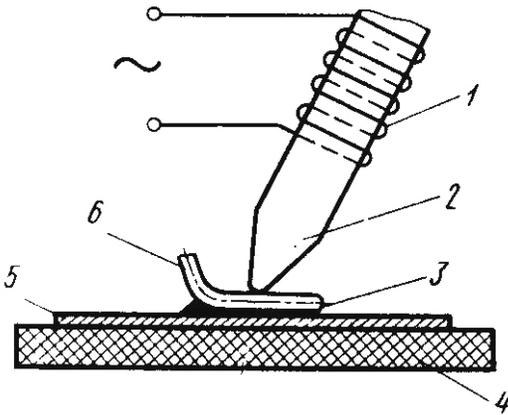


Рис. 127. Схема нагрева места пайки нагретым инструментом (паяльником): 1 – нагреватель, 2 – жало паяльника, 3 – припой, 4 – подложка, 5 – контактная площадка, 6 – проводник

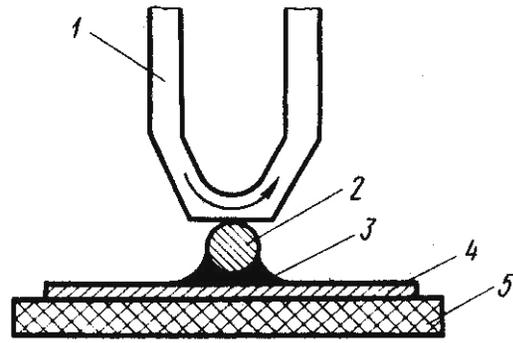


Рис. 128. Схема нагрева импульсно-нагреваемым инструментом: 1 – паяльник, 2 – проводник, 3 – припой, 4 – контактная площадка, 5 – подложка

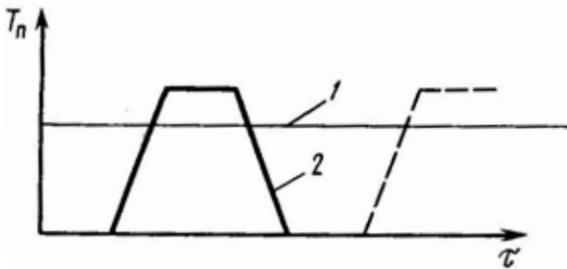


Рис. 129. Температурный режим рабочего конца паяльника: 1 – при постоянном нагреве, 2 – при импульсном нагреве ( $\tau$  – время)

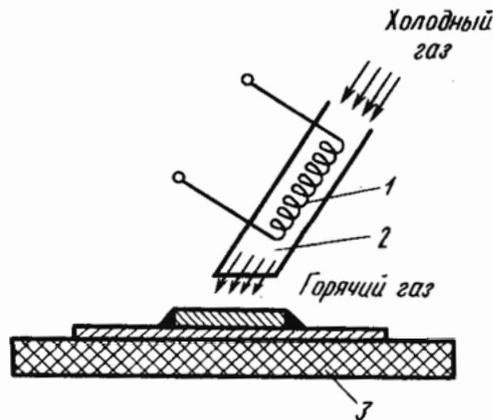


Рис. 130. Схема нагрева места пайки нагретым газом: 1 – нагреватель, 2 – сопло, 3 – паяемое изделие

В зоне выхода горячего газа располагается паяемое изделие. Тепловой режим пайки обеспечивается за счет изменения расхода газа и температуры нагревателя, а также скоростью перемещения паяемого изделия относительно паяльной головки.

Возможен также нагрев теплоносителя газопламенными горелками. Для этого могут быть использованы миниатюрные кислородно-водородные горелки (рис. 131), обеспечивающие весьма узкое высокотемпературное пламя. Последнее позволяет получить в течение короткого времени высокую

температуру в местах пайки без повреждения термочувствительных элементов изделия.

Можно получить концентрированный нагретый поток газа, нагревая его в микроплазменных горелках (рис. 132). В этом случае используется косвенная плазменная дуга. Паяемое изделие при этом электрически не связано с микроплазменной горелкой. Электрическая дуга, горящая между вольфрамовым электродом и водоохлаждаемым соплом, нагревает теплообразующий газ, непрерывно подаваемый через отверстие сопла малого диаметра. На выходе из сопла создается поток высокотемпературной плазмы, направляемый на изделие. Обычно в качестве плазмо-образующего газа используется аргон. Для защиты места пайки от окисления во внешнее керамическое сопло подается защитный газ (аргон, гелий или смесь аргона с гелием или водородом).

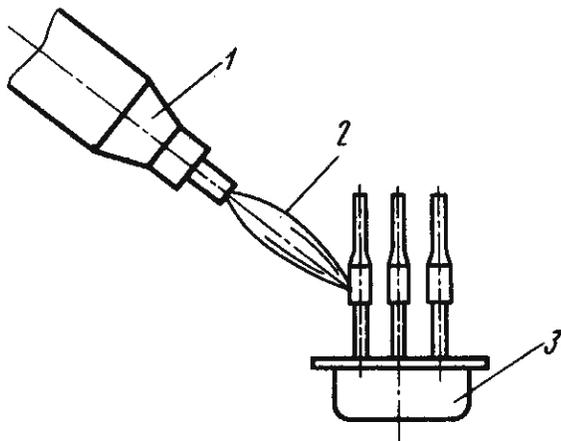


Рис. 131. Схема пайки пламенем газовой горелки: 1 – газовая горелка, 2 – пламя, 3 – паяемое изделие

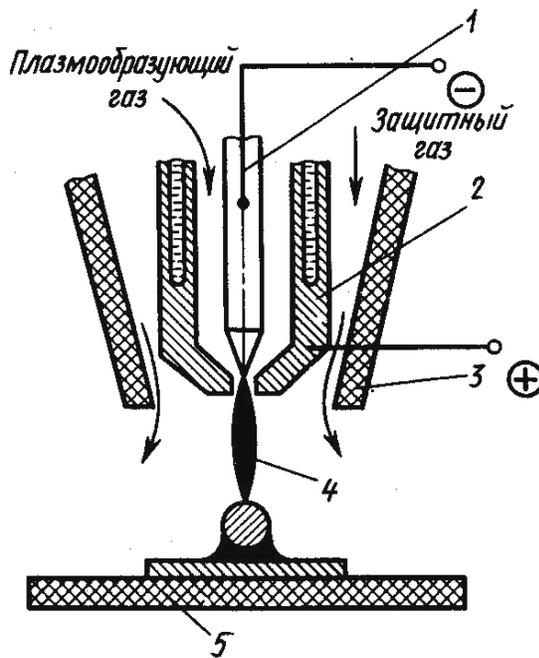


Рис. 132. Схема нагрева места пайки плазменной струей (косвенной дугой): 1 – вольфрамовый электрод, 2 – водоохлаждаемый анод, 3 – керамическое сопло, 4 – плазменная струя, 5 – соединяемые детали

При пайке с помощью потока горячего газа последний необходимо подавать с большой скоростью, чтобы компенсировать потери теплоты из-за его небольшой теплоемкости и ограничивать время нагрева для исключения повреждения чувствительных к перегреву материалов и компонентов изделия.

Пайка потоками нагретой жидкости. В качестве теплоносителя используются потоки непрерывно обновляемой жидкой фазы, в роли которой наиболее часто выступает расплав припоя.

По характеру течения расплава различают пайку волной и струей припоя. Пайка волной припоя (рис. 133, а) заключается в следующем: подаваемый принудительно вверх насосом жидкий металл образует над зеркалом припоя возвышение – стоячую волну расплава, с верхней кромкой которой входят в соприкосновение движущиеся над припоем соединяемые детали.

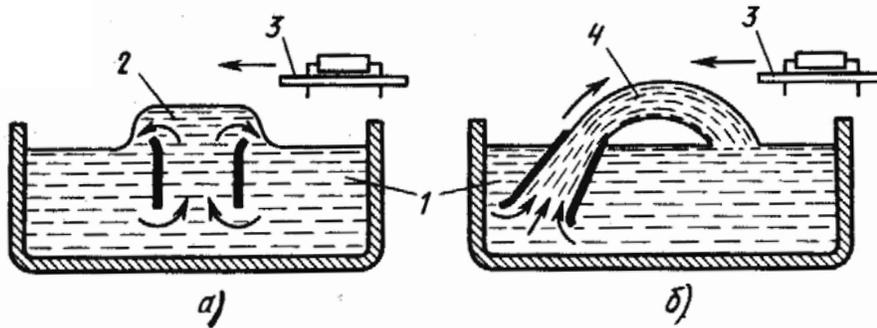


Рис. 133. Схема пайки волной (а) и струей (б) припоя:  
1 – ванна с припоем, 2 – волна припоя, 3 – соединяемые детали,  
4 – струя припоя

При пайке струей припоя (рис. 133, б) на место соединения подается направленная струя жидкого металла. Струя припоя может быть выполнена с непрерывным одинаковым профилем по всей линии пайки или состоять из множества струй, выходящих из круглых отверстий специального устройства.

Струя припоя с непрерывным профилем и волна припоя, выполняя одни и те же задачи, различаются конфигурацией потока припоя. Для волновой пайки характерно перемещение припоя в зоне соприкосновения с местом пайки только под действием силы тяжести, в то время как для струйной пайки используется направленный непосредственно на место соединения поток

расплава припоя. Поэтому скорости движения припоя при пайке струей значительно больше, чем при пайке волной припоя, а размеры струи непосредственно меньше размеров волн припоя. Последнее обстоятельство позволяет существенно ограничить массу горячего металла, находящуюся в соприкосновении с соединяемыми кромками в каждый момент времени пайки.

Способы пайки волной и струей припоя получили наибольшее распространение при выполнении групповых соединений (например, при пайке печатных плат). Характерной особенностью этих способов является специфическое дозирование припоя, которое происходит всегда в процессе пайки по мере касания расплавом паяемых изделий.

Пайка концентрированными потоками энергии. Пайка сфокусированными лучами в оптическом или инфракрасном диапазоне волн осуществляется за счет энергии мощных дуговых ламп. Оптические системы для фокусировки лучей выполняются либо на основе собирающих линз (рис. 134, а), либо с помощью различного рода отражающих зеркал (рефлекторов). При этом предпочтение отдается системам с рефлекторами (рис. 134, б), так как собирающие линзы, изготовленные из стекла, поглощают инфракрасные лучи с длиной волн, равной и более 2 мкм. Для повышения отражающих свойств рефлекторов их рабочие поверхности тщательно полируются, покрываются никелем, золотом или серебром. Конструкции рефлекторов могут быть самые разнообразные. Однако во всех схемах устройств в одной фокусной точке ( $f_1$ ) помещается источник излучения, в другой ( $f_2$ ) – место пайки.

Пайка излучением лазера представляет собой одну из разновидностей пайки излучением. Узконаправленный монохроматичный световой поток лазера (см. рис. 70) фокусируется оптической системой на поверхности материала, обеспечивая локальность и высокую скорость нагрева. Это позволяет выполнять соединения в непосредственной близости от термочувствительных элементов приборов.

Пайка электронным лучом производится в вакуумных камерах. Электронный луч (поток электронов) формируется и фокусируется на

поверхности деталей с помощью электромагнитной системы (см. рис. 72). Тепло в соединяемых деталях выделяется при бомбардировке их сфокусированным потоком электронов.

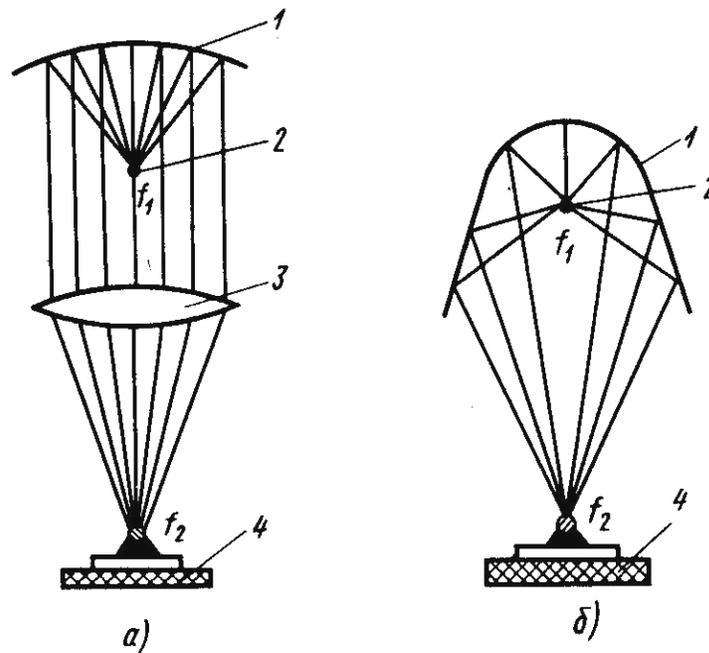


Рис. 134. Схема нагрева при пайке лучистой энергией:  
а – фокусировка оптической системой, б – фокусировка эллиптическим зеркалом;  
1 – зеркало, 2 – источник излучения, 3 – линза, 4 – соединяемые детали

Нагрев в данном случае требуется только для того, чтобы расплавить припой, предварительно нанесенный на паяемые детали. Электронный луч, так же как и лазерный, характеризуется высоким значением удельной энергии, обеспечивает быстроту и локальность нагрева, позволяет проводить точное регулирование и управление тепловой энергией.

Отличительной чертой способов пайки излучением лазера и электронным лучом является возможность получения паяных соединений без контакта с инструментом, что позволяет исключить загрязнения мест пайки. Немаловажным фактором при пайке излучением лазера является возможность вводить энергию через прозрачные среды, т. е. осуществлять пайку в контролируемой газовой атмосфере или в вакууме.

При электроконтактной пайке сопротивлением используется джоулева теплота, которая выделяется при прохождении тока через соединяемые детали

или через одну из них. Электрический ток при этом может подводиться с двух сторон деталей (рис. 135, а) либо с одной (рис. 135, б). Чтобы обеспечить надежный электрический контакт между электродами и деталями, так же как и при электроконтактной сварке, прикладывают усилие  $P$ . Силу тока и длительность его протекания подбирают так, чтобы расплавить припой и прогреть соединяемые кромки, не перегревая близлежащие участки изделия, чувствительные к перегреву.

В схеме нагрева соединяемых деталей при индукционной пайке деталь помещают в магнитное поле индуктора, состоящего из одного или нескольких витков медной трубки, через которую пропускается охлаждающая вода (рис. 136). В результате взаимодействия переменного магнитного поля и материала детали в ней наводятся вихревые токи (токи Фуко), за счет которых и происходит нагрев.

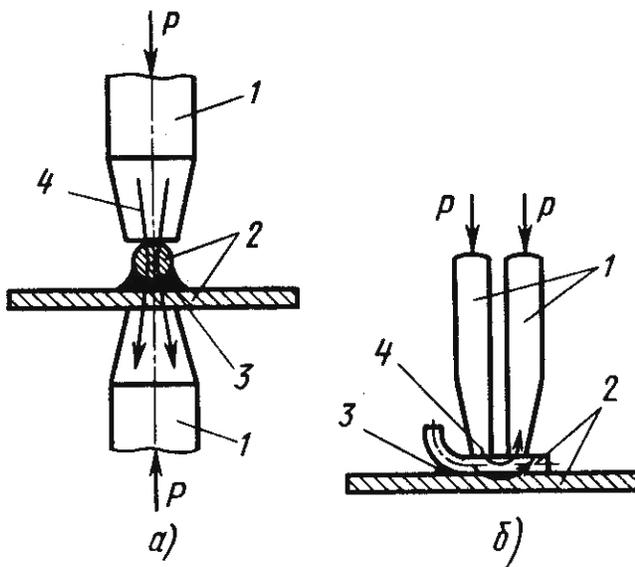


Рис. 135. Схема нагрева соединяемых деталей при пайке электросопротивлением:  
 а – двусторонний подвод тока,  
 б – односторонний подвод тока; 1 – электроды,  
 2 – соединяемые детали, 3 – припой,  
 4 – направление токовых линий

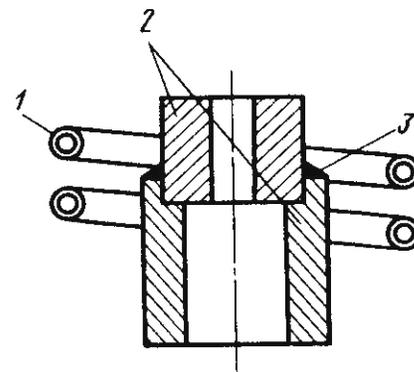


Рис. 136. Схема нагрева соединяемых деталей при индукционной пайке:  
 1 – индуктор, 2 – соединяемые детали,  
 3 – припой

Интенсивность, максимальная температура и равномерность нагрева зависят от многих факторов. Основными из них являются: форма, размеры и число витков индуктора, частота тока и мощность ВЧ-генератора.

При индукционном нагреве могут быть получены очень большие скорости нагрева. Однако это не всегда можно использовать, так как резко возрастает неравномерность нагрева соединяемых деталей. Возникает большая разность температур между поверхностными и внутренними слоями нагреваемой детали, что может сказаться на качестве паяного соединения. Нужную равномерность нагрева достигают за счет уменьшения выделяемой в паяемых деталях мощности либо применением прерывистого нагрева.

Общий нагрев места пайки. При пайке с общим нагревом при использовании массы расплавленной жидкости изделия погружают в соляную ванну или расплавленный припой. В этих случаях нагрев паяемых деталей идет за счет теплопроводности от расплава, нагретого до температуры пайки. Это обуславливает высокую скорость и равномерность нагрева.

Существует две разновидности нагрева при пайке в соляной ванне. Первый способ «прямой нагрев» заключается в том, что предварительно собранные в оснастке детали погружают в расплав солей (рис. 137, а). Состав расплава зависит от соединяемых материалов, температуры пайки и других факторов.

Например, соляная ванна состава: хлористый натрий ( $NaCl$ ), хлористый кальций ( $CaCl_2$ ), хлористый барий ( $BaCl_2$ ) имеет температуру плавления – 435 °С, а максимальная рабочая температура состава – 850 °С.

Солевой расплав защищает паяемые детали от взаимодействия с окружающей атмосферой не только в процессе пайки, но и при охлаждении, образуя на поверхностях тонкую корку застывшей соли. После пайки детали вынимаются из соляной ванны, охлаждаются и затем погружаются в ванну с горячей водой для удаления остатков солей.

Однако таким образом можно паять детали, из которых можно удалить остатки солей после пайки.

При *косвенном нагреве* в соляных ваннах (рис. 137, б) детали помещают в контейнер, в котором создается контролируемая газовая среда или вакуум. Контейнер подогревают до температуры 100–150 °С для удаления с поверхности контейнера влаги, после чего его погружают в соляную ванну,

нагретую до температуры пайки. При пайке в контейнерах скорость нагрева в соляных ваннах снижается.

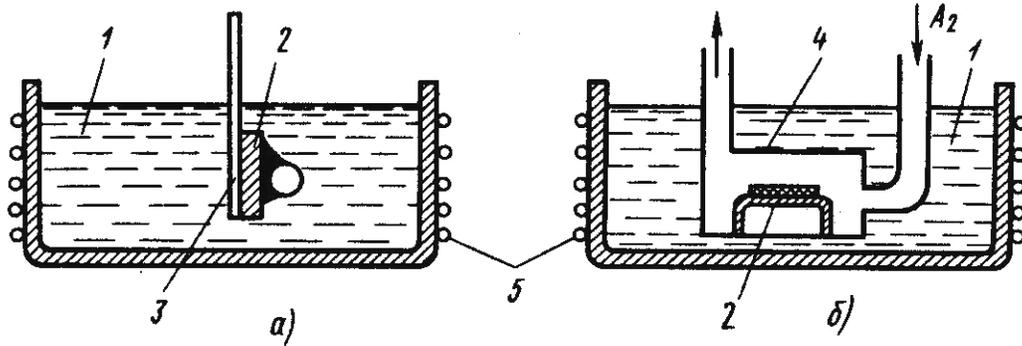


Рис. 137. Схема нагрева при пайке погружением в соляную ванну: а – прямой нагрев, б – косвенный нагрев; 1 – ванна, с расплавом солей, 2 – соединяемые детали, 3 – оснастка, 4 – контейнер, 5 – нагреватель

При пайке погружением в расплавленный припой (рис. 138) используется теплота, аккумулированная в самом припое. Детали с предварительно нанесенным на их поверхность флюсом приводят в соприкосновение с зеркалом расплавленного припоя и выдерживают в течение заданного промежутка времени. Дозирование припоя происходит в процессе пайки по мере касания расплавом паяемых изделий.

В электровакуумном приборостроении для пайки с общим нагревом используется передача теплоты от нагревателя к изделию конвекцией и излучением при использовании установок с контролируемой газовой атмосферой и излучением при использовании вакуумных установок. Разогрев нагревателя осуществляется при прохождении через него электрического тока.

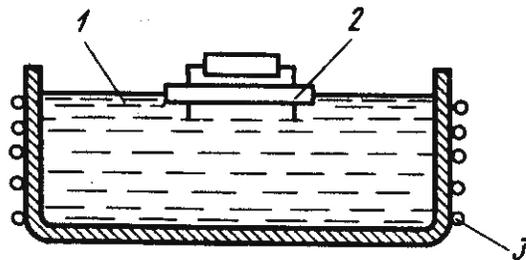


Рис. 138. Схема нагрева при пайке погружением в расплавленный припой: 1 – ванна расплавленного припоя, 2 – соединяемые детали, 3 – нагреватель

Конструкция такого нагревателя представлена на рис. 139. Соединяемые детали 3 устанавливаются на подставке 4 внутри листового нагревателя 2. Электрический ток подводится через токопроводы 1. Соединяемые детали и нагреватель располагаются в камере с контролируемой атмосферой либо в вакуумной камере. Припой в место соединения закладывается при сборке деталей под пайку.

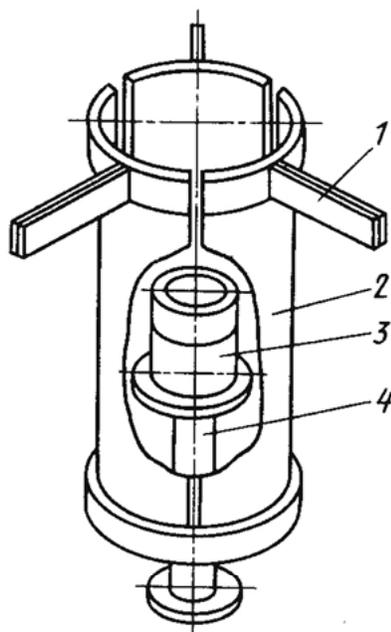


Рис. 139. Схема пайки деталей с общим нагревом от листового нагревателя:  
1 – токоподводы, 2 – листовый нагреватель, 3 – соединяемые детали, 4 – подставка

#### **4.4. Технологические особенности пайки электронных приборов**

Материалы, применяемые при пайке. Припой – это металлы или сплавы, вводимые при пайке между паяемыми деталями для получения монолитного соединения между ними при температуре нагрева ниже температуры плавления соединяемых материалов.

Основной характеристикой припоев является температура плавления. В соответствии с этим все припои подразделяются на припои для низкотемпературной пайки (с температурой плавления  $T_{пл}$ , до 450–500 °С) и припои для высокотемпературной пайки (с  $T_{пл}$  свыше 500 °С).

Чтобы удовлетворять условиям процесса пайки и обеспечивать получение качественных соединений, припой должен отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать механическую прочность изделия, электропроводимость, теплопроводность, вакуумную плотность, стойкость против коррозии в условиях эксплуатации;

- температура плавления должна быть не менее чем на 50–100 °С ниже температуры плавления паяемых металлов;

- обеспечивать минимальную температуру нагрева изделия и длительность выдержки при пайке;

- должен хорошо смачивать паяемые металлы и легко растекаться по их поверхностям;

- в процессе взаимодействия с основным металлом или покрытием не должен их сильно растворять (не допускается значительной эрозии основного металла);

- не должен иметь склонность к пористости в условиях пайки.

Технология изготовления и применения припоев не должна быть трудоемкой (припои должны обеспечивать возможность их дозирования в виде прутков, шайб, таблеток, фольги, паст и т. д.).

При изготовлении электровакуумных приборов:

- в состав припоя не должны входить легкоиспаряющиеся компоненты, способные ухудшать вакуум в приборах или повреждать катод в процессе технологических прогревов прибора;

- во избежание разрушения паяного соединения в процессе технологических прогревов коэффициенты термического расширения припоев и соединяемых материалов не должны резко различаться;

- смачивающая способность и растекаемость припоев по соединяемым материалам должна обеспечивать заполнение зазора без каких-либо флюсов;

- температура плавления припоя должна быть не менее чем на 100 °С выше температуры прогрева прибора при технологической обработке (например, при откачке).

В качестве припоев для высокотемпературной пайки электровакуумных приборов используются сплавы на основе меди, серебра, золота, их сплавы между собой и сплавы с добавками никеля, палладия, индия и др. (см. табл. 6).

Таблица 6

Припои с низкой упругостью паров для пайки электровакуумных приборов

Марка или название припоя	Состав, масс. доли, %						Интервал плавления, °С		Паяемые материалы
	Cu	Al	Ag	Ph	Ni	In	начало	конец	
Медь МВ	100	–	–	–	–	–	1083		Ковар, сталь Э, никель, молибден, мельхиор, монель–металл и т. д.
ПМН10	90	–	–	–	–	–	1100	1140	Молибден, вольфрам, никель, нержавеющая сталь
ПМН25	75	–	–	–	–	–	1150	1210	То же
Серебро	–	–	100	–	–	–	960		В качестве припоя используется в виде гальванического покрытия
ПСр72В	28	–	72	–	–	–	779		Медь, никель, Си – Ni–сплавы, ко–вар, сталь Э
ПСр65П15	20	–	65	15	–	–	850	900	Медь, ковар, никель, титан, цирконий, молибден, вольфрам
ПСр68П5	26,6	–	68,4	5	–	–	805	810	То же
ПСр63И <sub>н</sub> 10	27	–	63	–	–	10	685	710	То же, что и для припоев ПСр72В
Золото	–	100	–	–	–	–	1063		Вольфрам, молибден
ПЗл91П9	–	91	–	9	–	–	1200	1240	Молибден, вольфрам, никель, нержавеющая сталь
ПЗл35МН	62	35	–	–	3	–	1000	1030	Ковар, медь, никель, стали, молибден
ПЗл50М	50	50	–	–	–	–	955	970	Медь, ковар, никель
ПЗл82Н	82	–	–	–	18	–	950		Медь, нержавеющая сталь, никель, молибден, вольфрам
ПЗл60СрМ	20	60	20	–	–	–	835	945	Медь, ковар, никель

Медь, применяемая для пайки, должна быть бескислородной, т. е. не должна содержать закиси меди. Присутствие закиси меди приводит к возникновению в паяном шве газовых пор при нагреве в восстановительной атмосфере (водороде, азотно-водородной смеси).

Вследствие хорошей жидкотекучести и растекаемости медь способна проникать в очень малые зазоры. Медь, как и всякий чистый металл, не имеет интервала кристаллизации, что способствует получению плотных паяных швов без межкристаллической пористости. Добавки в медь никеля повышают температуру плавления припоя. Серебро в чистом виде в качестве припоя используется редко и в основном в виде гальванического покрытия толщиной 6–8 мкм на деталях из меди и медных сплавов.

Серебряно-медные сплавы являются одними из основных при изготовлении электровакуумных приборов. Из них наибольшее распространение получил припой ПСр72. Добавки палладия или индия позволяют получить припои с различными температурами плавления, что важно при осуществлении ступенчатой пайки.

Применение чистого золота в качестве припоя ограничено, однако сплавы на его основе широко распространены при изготовлении электровакуумных приборов. Добавки палладия, меди, серебра, никеля позволяют получить довольно широкую гамму припоев с повышенной температурой плавления, что очень важно в связи с тенденцией повышения температуры обезгаживания приборов до 700–750 °С для улучшения конечного вакуума в них.

Припои для низкотемпературной пайки (табл. 7) широко используются в производстве полупроводниковых приборов и микросхем, а также при монтаже электронных компонентов на платах.

При этом используются сплавы на основе олова, свинца, индия, висмута и сплавы с добавками серебра, золота, кадмия, цинка и т. д.

Олово и свинец в чистом виде редко применяют в качестве припоев. Хотя олово и обладает высокой коррозионной стойкостью, паять им не всегда целесообразно, так как оно, так же как и свинец, имеет низкие механические свойства, а при низких температурах, переходя в другую модификацию, может превращаться в серый порошок («оловянная чума»).

Наибольшее применение нашли припои, содержащие 30–60 % Sn.

## Низкотемпературные припои

Марка	Состав, масс. доли, %				Интервал плавления, °С		Паяемые материалы
	Sn	Pb	Ag	Прочее	начало	конец	
ПОС61	60–62	38–40	–	–	183	190	Лужение и пайка электро- и радиоаппаратуры, печатных плат, точных приборов с герметичными швами
ПОС40	39–41	61–59	–	–	183	238	Лужение и пайка электроаппаратуры
ПОС10	9–11	91–89	–	–	268	299	Лужение и пайка контактных поверхностей электрических аппаратов, приборов, реле
ПОССу18–0,5	17–18	Основа	–	0,2–0,5 Sb	183	277	Лужение и пайка выводов электроламп
ПОССу8–3	7–8	Основа	–	2,0–3,0 Sb	240	290	Лужение и пайка в электроламповом производстве
ПОССр2	58–60	37,5–39,5	1,9–2,1	≤ 0,79 Sb	169	290	Пайка микромодулей, изделий с вакуумно-плотными соединениями
ПОССр3	96,7–97,3	–	2,7–3,3	–	220	220	То же
ПОСК50	49–51	Основа	–	17–19 Cd	142	145	Пайка меди и ее сплавов Соединение деталей, чувствительных к перегреву
ПОСВ50	24,5–25,5	24,5–25,5	–	49–50 Bi	90	92	То же
ПСр2,5	5–6	91–93	2,2–2,8	–	295	305	Пайка меди и ее сплавов

Оловянно-свинцовые припои используются для низкотемпературной пайки различных металлов и сплавов. Они обладают высокими технологическими свойствами, пластичны, и при пайке температурный интервал плавления этих припоев хорошо совпадает с температурным интервалом активности распространенных флюсов. Малооловянистые припои (ПОС30), (ПОС40) в связи с широким интервалом кристаллизации требуют закрепления деталей после пайки (для предотвращения появления трещин).

Широко применяются припои типа ПОСб1. Введение в оловянно-свинцовые припои сурьмы (припои типа ПОССу) снижает их склонность к старению, повышает механические свойства.

Оловянные припои (типа ПОССр), используемые при изготовлении и сборке электронных приборов, легируют серебром.

Припои на основе свинца легируются висмутом, кадмием, оловом, серебром. Широкое применение получили свинцовые припои с содержанием до 3 масс. доли, % Ag (ПСр 2,5; ПСр2). Эти припои обладают высокой пластичностью и термостойкостью.

Индий является мягким и пластичным металлом ( $T_{пл} = 155 \text{ }^\circ\text{C}$ ), стоек к окислению, обладает хорошей электро- и теплопроводимостью.

Как припой индий употребляется сравнительно редко, однако припои на его основе (типа ПСрЗИ) нашли применение при пайке вакуумно-плотных соединений. Припои на основе индия обладают высокой коррозионной стойкостью в щелочных растворах, их применяют при пайке полупроводниковых материалов.

Висмут – металл, имеющий низкие пластичность и прочность, обладает склонностью к трещинообразованию при затвердевании, поэтому как припой не используется. Однако сплавы с большим содержанием висмута (сплав Розе) применяют в качестве припоев с температурой плавления 46–147  $^\circ\text{C}$ . Чаще всего висмутовыми припоями паяют медь и ее сплавы.

Флюс является одним из основных материалов, обеспечивающих надежное и устойчивое протекание процесса Пайки (особенно в низкотемпературных условиях). Им покрывают поверхности соединяемых деталей и припоя. Флюс удаляет окисные пленки, обеспечивает защиту металла от окисления поверхности соединяемых деталей и припоя, уменьшает поверхностное натяжение расплавленного припоя, повышает смачиваемость поверхностей и способствует лучшему затеканию припоя в зазоры между деталями.

Исходя из условий, необходимых для нормального протекания процесса пайки, флюс должен удовлетворять следующим общим требованиям:

– быть жидким при температуре пайки, обладать минимальной вязкостью и высокой текучестью, хорошо смачивать припой и паяемый металл, легко растекаться по поверхности основного металла и припоя с образованием сплошной пленки;

– сохранять свойства на протяжении всего процесса пайки и не изменять состав при нагреве в интервале рабочих температур;

– не образовывать химически стойких соединений с основным металлом и припоем и поглощаться ими, в противном случае снижается механическая прочность и коррозионная стойкость соединения.

Остатки флюса и продукты его разложения должны оставаться на поверхности соединения и легко удаляться после окончания пайки.

Нанесенный на соединяемые поверхности паяемых металлов и припоя флюс в виде водных, спиртовых и глицериновых растворов, паст или в порошкообразном состоянии в процессе нагрева смачивает их, растекается и при некоторой температуре, называемой минимальной температурой действия флюса, вступает в химическое взаимодействие, результатом которого является удаление окисной пленки. С повышением температуры интенсивность этого взаимодействия усиливается. Верхний предел температурного интервала действия ограничивается максимальной температурой, при которой существенно снижается его активность за счет испарения отдельных компонентов. Интервал между минимальной и максимальной температурами действия флюса называется температурным интервалом действия флюса.

Разнообразие физико-химических свойств металлов и сплавов, применяемых в паяных изделиях, а следовательно, различие в составе, свойствах и строении образующихся на их поверхности окисных пленок вызвали необходимость использования различных флюсующих веществ.

Применяемые в настоящее время флюсы можно разделить на следующие группы: смолы, смолосодержащие растворы, смолосодержащие активированные растворы, смолонесодержащие растворы, смолонесодержащие

органические растворы, коллоидные растворы, неорганические растворы и составы (табл. 8).

Таблица 8

Флюсы для низкотемпературной пайки

Флюсы	Химический состав			Температурный интервал активности, °С	Влияние остатков флюса на коррозионную стойкость	Назначение
	группа	марка	компоненты содержание, %			
1	2	3	4	5	6	7
Смолы	Канифоль	Канифоль сосновая «В»	100	130–315	Очень слабое	Для лужения и пайки с ограниченным растеканием припоя
Смоло-содержащие растворы	ФКСп	Канифоль сосновая «В»	10–40	225–300	То же	Для пайки по покрытиям, а также для консервации
		Спирт этиловый	90–60			
	ФПЭт	Смола олиэфирная ПН-9	20–30	225–375	То же	
		Этилацетон	80–70			
Смоло-содержащие активированные растворы	ФКТс	Канифоль сосновая «В»	15–30	200–400	Слабое	Для пайки деталей с покрытием после хранения в нормальных условиях
		Кислота салициловая	3–3,5			
		Триэтаноламин	1–1,5			
		Спирт этиловый	81–65			
	ФКАСп	Канифоль сосновая «В»	25–30	200–400	Отсутствует	
		Анилин солянокислый	3–4			
		Спирт этиловый	72–66			
Смолонесодержащие растворы	ФТС	Триэтаноламин	1–1,5	225–325	Слабое	Для пайки деталей из медных сплавов и с металлическими покрытиями
		Салициловая кислота	4–4,5			
		Спирт этиловый	95–94			

1	2	3	4	5	6	7	
Смоло- несодержа- щие органичес- кие растворы	ФДФс	Диэтиламин соляно-кислый	20–25	200– 400	Сильное	Для пайки деталей из черных и цветных металлов и сплавов	
		Кислота ортофосфорная	20–25				
		Этиленгликоль	60–50				
	ФСкПс	Семикарбозид солянокислый	3,5	200– 400	Слабое	Для пайки деталей из черных и цветных металлов и сплавов	
		Глицерин	70–58				
		Полиокос-100	27–37				
	ФТБФ	Кадмий борфторид	9–11	275– 400	Сильное	Для пайки деталей из алюминия и его сплавов	
		Цинк борфторид	2,5– 3,5				
		Аммоний борфторид	4,5– 5,5				
		Триэтаноламин	84–80				
	Коллоид- ные растворы	ФТСП	Триэтаноламин	5,5–6	200– 300	Отсутст- вует	Для пайки в труднодоступных местах без отмывки
			Кислота салициловая	5,5–6			
Спирт этиловый			28–29				
Вазелин			61–59				
ФХВ		Хлористый цинк	26–27	200– 300	Сильное	Для пайки деталей из черных и цветных металлов с тщательной отмывкой	
		Хлористый аммоний	3,5–4				
		Вода дистиллированная	0,5–1				
		Вазелин	70–68				
Неоргани- ческие растворы и составы (кислот- ные)	ФФ	Кислота ортофосфорная	84–85	150– 300	Очень сильное	Для пайки меди и ее сплавов	
		Вода дистиллированная	16–15				
	ФС	Кислота соляная	5–10	150– 300	То же	Для пайки деталей из черных и цветных металлов и сплавов	
		Вода дистиллированная	95–90				
	Прима III	Хлористый цинк	17–18	180– 240	Сильное	То же	
		Хлористый аммоний	5,5–6				
	Нашатырь	Вода дистиллированная	77,5– 76	170– 300	Сильное	То же	
		Хлористый аммоний	100				

Смолы и смолосодержащие растворы. В качестве флюса иногда применяют кусковую канифоль. Канифоль представляет собой желтовато-

красную или темно-коричневую хрупкую массу, получаемую из смолы хвойных деревьев. Флюсующее действие канифоли объясняется наличием в ее составе абиетиновой кислоты и других органических кислот, растворяющих окислы меди и некоторых других металлов. При температуре 125 °С канифоль переходит в жидкое состояние, а при нагреве до 300 °С разлагается. Нагрев канифоли выше 300 °С приводит к обугливанию и потере флюсующих свойств.

Более технологичными являются флюсы, представляющие собой растворы смол. Наиболее распространен флюс ФКСп, который обеспечивает удовлетворительную растекаемость при очень слабом коррозионном воздействии на детали в воздушной атмосфере. К недостаткам этого флюса можно отнести некоторые колебания его активности, связанные с отклонениями в составе канифоли разных партий поставки. Флюс ФПЭт обладает более высокой активностью.

Для пайки металлов и сплавов, окислы которых плохо удаляются канифолью и ее растворами, применяют канифольные флюсы с добавками активизаторов. Такими активизирующими добавками являются анилин, триэтаноламин, салициловая кислота и другие вещества, которые не оказывают существенного коррозионного воздействия на паяемые предметы.

Наиболее распространенным флюсом этой группы является флюс ФТС, применяемый как для пайки паяльником, так и для групповой пайки. Флюс ФКАСп отличается практически полным отсутствием коррозионного воздействия, что объясняется связыванием кислотных остатков флюса после окончания пайки производными анилина.

Смолосодержащие органические растворы. Состоят из растворителя и слабых органических кислот и солей, остатки которых после пайки компенсируются радикалами анилина. Изменением концентрации или степени кислотности компонентов добиваются необходимой активности флюса.

Коллоидные растворы. Используются как флюсы при пайке прецизионных деталей и плотном монтаже, когда возникает необходимость строгой локализации растекания флюса во избежание его попадания в капиллярные

щели, на химически активные материалы, под изолирующую оболочку перемычек, в зазор между проводниками в труднодоступных местах и т. п. В этих случаях малая площадь растекания является достоинством флюса, обусловлена его повышенной вязкостью и не связана с химической активностью.

Неорганические растворы и составы. Эти флюсы обладают высокой химической активностью и применяются в тех случаях, когда имеется возможность полного удаления остатков флюса после пайки. При их применении процесс флюсования протекает интенсивно, припой легко растекается по поверхности металла. Флюсы этой группы представляют собой водные растворы кислот или солей. Широко используются флюсы на основе растворов хлористого цинка. Активность этих флюсов зависит от концентрации хлористого цинка. Его часто применяют в смеси с хлористым аммонием, который усиливает его действие. Смесь этих веществ делает флюсы активными даже при сравнительно низких температурах пайки.

Газовые среды для пайки. Поверхность деталей всегда покрыта пленкой окислов, не смачиваемой припоем. Обычно при пайке на воздухе применяются флюсы – смеси химических соединений, удаляющие окисную пленку и препятствующие окислению поверхности металлов в процессе пайки. При производстве электровакуумных приборов применение флюсов недопустимо и их роль выполняют различные газовые смеси или вакуум.

По характеру воздействия на металл газовые среды делятся на нейтральные и восстановительные. Возможность пайки деталей в той или иной среде определяется стойкостью окислов на их поверхности, а также активностью самой газовой среды.

Полного удаления окислов с поверхности паяемых деталей можно добиться, уменьшая количество кислорода в окружающей среде при постоянной температуре или увеличивая температуру среды при постоянном количестве кислорода над поверхностью детали. Уменьшить количество кислорода в окружающей среде можно либо создав вакуум с определенной

степенью разрежения, либо заполнив пространство над деталями инертным или активным восстановительным газом.

Во время пайки в вакууме образующийся в процессе разложения окислов кислород непрерывно удаляется, что создает условия для дальнейшей очистки деталей. Вакуум при пайке должен быть тем выше, чем выше стойкость окисла.

В качестве нейтральных сред для пайки используют азот и инертные газы (аргон, гелий). Азот рекомендуется применять в тех случаях, когда нагреваемые материалы не образуют с ним нежелательных соединений. Скорость разложения окислов металлов при пайке в нейтральных средах зависит от скорости удаления кислорода из окружающего пространства, следовательно, от количества протекающего через место пайки нейтрального газа.

Окислы металла будут разлагаться активнее, если в камере пайки не будет другого источника кислорода кроме самого окисла. Кислород может попадать в камеру вместе с газом, а также образовываться при разложении паров воды, содержащихся в газе. Поэтому нейтральные газы перед пайкой следует тщательно очистить от примесей кислорода и паров воды.

При использовании нейтральных газовых сред или вакуума удаление окисных пленок с поверхности соединяемых металлов и припоя может происходить не только за счет разложения (диссоциации) окислов, но и за счет их возгонки и растворения в основном металле и расплавленном припое.

При пайке в восстановительных средах чаще всего применяют водород и азотно-водородные смеси. Наилучшей восстановительной способностью обладает сухой, очищенный от примесей водород, однако смесь его с кислородом в количестве от 4 до 75 масс. доли % взрывоопасна. Безопаснее и экономически выгоднее применять азотно-водородную смесь, получаемую добавлением чистого азота к водороду, либо диссоциацией аммиака.

В отличие от пайки в вакууме и нейтральных средах при пайке в восстановительных средах окислы с поверхностей деталей удаляются более интенсивно, так как в этом случае помимо разложения имеет место их прямое восстановление. Качество пайки и в этом случае зависит от содержания в газе

влаги и кислорода. Обычно используют газы с точкой росы  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже и с содержанием кислорода в них не более 0,002 масс. %.

Газовые среды используются обычно при пайке в печах. Пайка в газовой среде по сравнению с пайкой с применением флюсов имеет значительные преимущества, к основным из которых относятся: уменьшение коробления изделия вследствие равномерного нагрева детали, возможность механизации и автоматизации технологического процесса, возможность одновременной пайки партии деталей или пайки за один прием сложных деталей, имеющих несколько швов. Паяные детали не требуют очистки после пайки.

Типы паяных соединений. В конструкциях электронных приборов и при их монтаже в аппаратуре пайка может применяться для соединения плоских элементов деталей, круглых проводников с плоскими элементами, стержневых и трубчатых элементов деталей и т. д.

Конструкции паяных соединений включают в себя соединения внахлестку, стыковые, телескопические, тавровые, торцовые и комбинированные (табл. 9).

Соединения внахлестку являются наиболее распространенными в паяных конструкциях, так как позволяют изменением степени перекрытия деталей достигать заданных свойств соединений.

Стыковые соединения в паяных изделиях применяются редко, так как они не всегда обеспечивают необходимое качество соединения.

Телескопические соединения широко используются в конструкциях электровакуумных приборов, так как обеспечивают необходимое взаимное расположение деталей в узле при сборке. Многолетний опыт изготовления электровакуумных приборов показал целесообразность применения паяных конструкций, сочетающих в себе одновременно телескопический и торцовый тип соединения.

Торцовый тип соединения широко используется при пайке кристаллов и подложек в корпусе приборов.

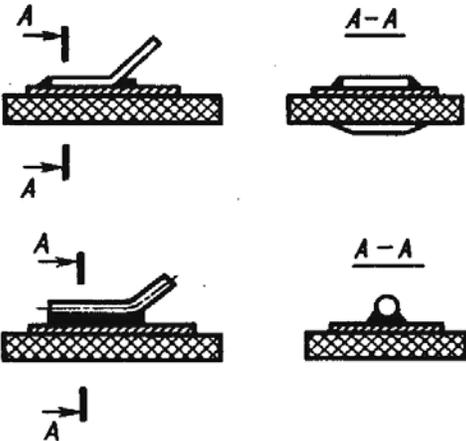
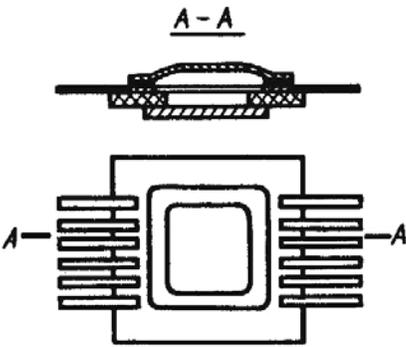
Тавровые соединения используют при монтаже электронных приборов на подложках и печатных платах.

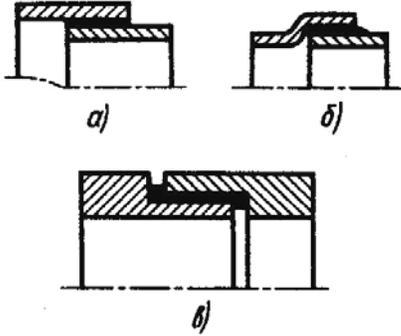
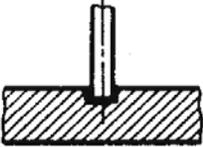
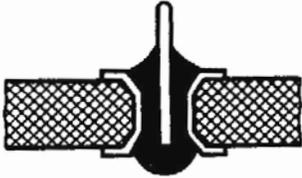
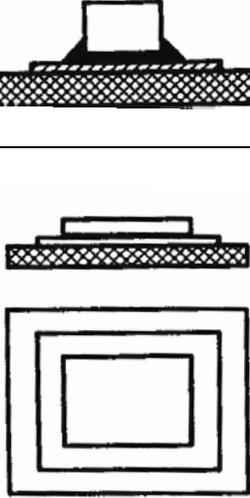
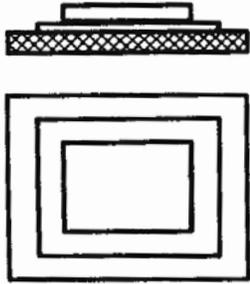
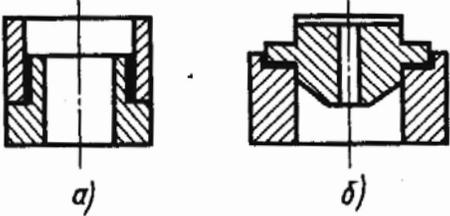
При выборе типа паяного соединения учитывают в зависимости от назначения прибора специальные требования: по герметичности, прочности, электропроводимости, коррозионной стойкости и т. д.

Подготовка поверхности деталей перед пайкой. Очистка деталей перед пайкой. Флюсы не удаляют посторонние вещества органического и неорганического происхождения, например пленки жирового происхождения, загрязнения, остатки лакокрасочных покрытий и т. п. В процессе пайки указанные загрязнения препятствуют смачиванию основного металла флюсом и припоем, вызывают непропаи.

Таблица 9

Типы паяных соединений

Тип паяного соединения	Конструкция паяного соединения	Применения
1	2	3
Внахлестку		<p>Пайка ленточных выводов</p> <p>Пайка проволочных выводов</p>
		<p>Герметизация корпусов</p>

1	2	3
Телескопическое	 <p style="text-align: center;">а)                      б) в)</p>	Пайка электровакуумных приборов
Стыковое		Пайка выводов
Тавровое		Пайка выводов с основанием корпуса
		Пайка выводов электронных приборов с печатной платой
		Пайка навесных элементов на плату
		Пайка кристаллов на плату или в корпус
Комбинированное	 <p style="text-align: center;">а)                      б)</p>	Пайка электровакуумных приборов

Посторонние вещества с соединяемых поверхностей деталей и припоя перед пайкой удаляют химическими средствами или термическим методом. Для этого используют промывку в воде, травление, обезжиривание, отжиг в восстановительной среде или в вакууме.

Выбор способа очистки определяется характером загрязнений, свойствами материала и конфигурацией деталей.

Вода используется как хороший растворитель многих минеральных солей. Водой легко удаляются некоторые жировые и масляные эмульсии, мыла, а также различного рода механические загрязнения. Промывка в воде применяется и в различных стадиях процесса очистки деталей другими способами. Она производится в нагретой до 80–100 °С проточной дистиллированной воде. Корзины с очищаемыми деталями последовательно погружаются в несколько ванн, периодически встряхиваются и выдерживаются не менее 3–5 минут в каждой ванне.

Обезжиривание применяется для очистки деталей от остатков смазок и других жировых загрязнений. Животные и растительные жиры удаляются обычно химическим или электрохимическим способом в растворах щелочей и некоторых солей, минеральные масла – промывкой в органических растворителях.

В качестве растворителей применяются трихлорэтилен, бензин, в отдельных случаях – четыреххлористый углерод, ацетон и др. Наиболее эффективным является трихлорэтилен.

В ряде случаев, когда надо очистить деталь или узел от загрязнений, попавших в узкие щели, каналы, отверстия, применяют промывку в воде и обезжиривание с помощью ультразвука. На процесс очистки деталей в ультразвуковом поле оказывают влияние кавитационные явления и постоянные потоки в жидкости, возникающие под воздействием источника ультразвуковых колебаний. Кавитация представляет собой явление образования и захлопывания пузырьков в жидкости под действием ультразвуковых волн, распространяемых в ней. При захлопывании пузырьков жидкость производит удары с большим

давлением. Под влиянием этих ударов загрязнения отрываются от поверхности очищаемых деталей. Использование ультразвука позволяет получить высокое качество очистки и ускорить этот процесс.

Травление в растворах кислот, щелочей и солей используется для удаления с поверхности деталей окислов и других поверхностных загрязнений. При этом также удаляется поверхностный слой металла, что приводит к изменению размеров деталей. При травлении корзина или подвеска с очищаемыми деталями погружается в соответствующий раствор. Время выдержки в растворе определяется состоянием поверхности и требованиями сохранения точности размеров деталей.

В производстве электровакуумных приборов для очистки деталей применяют высокотемпературный отжиг в восстановительной среде или в вакууме. При этом удаляются поверхностные загрязнения: остатки промывочных жидкостей и различных органических и неорганических соединений, адсорбированных деталями при хранении или неполностью удаленных при химических методах очистки, а также производится обезгаживание деталей.

Отжиг деталей и припоев позволяет улучшить качество паяных швов. Из необезгаженных деталей и припоев в процессе пайки выделяются газы, которые, попадая в расплавленный припой, образуют в нем при затвердевании раковины. Раковины уменьшают прочность спая и нарушают его герметичность.

Нанесение покрытий. В ряде случаев перед пайкой на поверхность соединяемых деталей наносят различные металлические покрытия, которые повышают смачивающую способность и растекаемость выбранного припоя по отношению к паяемому материалу. С этой целью на детали наносят такие легко паяемые металлы, как золото, серебро, никель, олово, оловянно-свинцовые припои и т. д. Например, так как низкоуглеродистая сталь плохо смачивается припоями на основе серебра, то нанесение на стальные детали слоя меди, а затем серебра позволяет паять их этими припоями. Другим примером может

служить использование легко паяемых металлов в качестве покрытия для материалов, на поверхности которых имеется трудноудаляемая пленка окислов, не смачиваемая припоем. Это такие материалы, как бериллиевая бронза, некоторые нержавеющие стали и сплавы, алюминий и его сплавы.

При пайке низкотемпературными припоями для подготовки поверхности под пайку широко используют лужение. Термин «лужение», относившийся ранее лишь к процессам нанесения на поверхность металла слоя олова или его сплава, в настоящее время обозначает покрытие любым более легкоплавким, чем основной материал, металлом или сплавом – припоем. Необходимым признаком лужения является расплавление металла покрытия на поверхности основного металла.

Лужение осуществляется паяльником, в ваннах с расплавленным припоем, валками и т. д.

Металлические покрытия изменяют характер взаимодействия «припой–основной металл» путем замены непосредственного воздействия припоя на основной металл воздействием припоя на металл покрытия. Такие покрытия называются барьерными покрытиями. Барьерные покрытия предотвращают возникновение хрупких интерметаллических соединений в паяном шве, исключают диффузию жидкого припоя по границам зерен основного металла, вызывающую нарушение его вакуумной плотности. Эти покрытия должны хорошо смачиваться расплавленным припоем, но не растворяться в нем, так как они должны сохраниться до конца процесса пайки. В качестве барьерных покрытий, наносимых, например, на ковар перед пайкой припоями на серебряной основе, служат медные или никелевые покрытия.

Покрyтия осуществляют предварительное дозирование припоя. Покрyтия-припой наносятся на паяемые детали гальваническим способом, вакуумным термическим напылением, лужением и другими способами. Паяное соединение получают за счет расплавления нанесенного покрытия. Примером является пайка деталей из меди и других металлов за счет

расплавления нанесенного на них гальваническим способом слоя серебра или золота.

С целью ограничения растекаемости припоев по поверхности детали прибегают к хромированию участков, которые желательно оградить от попадания припоя (хром не смачивается припоями на золотой, медной и серебряной основах).

Нанесение флюса. Качество получаемых соединений во многом зависит от способов нанесения флюса на паяемые детали и припои. Для нанесения флюса могут быть использованы различные способы, выбор которых определяется составом флюса, технологической схемой процесса пайки, конструкцией и размерами паяемого узла, степенью автоматизации процесса пайки. В практике наибольшее распространение получили методы нанесения флюса кистью, погружением, накатыванием вращающимися щетками или валиками, напылением. Широко используются также методы нанесения флюса в виде пены и с помощью волны или струи флюса.

Способы нанесения флюса кистью или погружением в ванну, наполненную жидким флюсующим составом, применяются, как правило, только в индивидуальном и мелкосерийном производстве. Следует отметить, что способом погружения можно наносить флюсы различной вязкости.

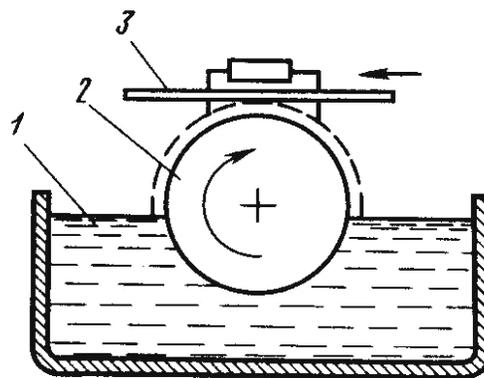


Рис. 140. Схема нанесения флюса с помощью вращающегося ролика:  
1 – ванна с жидким флюсом, 2 – вращающийся диск,  
3 – паяемые детали (стрелкой показано направление движения паяемых деталей)

Способ нанесения флюса накатыванием заключается в следующем (рис. 140): вращающиеся щетки или ролики погружаются примерно на треть своего диаметра во флюс и при вращении захватывают его из ванны; паяемые детали, перемещаясь над ванной, соприкасаются с открытой частью щеток или роликов, и на их поверхность наносится тонкий слой флюса. Этот способ позволяет достигнуть однородности наносимого слоя флюса и легко поддается автоматизации.

Способ напыления при нанесении флюса чаще всего осуществляется с помощью различного рода пульверизаторов (рис. 141). Подаваемый через дозатор флюс захватывается потоком воздуха, выходящим из сопла, и направляется на кромки паяемых деталей. Чтобы предотвратить попадание распыленного флюсующего состава в окружающее пространство, в устройстве предусмотрен специальный защитный кожух. Такой способ обеспечивает однородность и толщину нанесенного слоя флюса, легко механизмуется и автоматизируется.

Нанесение флюса вспениванием (рис. 142) осуществляется путем контакта поверхности деталей, совершающих поступательное движение, с гребнем пены, в результате чего флюсующий состав покрывает паяемое изделие слоем регулируемой толщины.

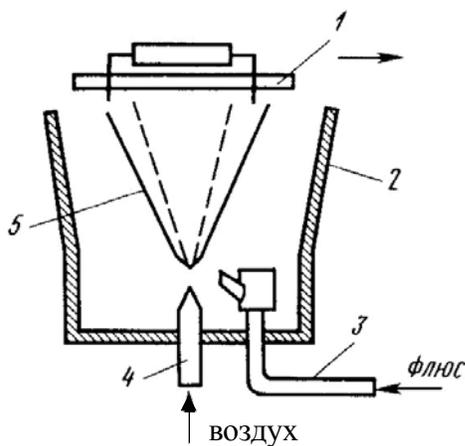


Рис. 141. Схема нанесения флюса с помощью пульверизатора: 1 – паяемые детали; 2 – защитный кожух, 3 – дозатор флюса, 4 – воздушное сопло, 5 – поток распыленного флюса

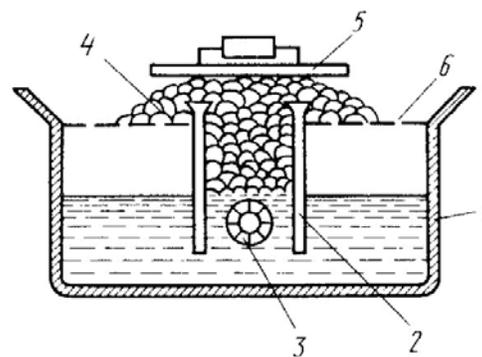


Рис. 142. Схема нанесения флюса в виде пены: 1 – ванна с флюсом, 2 – внутренний резервуар, 3 – вспенивающее устройство, 4 – поток пены, 5 – паяемые детали, 6 – сетка

Установка для нанесения флюса этим способом состоит из ванны с жидким флюсом и внутреннего резервуара, соединенных между собой так, чтобы жидкий флюс свободно перетекал из одного отсека в другой. При подаче сжатого воздуха через отверстия вспенивающего устройства флюсующий состав во внутреннем резервуаре вспенивается выходящим воздухом и в виде потока пены поднимается над резервуаром. Паяемые детали при контакте с потоком пены разрушают пузырьки флюса, в результате чего происходит покрытие мест пайки тонким слоем флюса. Чтобы предотвратить переполнение ванны вспененным составом, ее закрывают сверху специальной сеткой, размеры ячеек которой несколько меньше среднего диаметра пузырьков пены. Указанная сетка способствует ускоренному превращению пены в жидкость.

Напор жидкости при нанесении флюса с помощью волны или струи способствует равномерному распределению его по поверхности соединяемых деталей с заполнением узких зазоров. Подача флюса осуществляется с помощью вращающейся крыльчатки, нагнетающей жидкость в специальный канал, на выходе которого образуется стоячая волна флюсующего состава.

Сборка деталей и оснастка для пайки. Оснастка при пайке деталей применяется для повышения качества получаемых соединений, повышения производительности труда, снижения брака, расширения технологических возможностей оборудования, удобства работы и т. д. Оснастка должна обеспечить соответствующее взаимное расположение деталей, определяемое конструкцией изделия, и надежное их закрепление, препятствующее смещению при загрузке и во время пайки.

При конструировании оснастки для пайки стремятся выполнить следующие правила:

- масса оснастки должна быть минимальной, чтобы не вызывать изменения расхода энергии на ее нагрев и потерь времени на охлаждение;
- площадь контакта оснастки с изделием должна быть минимальной для уменьшения теплоотвода от него;

- оснастка не должна препятствовать быстрому и равномерному нагреву изделия и не приводить к его деформации;
- конструкция оснастки не должна препятствовать свободной циркуляции газов в полости соединяемого узла;
- оснастка должна обеспечивать доступ для наблюдения за плавлением припоя (в случае визуального наблюдения за процессом пайки).

По функциональному назначению различные виды или элементы оснастки могут быть классифицированы следующим образом:

- приспособления, обеспечивающие размещение паяемых деталей в рабочей зоне пайки;
- скрепляющие или сжимающие приспособления;
- приспособления, фиксирующие взаимное положение деталей с заданной точностью;
- тепловые экраны и холодильники;
- приспособления, препятствующие деформациям.

Приспособления, обеспечивающие размещение паяемых деталей в рабочей зоне пайки, служат для: рационального использования объема печи при пайке изделий, размеры которых значительно меньше размеров рабочего пространства печи; придания устойчивости паяемым узлам; уменьшения затрат времени на перемещение и установку деталей в рабочую зону печи из тары и обратно. Одно из таких приспособлений представлено на рис. 143.

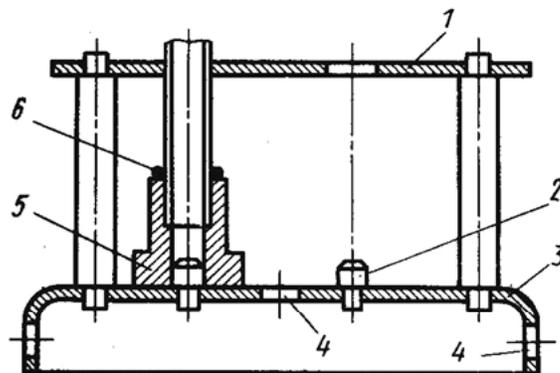


Рис. 143. Многоместная подставка для пайки:

1 – поддерживающий диск, 2 – опорная стойка, 3 – основание, 4 – отверстия для циркуляции газов, 5 – изделие, 6 – припой

Такие приспособления применяются при пайке деталей, нужное взаимное расположение которых обеспечивается наличием в них посадочных мест. Приспособление позволяет поместить на нем детали в процессе сборки, транспортировать его в универсальной таре, быстро устанавливать его в печь и вынимать из нее.

Конструкция таких приспособлений и способ прижатия определяются конструкцией паяемого изделия, характером нагрева и температурой пайки.

При пайке с местным нагревом элементы конструкции приспособления, обеспечивающего прижим деталей при пайке, должны быть по возможности выведены из зоны нагрева, что устраняет потери теплоты на нагрев приспособления и позволяет избежать его коробления (рис. 144).

Приспособления для пайки с общим нагревом должны выдерживать достаточно большое число циклов пайки.

Применяют различные способы прижимы паяемых деталей: пружинами, резьбовыми элементами, за счет разности температурных коэффициентов расширения, грузами. Оправка для пайки двух цилиндрических полых деталей, достаточно жестких в направлении сжимающих усилий, показана на рис. 145.

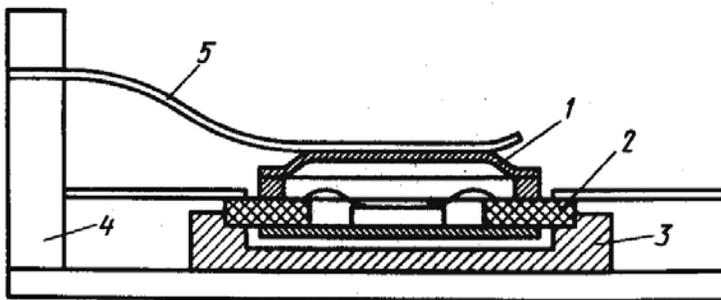


Рис. 144. Приспособление, обеспечивающее прижим деталей при пайке: 1 – крышка, 2 – основание корпуса, 3 – держатель, 4 – стойка, 5 – пружина

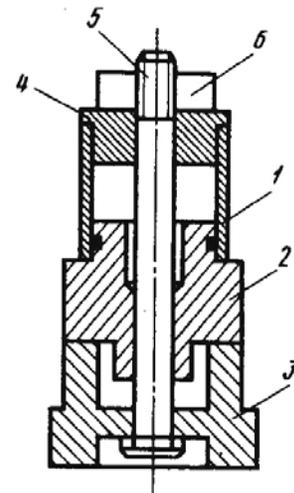


Рис. 145. Приспособление с винтовым поджимом: 1 – втулка, 2 – полюсный наконечник, 3 – нижняя часть оправки, 4 – верхняя часть оправки, 5 – стягивающий стержень, 6 – гайка

В этом случае сжимающее усилие создается обычно резьбой. Материал таких оправок должен иметь температурный коэффициент расширения, равный или близкий температурному коэффициенту расширения материала деталей.

Иногда необходимые при пайке сжимающие усилия обеспечивают за счет разности в температурных коэффициентах расширения материалов оправки и паяемого узла. Так, если паяют детали из нержавеющей стали, то центральный стержень оправки может быть из молибдена.

Когда детали паяют по торцовым поверхностям, то для поджатия их обычно используют грузы или пружины.

Часто оправка должна обеспечивать не только сжимающее усилие, но и точность взаимного расположения паяемых деталей. В качестве примера на рис. 146 показана оправка для впаивания втулки в полюсный наконечник на определенной высоте.

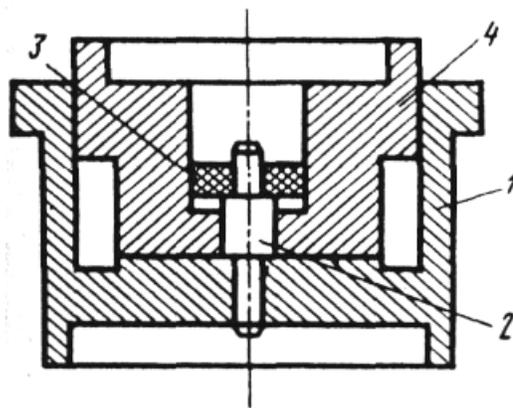


Рис. 146. Центрирующая оснастка:  
1 – оправка, 2 – центрирующий стержень, 3 – керамическая втулка,  
4 – полюсный наконечник

В ряде случаев необходимо при пайке предохранять от перегрева термочувствительные элементы (например, стеклянные детали, сиффоны). На рис. 147 показано охлаждающее устройство, предохраняющее сиффон от перегрева при пайке его с фланцем. Разогрев места пайки осуществляется разогревом графитовой оправки токами высокой частоты. Водоохлаждаемая оправка позволяет снизить температуру нагрева сиффона.

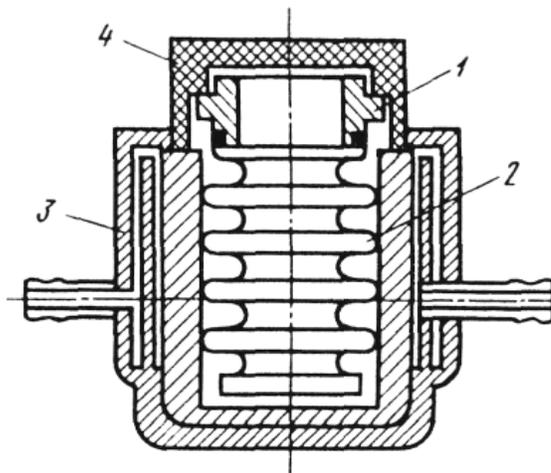


Рис. 147. Приспособление с водоохлаждаемыми радиаторами:  
1 – фланец, 2 – сильфон, 3 – водоохлаждаемая оправка, 4 – графитовая оправка  
для нагрева токами высокой частоты

Процесс пайки. После проведения подготовительных операций следует процесс пайки, включающий следующие основные этапы:

- подача изделий на рабочее место (при ручных методах пайки) или загрузка в печь и создание соответствующей защитной среды (вакуум, защитная газовая среда);
- нагрев паяемого изделия до температуры пайки и выдержка при этой температуре;
- охлаждение.

При пайке особое значение имеет контроль температуры нагрева изделия, особенно при пайке высокотемпературными припоями, когда велика опасность перегрева. Способ контроля температуры зависит от способа пайки. Например, при пайке паяльником температура нагрева изделия связана с температурой наконечника паяльника, которая и является объектом контроля и регулирования.

При механизированной пайке нагрев до определенной температуры обеспечивается выдерживанием времени и постоянством условий нагрева.

Время выдержки при температуре пайки должно быть достаточным для смачивания припоем паяемого металла, затекания его в зазоры и развития в нужной степени процессов взаимной диффузии. Так как обычно температура

нагрева при пайке на 20–50 °С и более выше температуры плавления припоя, то общее время пребывания припоя в расплавленном состоянии ( $\tau_0$ ) складывается из времени нагрева от температуры плавления припоя до температуры пайки ( $\tau_1$ ), времени выдержки при температуре пайки ( $\tau_2$ ) и времени охлаждения от температуры пайки до температуры кристаллизации припоя ( $\tau_3$ ), т. е.  $\tau_0 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ . В зависимости от метода нагрева, мощности источника теплоты и условий охлаждения время  $\tau_0$  может иметь самые различные значения при постоянном времени  $\tau_2$ .

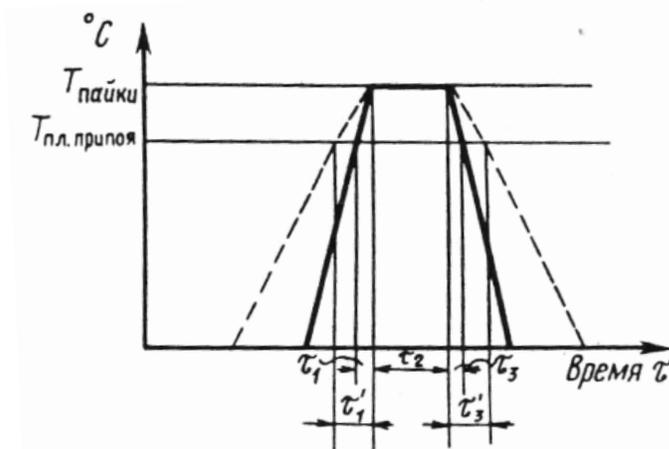


Рис. 148. Циклы пайки с одинаковым временем выдержки при температуре пайки  $\tau_2$  :  
 ————— — быстрый нагрев и охлаждение,  
 - - - - - — медленный нагрев и охлаждение

На рис. 148 графически изображены два цикла пайки, отличающиеся лишь значениями  $\tau_1$  и  $\tau_3$ . В случае интенсивного взаимодействия припоя и основного металла увеличение  $\tau_0$  может привести к возникновению различных дефектов.

Таким образом, при назначении режима пайки и последующем его воспроизведении необходимо учитывать возможность оборудования для обеспечения соответствующих скоростей нагрева и охлаждения.

Обработка деталей после пайки. Детали и узлы, соединения которых выполнены высокотемпературной пайкой в защитных газовых средах или в вакууме, как правило, не требуют последующей обработки.

После пайки с использованием флюса на паяемых деталях остается некоторое количество флюса и продуктов его разложения. Эти остатки могут

вызвать коррозию металла, ухудшить электрические параметры микросхемы, а в некоторых случаях даже вызывают нарушение контактных соединений.

Вопрос о необходимости очистки деталей после пайки решается в зависимости от требуемой надежности аппаратуры и условий ее эксплуатации. Когда изготавливают изделия для ответственных объектов, очистка деталей обязательна; в менее важных случаях допускаются на изделия остатки чистой прозрачной канифоли. При использовании в технологическом процессе пайки активных флюсов или масляных составов очистка обязательна во всех случаях.

Для очистки и промывки узлов и изделий применяют воду, а также различные растворители и составы. При этом моющие составы должны быть способны растворять как основной материал флюса, в каком бы виде он ни был (растворенном, необработанном или соединенном с каким-либо продуктом в процессе пайки), так и связующие вещества флюса.

Наиболее просто осуществляется удаление остатков водорастворимых флюсов путем отмывки изделий в проточной горячей воде. На рис. 149 показана схема отмывки печатных плат.

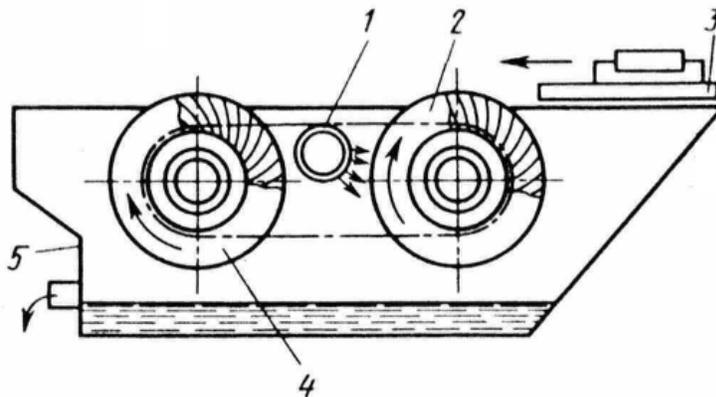


Рис. 149. Схема установки для отмывки печатных плат:

1 – труба, 2 – щетка для отмывки, 3 – печатная плата, 4 – щетка для удаления влаги, 5 – ванна

Горячая вода поступает через трубу 1 на ворс вращающейся щетки 2. Последняя осуществляет промывку печатной платы 3. Сухая щетка 4 служит для удаления влаги с поверхности промытой платы.

Для других типов флюсов одной отмывки в горячей воде недостаточно. В этом случае применяют химические вещества, которые либо сами удаляют остатки флюсов, либо вступают с ними в реакцию, после чего образуются продукты, легко растворимые в воде. После нейтрализации необходимо дополнительно промыть детали в воде.

Остатки канифольных флюсов нельзя удалить водой или нейтрализовать. В этом случае применяют такие растворители, как спирты, трихлорэтилен, четыреххлористый углерод и т. д. В оборудовании для отмывки используют струи холодной или горячей жидкости. Кроме химического воздействия струи растворителя оказывают механическое воздействие на обрабатываемые изделия, дополнительно очищая их от загрязнений. На заключительной стадии очистки детали промываются горячей водой, смывающей продукты реакции и твердые остатки флюса.

Хорошие результаты дает очистка в парах растворителя. Изделия помещают в нагревательную камеру, в которой находится кипящий растворитель. Его пары, поднимаясь, соприкасаются с холодным изделием и конденсируются в виде дистиллята, растворяющего остатки флюса. Загрязненный растворитель снова поступает в нагревательную камеру, а свежий пар заново соприкасается с поверхностью детали для дополнительной очистки и т. д.

В качестве моющего раствора используются жидкости со сравнительно низкой температурой кипения, например фреон-113. Особенно эффективной является очистка изделий с применением ультразвука. В большинстве случаев она осуществляется в ванне с растворителем, в которую с помощью волновода вводятся ультразвуковые колебания. Возникающий при этом в жидкости кавитационный эффект способствует быстрому удалению остатков флюса.

## 4.5. Особенности пайки материалов для электронного машиностроения

Пайка цветных металлов и сплавов. Пайка меди и ее сплавов. Окисная пленка на поверхности меди и ее сплавов (латуней, бронз, медно-никелевых сплавов) легко восстанавливается флюсами, поэтому пайка этих металлов в большинстве случаев не представляет трудностей.

При пайке меди в газовых восстановительных средах следует иметь в виду, что обычная техническая медь подвержена так называемой «водородной болезни», т. е. растрескиванию по границам зерен. Это объясняется тем, что при взаимодействии с медью водород растворяется в ней, восстанавливает закись меди, расположенную по границам зерен, а образующиеся при этом пары воды разрывают металл. В электровакуумной промышленности применяются бескислородная медь марки МБ и медь МВ вакуумной переплавки. Эти марки меди можно паять в восстановительных атмосферах, не опасаясь растрескивания.

По меди припой хорошо растекается не только в восстановительной среде, но и в вакууме или в инертной атмосфере.

В качестве припоев для пайки меди в электровакуумной промышленности применяются сплавы серебра с медью, не содержащие таких легкоиспаряющихся компонентов, как цинк, кадмий. Наиболее распространен припой ПСр72.

При необходимости более тщательного обезгаживания электровакуумных приборов температуру при откачке поднимают до 650–700 °С.

В этом случае для пайки применяют золотосодержащие припои (ПЗлН82, ПЗлМН35В и др.), имеющие более низкую упругость паров.

При пайке меди оловянно-свинцовыми припоями и другими легкоплавкими припоями целесообразно применять спиртоканифольные флюсы, остатки которых не вызывают коррозии.

Сложность пайки сплавов на основе меди зависит от свойств легирующих добавок. Наиболее частыми элементами, вводимыми в медь для получения

необходимых физико-механических свойств, являются цинк, фосфор, кадмий, алюминий, бериллий, кремний, хром и др. Эти элементы в зависимости от их влияния на процесс пайки можно подразделить на группы. К первой, наиболее распространенной, следует отнести сплавы, содержащие легкоиспаряющиеся элементы – цинк, кадмий, фосфор и др. Пайка таких сплавов затруднена сильным испарением этих элементов, налетами на стенки печей, изменением химического состава паяемых материалов. Поэтому пайка указанных материалов чаще всего осуществляется на воздухе с применением газовых горелок и различных флюсов. В качестве припоев используют серебросодержащие припои (ПСр40, ПСр45, ПСр25Ф и др.).

Другие элементы (Si, Al, Be, Cr) образуют на поверхности сплавов прочные пленки окислов. Надежная пайка таких материалов может быть осуществлена только с применением покрытий (например, никелевых).

Пайка никеля и его сплавов. Чистый никель и его сплавы с медью типа «монель» и «константан» имеют на поверхности химически нестойкую окисную пленку, которая легко восстанавливается в газовых средах, удаляется флюсованием и при высокотемпературной пайке в вакууме разлагается на кислород и металл. Поэтому пайка никеля и его сплавов не вызывает затруднений. Обычно для высокотемпературной пайки этих материалов используют припои и газовые среды, применяемые для пайки меди и ее сплавов. Для низкотемпературной пайки никеля пригодны оловянно-свинцовые припои, содержащие 40–50 масс. доли % олова и флюсы, рекомендуемые для пайки сталей.

На сплавах никеля, легированного хромом, алюминием, титаном и другими металлами, образуется комплекс окислов соответствующих металлов. Химическая стойкость окислов при этом возрастает, что влечет за собой ряд затруднений при пайке. Так, при пайке этих материалов в восстановительной и нейтральных средах последние необходимо дополнительно очищать от остатка кислорода и влаги. Для получения качественной пайки никелевые сплавы, легированные алюминием, хромом, титаном, покрывают слоем никеля

толщиной 7–10 мкм, который обеспечивает хорошее смачивание паяемых поверхностей в вакууме и нейтральных средах без применения флюсов.

При использовании меди в качестве припоя при пайке никеля следует учитывать, что паяемый металл значительно растворяется в припое и поэтому необходимы строгая дозировка припоя и пайка без перегрева.

Пайка алюминия и его сплавов. Алюминий считается труднопаяемым металлом из-за наличия на нем плотной пленки химически стойкого окисла  $Al_2O_3$ . Окисная пленка  $Al_2O_3$  имеет температуру плавления 2050 °С и ее не удается разрушить флюсами, применяемыми при пайке меди или сталей. Для осуществления процесса пайки окисную пленку необходимо предварительно удалять и предотвращать ее образование при нагреве. Обычно перед пайкой алюминий травят в щелочах и кислотах, а в процессе пайки применяют высокоактивные флюсы, содержащие хлориды щелочных металлов и фтористые соединения. При пайке электронных приборов такие флюсы не всегда применимы.

Так как защитить алюминий от окисления ввиду его активности практически нельзя, а образующуюся окисную пленку удалить без флюса трудно, целесообразно наносить на алюминий слой другого металла, который будет прочно сцепляться с ним, хорошо смачиваться припоями и не требовать применения высокоактивных флюсов. Обычно в качестве таких покрытий используют медь или никель. Медное покрытие прочно сцепляется с алюминием и хорошо смачивается жидкими припоями в восстановительных средах. Однако при нагреве медное покрытие реагирует с алюминием и образует легкоплавкое и хрупкое соединение при температуре 549 °С. Никелевое покрытие, нанесенное из химического раствора, имеет высокую прочность сцепления с алюминием, обладает коррозионной стойкостью и хорошо смачивается жидкими припоями. При малой толщине (до 10 мкм) покрытие недостаточно прочно. Высококачественный спай получается при толщине покрытия, равной 15–17 мкм.

Пайка сталей. Степень сложности пайки сталей в значительной мере определяется их составом. Пайка низкоуглеродистых сталей не вызывает особых трудностей и может быть осуществлена большинством известных способов. Окисная пленка, образующаяся на поверхности этих сталей, химически нестойкая. Она легко восстанавливается в газовых средах и растворяется большинством флюсов, рекомендованных для пайки сталей.

При низкотемпературной пайке применяют оловянно-свинцовые припои: ПОС40, ПОС61. В качестве флюсов могут быть использованы флюсы, активированные хлоридами цинка, олова, меди, кадмия.

Для улучшения качества паяных соединений из низкоуглеродистых сталей соединяемые поверхности деталей иногда предварительно подвергают лужению с применением водных растворов хлористого цинка, после чего тщательно удаляют остатки флюса. Изделия паяют после лужения с флюсами, остатки которых не вызывают существенной коррозии, например со спиртоканифольным флюсом.

Высокотемпературную пайку низкоуглеродистых сталей в электровакуумных приборах выполняют обычно медью, а также золотомедными и золотоникелевыми припоями. Медно-серебряные припои типа ПСр72 плохо смачивают стали. Для повышения смачивающей способности к медно-серебряным припоям добавляют присадки палладия. Пайка осуществляется в печи с восстановительной атмосферой.

Пайка нержавеющей сталей несколько затруднена. В связи с высоким содержанием хрома поверхность этих сталей покрыта химически стойкой окисной пленкой, состоящей в значительной части из трудноудаляемых окислов хрома.

При низкотемпературной пайке нержавеющей сталей оловянно-свинцовыми припоями спиртоканифольные флюсы непригодны. Непригодны и спиртоканифольные флюсы с небольшими добавками хлористого цинка и хлористого аммония. Обычно применяются спиртоканифольный флюс с добавкой ортофосфорной кислоты либо высокоактивный флюс, состоящий из

38–40 %-го водного раствора хлористого цинка и насыщенного раствора соляной кислоты. Однако эти флюсы можно применять только при пайке паяльником или газовой горелкой, когда за процессом можно наблюдать визуально и флюс в процессе пайки можно добавлять по мере необходимости.

Пайка нержавеющей сталей облегчается при нанесении на них технологических покрытий, которые без затруднения паяются низкотемпературными и высокотемпературными припоями. В качестве таких покрытий используют медь, никель, серебро.

#### Пайка активных и тугоплавких металлов. Пайка титана и циркония.

Эти металлы используются в основном в конструкциях электровакуумных приборов и поэтому подвергаются только высокотемпературной пайке. Особенностью этих металлов являются их активность по отношению к газам: к кислороду, азоту, водороду и другим, кроме инертных. При взаимодействии с газами эти материалы образуют разнообразные соединения, значительно ухудшающие механические свойства швов. Кроме того, на поверхности таких металлов образуются пленки окислов, нитридов, гидридов, несмачивающихся припоями. Поэтому паять эти металлы следует в вакууме не ниже  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. ( $6,65 \cdot 10^{-3}$  Па) или в среде особо чистых аргона или гелия.

Другая особенность пайки титана и циркония состоит в том, что они вступают в реакцию с подавляющим большинством металлов, содержащихся в припоях (серебро, золото, медь, никель), образуя с ними нежелательные соединения, ухудшающие свойства паяных швов. Эти соединения уменьшают прочность спаев и значительно понижают допустимую температуру последующих нагревов паяных соединений.

Повышение механических свойств паяных соединений этих металлов достигается предварительным покрытием их поверхности слоем другого металла. С помощью такого слоя предотвращается непосредственный контакт паяемого металла и припоя во время пайки и, следовательно, возможность образования нежелательных соединений. В качестве покрытий на титане под пайку припоями на серебряной основе чаще всего рекомендуется использовать

серебро, медь, рений, а на цирконии – никель. Основное требование к этим покрытиям – прочное сцепление с титаном и цирконием.

Детали с нанесенным покрытием могут быть спаяны припоями, смачивающими эти покрытия.

Пайка молибдена и вольфрама. Эти материалы имеют высокую температуру плавления и используются в катодных узлах электровакуумных приборов, обеспечивая их работу при температуре выше 1000 °С.

Основные затруднения при пайке этих металлов возникают из-за большого их сродства с кислородом, а также склонности к охрупчиванию при нагреве до высоких температур. По этим причинам пайку молибдена и вольфрама необходимо производить в глубоком вакууме или среде аргона, тщательно очищенном от кислорода и паров воды.

Для высокотемпературной пайки тугоплавких металлов применяют в качестве припоев чистые металлы: тантал, ниобий, никель, медь и их сплавы. Для улучшения смачивания вольфрама и молибдена расплавленными припоями иногда их предварительно покрывают никелем или медью. Толщина никелевого слоя не должна быть больше 3 мкм, медного – 3–4 мкм; при большей толщине возможно отслаивание покрытия. Для улучшения сцепления покрытия с тугоплавким металлом производят термообработку в вакууме.

При использовании в качестве припоя чистой меди следует учитывать, что она плохо смачивает и растекается по поверхности молибдена и вольфрама. Для улучшения смачивающей способности медь легируют кобальтом, железом, марганцем, никелем, палладием. Количество легирующих добавок в медных припоях не должно превышать 4–5 масс. доли %. Увеличение содержания добавок в припое приводит к снижению механических свойств паяного соединения.

Пайка металла с керамикой. Керамика широко применяется при изготовлении электронных приборов в качестве изолирующего материала. Керамический материал обладает следующими свойствами: имеет относительно высокую механическую и электрическую прочность, низкие диэлектрические потери при высокой температуре, обладает термостойкостью,

вакуумной плотностью, способностью образовывать вакуумно-плотные соединения с металлами.

Керамический материал состоит из зерен окислов алюминия или циркония (основа), которые соединены между собой стеклофазой, представляющей собой другие окислы, имеющие более низкую температуру размягчения, чем основа.

При соединении керамики с металлами применяют в основном два метода: пайку с использованием металлизационного покрытия керамики и пайку без нанесения металлопокрытий.

В электровакуумном производстве наибольшее распространение нашла технология с использованием предварительно нанесенного покрытия. Для этого на поверхность керамики наносят пасту из порошков тугоплавких металлов и вжигают их. В результате вжигания на поверхности керамической детали получается шероховатое металлическое покрытие, которое смачивается высокотемпературными припоями. Обычно используется молибдено-марганцевая паста, состоящая из 80 масс. доли % молибдена и 20 масс. доли % марганца. Металлизационная паста, нанесенная на керамику, вжигается в смеси азота и водорода (3:1) при температуре 1300–1600 °С, в результате спекания образуется прочное соединение между керамикой и металлическим слоем. В качестве припоев для пайки керамики с металлом обычно используются серебро, медь, медно-серебряные и золотоникелевые сплавы (ПСр72, ПЗлМн35, ПЗлМ37, ПЗлМ35, ПЗлН82.5).

Перед пайкой припоями ПСр72, ПЗлМ37, ПЗлМ35 на молибдено-марганцевый слой гальванически наносится никель толщиной 2–3 мкм, который улучшает растекаемость припоев по металлизированной поверхности.

Остальные припои удовлетворительно смачивают металлизированную поверхность керамики и хорошо заполняют зазоры между соединяемыми деталями без дополнительного покрытия.

Нагрев под пайку рекомендуется осуществлять в среде сухого водорода или смеси азот–водород.

Металлические детали, подлежащие пайке с керамикой, изготавливаются чаще всего из ковара (сплав железо-никель-кобальт) или из меди. Все применяемые металлические материалы хорошо смачиваются перечисленными припоями и поэтому не требуют специальной подготовки.

Пайку металлокерамических узлов производят в печах, обеспечивающих медленный (не более 10–15 °С/мин) и равномерный нагрев, а также достаточно точный контроль температур. Скорость охлаждения узлов после пайки не должна превышать 10–15 °С/мин. Выдержка при температуре пайки обычно не превышает 5 минут.

В отличие от пайки по металлизации второй метод соединения керамики с металлами называют активным или непосредственным. Известно, что такие металлы, как титан и цирконий, при высокотемпературном нагреве активно взаимодействуют не только с газами и металлами, но и со многими химическими соединениями, входящими в состав керамики; в результате появляется возможность получать паяные соединения металла с керамикой без ее металлизации.

При пайке активный металл в зону соединения может вноситься либо в виде порошка чистого титана или циркония, либо в составе припоя. Иногда соединяемая с керамикой деталь изготавливается из титана или циркония, которые служат поставщиками активного металла в припой, который растворяет их в процессе пайки.

Для пайки с титаном применяется бериллиевая и алюмооксидная керамика различных марок. В качестве припоя чаще всего используется сплав ПСр72. применяются также чистые медь и никель, которые в процессе нагрева под пайку образуют с титаном низкоплавкие соединения, смачивающие керамику, а также медно-титановые и никель-титановые сплавы в виде порошков или биметаллов.

Условием получения высококачественного соединения «титан–керамика» является, возможно, более плотное прилегание титановой детали к керамической в момент пайки.

Пайка металлокерамических соединений должна осуществляться в печах с разрежением не ниже  $10^{-4}$  мм. рт. ст. ( $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па). Подъем температуры пайки должен производиться со скоростью не более 15–20 °С/мин. Максимальная температура пайки на 20–40 °С выше температуры расплавления припоя или образования самого низкоплавкого соединения с активным металлом. Скорость охлаждения после пайки должна быть не более 10 °С/мин.

#### **4.6. Оборудование для пайки изделий электронного машиностроения**

Из-за большого разнообразия условий выполнения операций пайки деталей и узлов конструкции существующего оборудования различны.

Поскольку условия выполнения низкотемпературной и высокотемпературной паяк сильно отличаются, следует отдельно рассматривать оборудование, применяемое для выполнения этих операций.

Оборудование для высокотемпературной пайки. Высокотемпературная пайка при изготовлении электронных приборов выполняется без применения флюсов. При пайке приборов используются чаще всего печи периодического действия, в которых загрузка деталей производится после полной выгрузки предыдущей партии деталей по окончании рабочего цикла, либо печи непрерывного действия, в которых загрузка и выгрузка паяемых деталей производится в течение рабочего цикла непрерывно или с определенным ритмом. Нагрев и охлаждение деталей в процессе пайки осуществляются в вакууме, в восстановительной либо в нейтральных средах.

В состав оборудования для высокотемпературной пайки входят следующие основные устройства и системы:

- нагревательное устройство с источником питания и системой контроля и управления температурой;
- система создания защитной атмосферы (вакуума, восстановительной или нейтральной среды);
- устройство для размещения и подачи деталей в рабочую зону установки;

– система для визуального наблюдения и контроля над процессом.

В настоящее время при проведении высокотемпературной пайки широко применяют колпаковые печи различных типов, а также конвейерные и толкательные водородные печи. На рис. 150 представлена схема вакуумной высокотемпературной печи сопротивления с экранной теплоизоляцией и водоохлаждаемым колпаком 1.

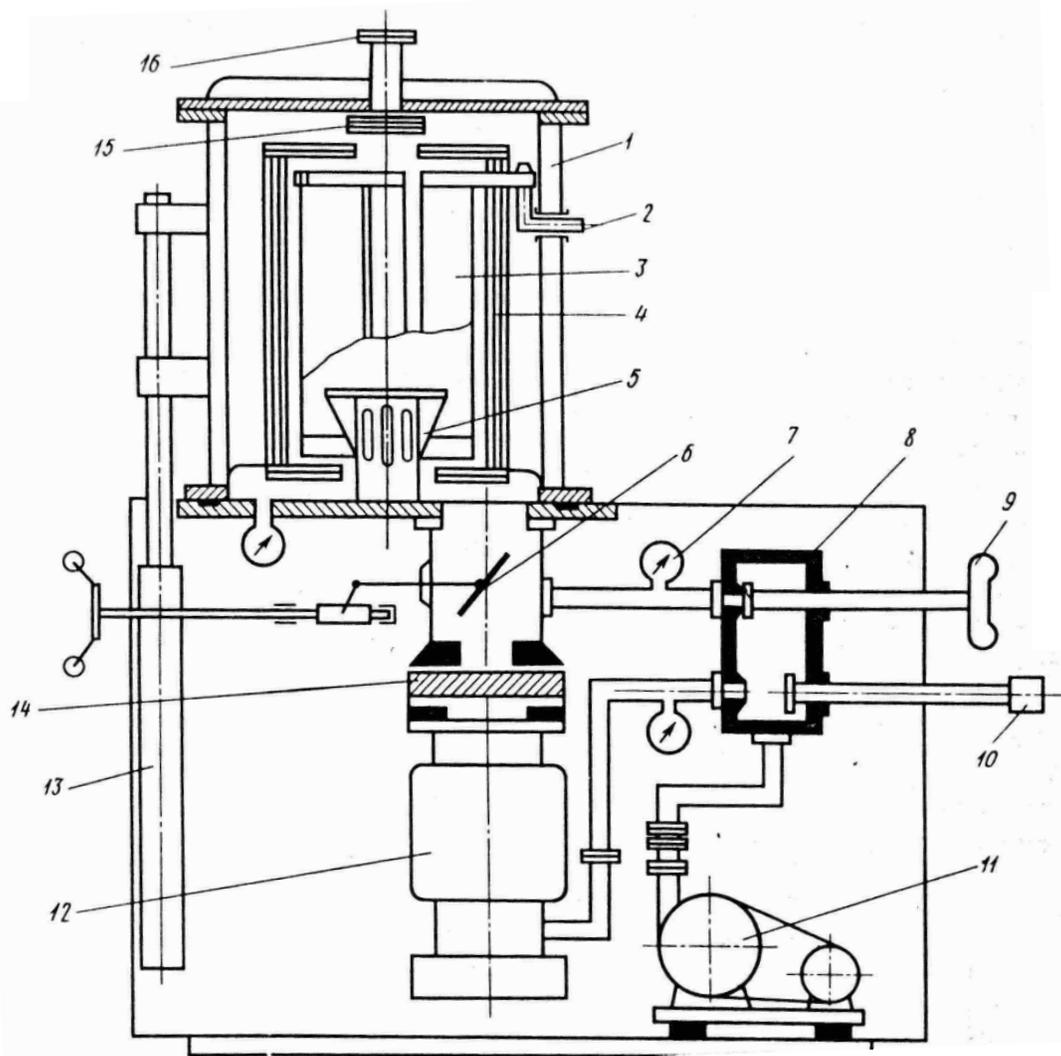


Рис.150. Схеме вакуумной высокотемпературной печи сопротивления с экранной теплоизоляцией и водоохлаждаемым колпаком

Нагревательные элементы 3 в виде разрезного цилиндра и теплоизоляционные экраны 4 выполнены из листового материала. Нагревательные элементы обычно изготавливаются из молибдена, а экраны – из нихрома (при рабочей температуре 900–1000 °С) и молибдена

(при 1600–1700 °С). Вверху нагреватель подвешивается на консолях из тугоплавкого металла, которые проходят через прорези в экранах и присоединяются к медным водоохлаждаемым токоподводам 2, выходящим наружу через вакуумные уплотнения. Внизу секции нагревателя объединяются кольцом из тугоплавкого металла.

Для получения рабочего вакуума применяется откачная система, состоящая из механического форвакуумного 11 и высоковакуумного паромасляного 12 насосов. Для предотвращения попадания в рабочую камеру паров масла из паромасляного насоса на впускной фланец последнего устанавливается азотная ловушка 14, питаемая от сосуда Дьюара. Различные переключения в вакуумной системе осуществляются с помощью клапанов 9 и 10, коробки 8, а также высоковакуумным затвором 6. Для измерения давления на участках вакуумной системы установлены манометрические лампы 7.

Установка паяемых деталей на рабочем столике 5 производится при поднятом колпаке. Для подъема колпака применяют электромеханический или гидравлический привод 13. На крышке колпака имеется окно 16 для наблюдения за процессом пайки, герметично закрытое стеклом со шторками 15, защищающими стекло от нагрева. Управляются шторки специальным устройством.

Для создания и поддержания заданных технологических режимов печь оснащена электрооборудованием и системами управления нагревом и охлаждением, а также средствами создания защитной среды. Колпаковые печи для пайки в защитных газовых средах отличаются от вакуумных способом создания защитной атмосферы. При этом возможны два способа создания защитной атмосферы в рабочей зоне печи: с предварительной откачкой и последующим наполнением рабочего объема защитным газом и способом вытеснения.

На рис. 151 представлена газовакуумная схема системы создания защитной атмосферы в рабочем объеме печи.

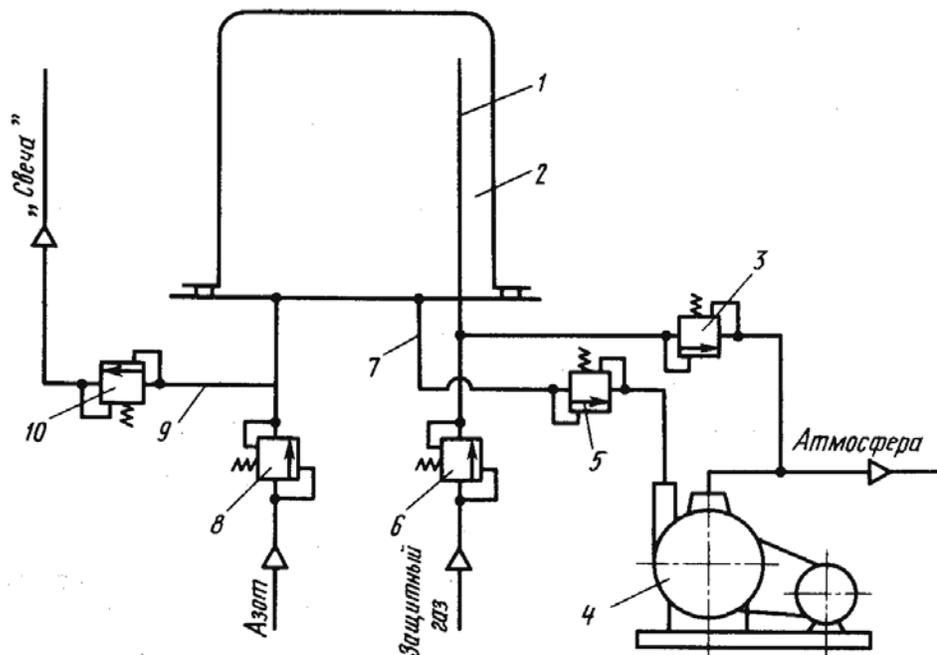


Рис. 151. Газовакуумная схема системы создания защитной атмосферы в рабочем объеме печи

При создании контролируемой защитной атмосферы вакуумным насосом предварительно откачивается воздух из рабочей камеры 2. При этом воздух через трубопровод 7 и электромагнитный клапан 5 откачивается форвакуумным насосом 4. При достижении определенной степени разрежения клапан 5 закрывается и защитный газ через клапан 6 и трубопровод 1 подается в рабочую камеру 2.

Способ вытеснения предусматривает последовательную продувку камеры азотом, а затем защитным газом. Азот подается через клапан 8 и вытесняет воздух из рабочего объема через трубопровод 1 и клапан 3 в атмосферу. Затем производится напуск защитного газа через клапан 6 и трубопровод 1. Азот при этом вытесняется через трубопровод 9 и клапан 10. Такая система применяется чаще всего для заполнения камеры водородом. Так как водород является самым легким газом, то его необходимо подавать в печное пространство сверху. А отбор водорода с установкой контрольной «свечи» производится в самой нижней точке газонаполненной полости. При этом в печи не возникает «карманов», заполненных воздухом (в которых может образоваться

взрывоопасная смесь), и значительно быстрее происходит заполнение рабочего объема водородом.

На рис. 152 представлена конвейерная электропечь, предназначенная для пайки в среде водорода.

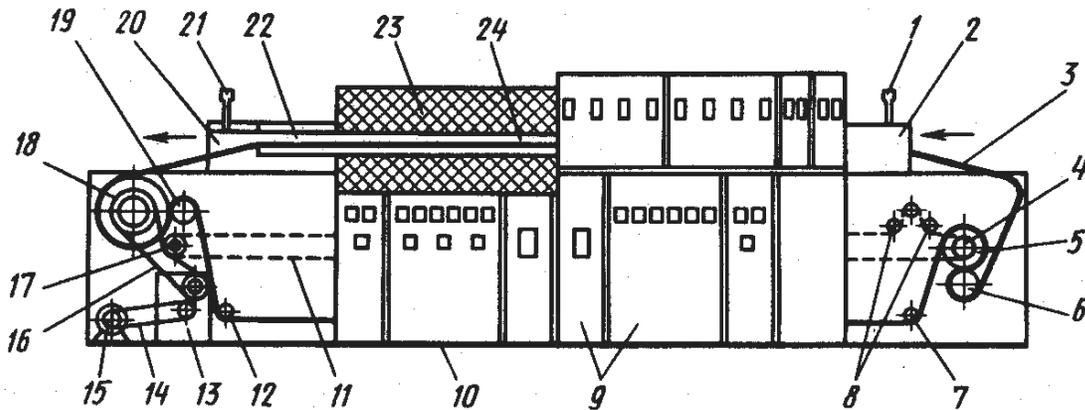


Рис. 152. Схема конвейерной электропечи:

1, 21 – трубки для отвода газа, 2 – камера загрузки, 3 – конвейерная лента, 4 – ведомая звездочка, 5 – ведомый барабан, 6, 19 – прижимные ролики, 7, 12 – направляющие ролики, 8 – натяжные ролики, 9 – панели, 10 – основание, 11, 16 – цепная передача, 13 – редуктор, 14 – клиноременная передача, 15 – электродвигатель, 17 – ведущая звездочка, 18 – ведущий барабан, 20 – холодильники, 22 – камера выгрузки, 23 – нагревательная камера, 24 – рабочий канал

Конвейерная электропечь состоит из основания 10, камер загрузки 2 и выгрузки 22, привода конвейерной ленты 3, нагревательной камеры 23, рабочего канала 24 и холодильника 20. Кроме того, электропечь имеет газовую систему и систему электропитания с автоматическим регулированием температуры.

Основание 10 представляет собой сварной металлический каркас, закрытый декоративными панелями 9 с отверстиями для установки приборов. В передней части печи располагается металлическая сварная камера загрузки деталей 2. Загрузочная камера продувается азотом, создающим завесу, препятствующую соединению воздуха с водородом. Для отвода и сжигания водорода, выходящего из печи, в загрузочной камере имеется трубка 1. Камера загрузки может перемещаться по основанию на роликах при удлинении или

сжатию рабочего канала соответственно при его нагреве и охлаждении. Камера выгрузки по устройству аналогична камере загрузки.

Привод конвейерной ленты 3 состоит из электродвигателя 15 постоянного тока и червячного редуктора 13, связанных клиноременной передачей 14. Червячный редуктор через цепную передачу 16 приводит во вращение ведущий барабан 18 конвейерной ленты. Для увеличения угла охвата конвейерная лента прижимным роликом 19 смещена в сторону ведущего барабана 18. От ведущего барабана она проходит по направляющим роликам 12, ведомому барабану 5 с прижимным роликом 6 к камере загрузки 2, рабочему каналу 24, камере выгрузки 22 и, опираясь на направляющие ролики 7, возвращается на ведущий барабан 18 и прижимной ролик 19. Для плавного (без рывков и вибраций) перемещения конвейерной ленты в приводе предусмотрено подмоточное устройство, которое также приводится в действие от червячного редуктора 13 через цепную передачу 11 и ведущую звездочку 17. От звездочки 17 цепь передачи подходит к ведомому барабану 5, на ось которого насажена ведомая звездочка 4 с обгонной муфтой, и через натяжные ролики 8 возвращается к приводу. Подмоточное устройство постоянно подтягивает нижнюю часть конвейерной ленты, устраняя рывки. Когда скорость подмотки оказывается больше скорости конвейерной ленты (возрастает усилие на ведомом барабане), обгонная муфта делает холостой ход, и скорости уравниваются.

Нагревательная камера 23 имеет цилиндрическую форму и состоит из стальных крышки и основания, соединенных между собой по образующей через асбестовые прокладки болтовыми стяжками. Нагреватели в виде проволочных петель закреплены в футеровке рабочего канала. Токовводы от нагревателей и термопар выведены через специальные уплотнения нагревательной камеры. Через нагревательные камеры проходит цельносварной рабочий канал арочной формы, который жестко закреплен со стороны камеры выгрузки и опирается на катки со стороны камеры загрузки, поэтому может удлиняться и укорачиваться соответственно при нагреве и охлаждении,

выполняя функцию теплового демпфера. Холодильники служат для снижения температуры изделий, выходящих из печи.

Газовая система обеспечивает подачу водорода в рабочий канал, для создания азотных завес на входе камеры загрузки и выходе разгрузочной камеры, а также подачу других газов и их смесей в электропечь.

Оборудование для низкотемпературной пайки. Оборудование для низкотемпературной пайки электронных приборов значительно отличается от оборудования для высокотемпературной пайки. Это отличие обусловлено прежде всего значительным числом применяемых источников нагрева, разнообразием паяных конструкций и требованиями, предъявляемыми к паяным соединениям.

Если в печах для высокотемпературной пайки обрабатываются любые детали, то при низкотемпературной пайке оборудование специализируется под соединения определенной конструкции для:

- пайки выводов микросхем;
- пайки кристалла в корпус прибора или на плату;
- герметизации корпусов приборов;
- пайки печатных плат и т. д.

Особенностью оборудования для низкотемпературной пайки является отсутствие устройств, обеспечивающих общую защиту места соединения от воздействия окружающей среды. При низкотемпературной пайке процесс осуществляется, как правило, на воздухе с использованием флюсов или струйной защиты инертным газом.

Механизмы и системы оборудования для низкотемпературной пайки выполняют следующие функции:

- подают паяемые детали к месту пайки;
- перемещают и нагружают инструменты;
- нагревают инструмент и изделие;
- подают защитный газ;
- обеспечивают визуальное наблюдение за процессом.

В качестве примера рассматривается оборудование для посадки кристалла в корпус прибора. Соединение кристалла с корпусом осуществляется с помощью контактно-реакционной пайки, основанной на явлении контактного плавления соединяемых материалов – кремния и золота, нанесенного в виде покрытия на поверхность основания корпуса.

Схема процесса контактно-реакционной пайки показана на рис. 153, а. Основание корпуса прибора 4 крепится на нагревательном столике 5. Кристалл 3 захватывается инструментом 2 и центрируется наклонными рабочими площадками, расположенными обычно под углом  $90^\circ$  (рис. 153, б). Углубление в наконечнике служит для предотвращения относительного сдвига кристалла и инструмента при подаче на инструмент механических колебаний от вибратора или ультразвукового преобразователя. Высота усеченной пирамиды наконечника инструмента рассчитывается так, чтобы половина толщины кристалла выступала из-под торца инструмента.

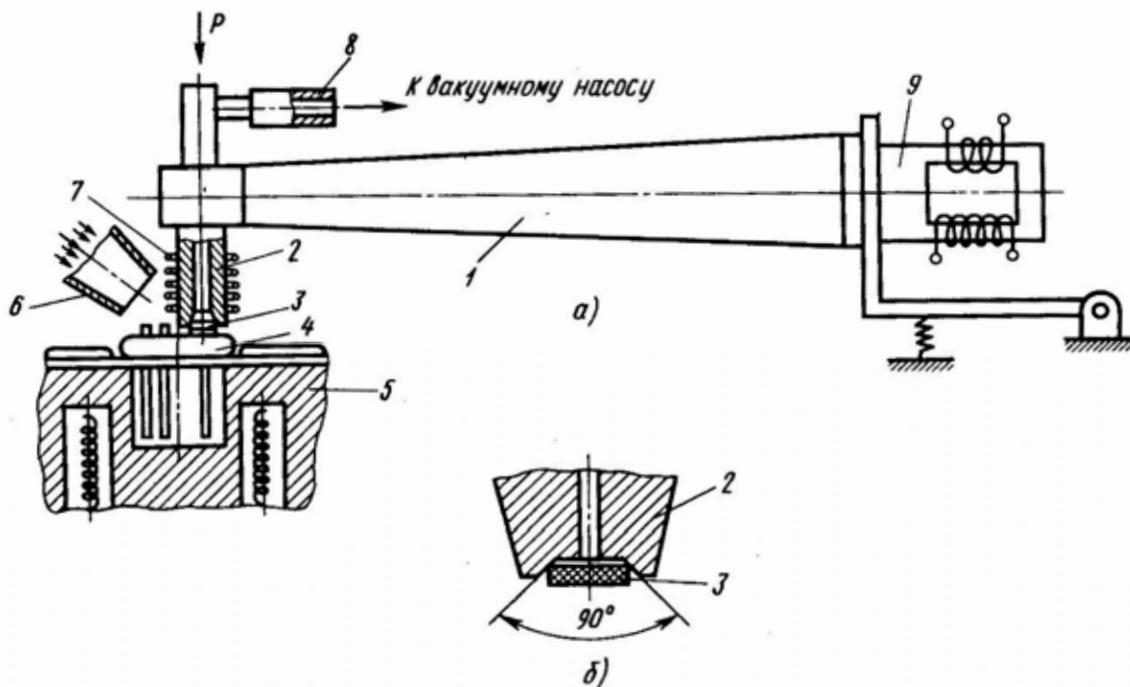


Рис.153. Схема процесса контактно-реакционной пайки кристалла с корпусом (а) и конфигурация наконечника инструмента (б): 1 – держатель инструмента, 2 – инструмент, 3 – кристалл, 4 – основание корпуса, 5 – нагревательный столик, 6 – сопло защитного газа, 7 – нагреватель инструмента, 8 – вакуумная трубка, 9 – вибратор

При этом усилие захвата (удержание кристалла) создается вследствие перепада давления (атмосферного и разрежения в капилляре инструмента). Приведенные в соприкосновение кристалл и основание корпуса нагреваются до температуры пайки (400–420 °С). Столик нагревается при этом до более высокой температуры, чем инструмент.

Процесс осуществляется без применения флюсов с использованием струйной защиты нейтральным газом, подаваемым через сопло б к месту пайки. Для разрушения и удаления окисных пленок с поверхности соединяемых деталей, а также для равномерного распределения образующейся жидкой фазы инструменту придают возвратно-поступательное движение от вибратора 9. При монтаже кристаллов небольших размеров (3×3 мм) используют как ультразвуковые, так и низкочастотные колебания, а для кристаллов больших размеров – в основном низкочастотные с большой амплитудой (до 0,5–0,8 мм).

Процесс контактного плавного полупроводника и золота зависит от рабочей температуры столика, температуры инструмента, усилия прижатия инструмента, продолжительности процесса, амплитуды колебаний инструмента, расхода защитного газа.

Существенное влияние на характеристики соединения оказывают состояние поверхности и толщина золотого покрытия корпуса. Экспериментально установлено, что для образования качественного соединения толщина золотого покрытия должна быть не менее 3 мкм.

Об окончании процесса пайки судят по образованию жидкой фазы по периметру кристалла.

В современных установках для присоединения кристалла к основанию корпуса все операции осуществляются автоматически, в том числе вспомогательные: подача кристалла, захват кристалла с помощью вакуумного инструмента, перенос кристалла на позицию пайки, подача корпуса, опускание инструмента в заданную точку. Схема одного из автоматов для присоединения кристалла приведена на рис. 154.

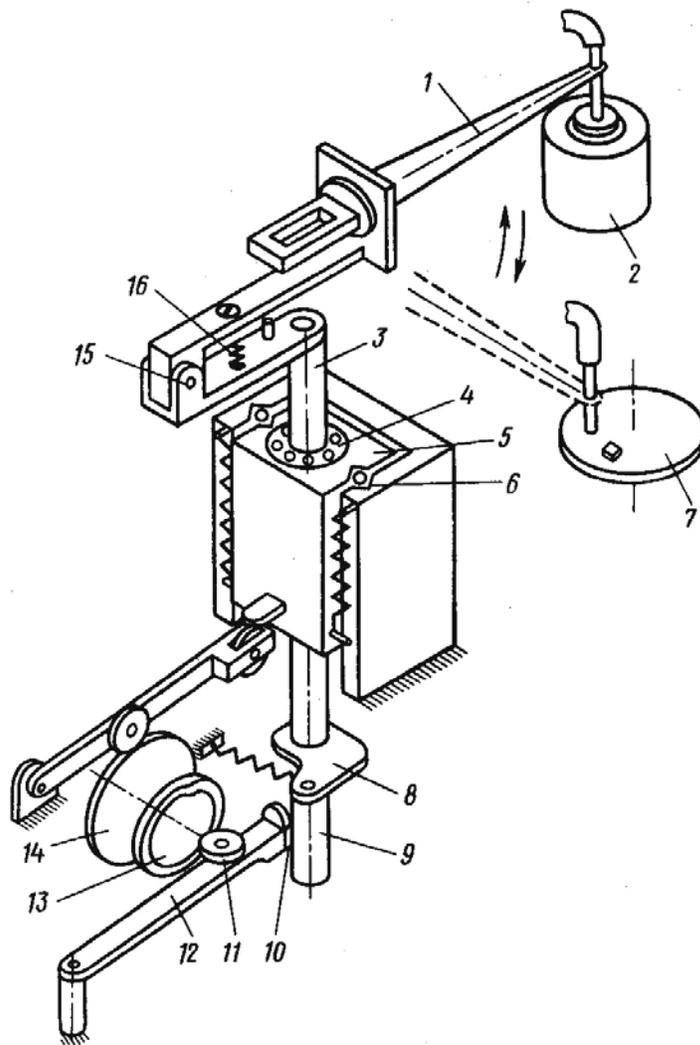


Рис. 154. Схема установки для посадки кристаллов в корпус контактно-реакционной пайкой

Паяльная головка 1 установлена с возможностью поворота вокруг оси шарнира 15, а также вокруг вертикальной оси стойки 3, вращающейся в подшипниках 4. Наружные обоймы подшипников 4 укреплены в ползуне 5, который, в свою очередь, имеет возможность вертикального возвратно-поступательного перемещения в направляющих 6. Перемещения осуществляются от кулачков 13 и 14, установленных на распределительном валу автомата. Кулачок 14 служит для подъема и опускания головки по направляющим 6. Торцовый кулачок 13 посредством роликов 11 и 10, установленных на водиле 12, воздействует на упор 9, установленный в кулисе 8, соединенный со стойкой 3. За один поворот кулачка 13 кулиса 8 вместе со стойкой 3 и паяльной головкой 1 совершает поворот на некоторый угол вокруг

вертикальной оси, необходимый для захвата кристалла из кассеты 7, и возвращается в исходное положение.

За тот же оборот распределительного вала головка от кулачка 14 поднимается вертикально, затем опускается на кассету (показано пунктиром), далее вновь поднимается с кристаллом на торце инструмента и опускается, подавая кристалл в заднюю точку на корпусе прибора, установленного на нагревательном столике 2. Инструмент представляет собой вакуумное захватывающее приспособление для переноса и прижима кристалла.

Конфигурация рабочей части наконечника инструмента определяется размерами кристалла. Наибольшее распространение получил инструмент с прямым хвостовиком, имеющий наконечник с центральным отверстием для подвода вакуума и углублением для крепления кристалла (рис. 153, б).

Давление на инструмент в процессе пайки, а также при захвате кристалла из кассеты создается массой головки с частичной компенсацией ее регулируемой пружиной 16. Подача колебаний на инструмент, защитного газа (на рисунке не показано), а также разрежения в полость инструмента для захвата кристалла осуществляется автоматически по командам от соответствующих кулачков на распределительном валу.

Производительность автоматов для посадки кристаллов в корпус составляет 600 кристаллов в час и выше.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое пайка?
2. Из каких основных стадий состоит процесс образования паяного соединения?
3. По каким признакам классифицируются способы пайки?
4. Какие источники нагрева используются при пайке?
5. Какие материалы применяются при пайке?
6. Какие типы паяных соединений применяются в конструкциях электронных приборов?

7. Какие основные этапы выполняются при проведении процесса пайки?
8. Каковы особенности пайки материалов изделий электронной пайки?
9. Какие основные устройства и системы входят в состав оборудования для высокотемпературной пайки?
10. В чем заключаются особенности оборудования для низкотемпературной пайки?

# ГЛАВА 5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

## 5.1. Общие сведения о контроле качества изделий электронного машиностроения

Высокие требования, предъявляемые к электронным приборам, определяют использование разнообразных и надежных методов контроля качества сварных и паяных соединений.

Большинство известных методов оценки качества сварных и паяных соединений используют при контроле соединений на различных этапах проектирования и изготовления электронных приборов: в процессе разработки, изготовления, испытаний готовой продукции, анализа брака и рекламаций. Выбор эффективных методов контроля качества соединений в электронных приборах – один из важнейших вопросов их производства.

Методы контроля качества по воздействию на соединение можно подразделить на два класса: с разрушением при испытании соединений технологических образцов или узлов приборов выполняется в процессе отработки технологических режимов, а также при контрольно-выборочных и проверочных испытаниях и при анализе брака и рекламаций; без разрушения соединений и готовых приборов.

К методам контроля с разрушением соединений относятся: механические испытания; исследования структуры и химического состава с использованием металлографических и электронных микроскопов и микрозондов; испытания на повторные нагревы (термоциклирование), коррозионные испытания.

К методам контроля без разрушения соединений обычно относят: визуальный осмотр соединений и готовых приборов; просвечивание рентгеновскими лучами; испытание на герметичность; определение характера распределения температуры работающего прибора с помощью тепловизоров.

Кроме этого сварные и паяные соединения в готовых приборах проходят климатические и механические испытания, проводимые при определении

стойкости электронных приборов к внешним воздействиям и при исследовании влияния факторов окружающей среды на параметры и свойства прибора.

К механическим относят испытания готового прибора на виброустойчивость, вибропрочность, ударную прочность и на воздействие линейного ускорения.

К климатическим относят испытания воздействия на готовый прибор теплоты, холода, влаги, морского тумана, плесневых грибов, а также пыли, инея, росы, повышенного атмосферного давления, солнечной радиации.

Требования, нормы и методы механических и климатических испытаний, которым должны соответствовать электронные приборы, установлены стандартами или техническими условиями. Однако ни один из перечисленных методов не универсален. Поэтому важен не только правильный выбор метода контроля, но и комбинирование ряда методов, сочетание неразрушающих и разрушающих испытаний.

## **5.2. Оценка качества соединений и приборов методами неразрушающего контроля**

Контроль внешним осмотром. Одним из основных средств отбраковки потенциально ненадежных изделий является контроль соединений внешним осмотром. Такой контроль позволяет, например, выявлять следующие дефекты, возникающие при сборке микросхем: отслоение металлизации контактных площадок, обрыв проволочного вывода в месте пережима, смещение вывода при сварке, неудовлетворительные размеры соединений и т. д.

Для визуального контроля используются бинокулярные стереоскопические микроскопы, оптические и телевизионные проекционные устройства, растровые электронные микроскопы.

Наиболее распространенным прибором для визуального контроля дефектов соединений является бинокулярный стереоскопический микроскоп. Бинокулярное зрение обеспечивает объемное восприятие объекта контроля и вследствие этого более точную оценку расстояний и взаимного расположения

контролируемых объектов, чем монокулярное. Кроме того, растет информативность изображения, устраняются ошибки наблюдения пересечений на различных уровнях, улучшается различие плоскостных и объемных дефектов. В промышленности широко используется микроскоп МБС-9.

Применяемые для контроля качества соединений бинокулярные микроскопы имеют существенный недостаток: оператор, работающий длительное время с микроскопом, быстро утомляется, вследствие чего качество выполнения операции снижается. Поэтому для облегчения труда операторов и повышения производительности труда целесообразно использовать другие оптические приборы. В этом отношении весьма эффективны приборы, дающие возможность вести наблюдения на проекционном экране, где контролируемое изделие изображается в увеличенном масштабе. Однако небольшая яркость изображений и уменьшение разрешающей способности в этих приборах по сравнению с бинокулярными микроскопами ограничивают их применение для контроля качества соединений.

Более совершенными устройствами являются телевизионные проекторы. Возможность усиления яркости и контраста изображений, сравнительно малые световые нагрузки на изделие делают перспективным использование телевизионных проекторов для контроля соединений изделий электронной техники. В промышленности используются два типа телевизионных проекторов: КИП-1 установка контроля печатных плат и УМК-1 – установка контроля микросхем.

Для контроля изделий малых размеров используют растровые электронные микроскопы, позволяющие получать увеличения в десятки и сотни тысяч раз при большой глубине резкости.

Контроль соединений с использованием рентгеновского излучения. Рентгеновский контроль используется для выявления внутренних дефектов соединений. Этот метод основан на способности рентгеновских лучей проходить сквозь контролируемое изделие (рис. 155, а). При этом часть энергии излучения поглощается в контролируемом объекте. Количество поглощенной

энергии зависит от плотности материала и его толщины. При наличии дефекта соединения с плотностью, меньшей, чем у материала изделия, рентгеновское излучение после прохождения через объект исследования будет иметь пик интенсивности (рис. 155, б), который регистрируется специальным устройством. В практике контроля электронных приборов широко используются рентгентелевизионные микроскопы, обладающие высокой разрешающей способностью и контрастной чувствительностью, что позволяет детально исследовать сварные и паяные соединения.

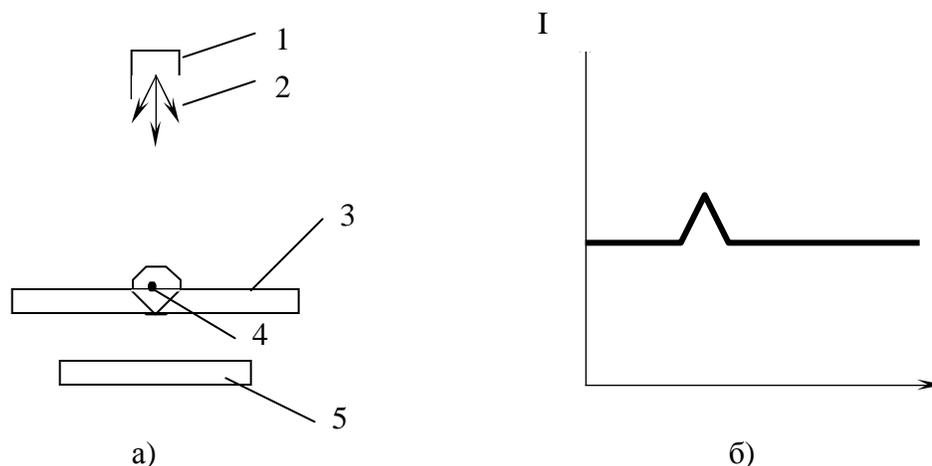


Рис. 155. Схема рентгеновского контроля (а) и изменение интенсивности рентгеновского излучения  $I$  после прохождения через контролируемый объект (б): 1 – источник рентгеновского излучения, 2 – рентгеновские лучи, 3 – объект исследования, 4 – дефект сварного шва, 5 – устройство для регистрации рентгеновского излучения после прохождения через объект исследования

Рентгентелевизионный микроскоп представляет собой рентгеновский аппарат, сопряженный с телевизионной системой посредством преобразователя рентгеновского излучения в электрические сигналы. В качестве такого преобразователя используются рентгеновидиконы.

Принцип работы рентгентелевизионных микроскопов заключается в следующем. Поток рентгеновских лучей, создаваемый рентгеновской трубкой, проходя сквозь исследуемый объект, формирует его теневое изображение, проецируемое на фотопроводящую мишень рентгеновидикона. На мишени происходит преобразование энергии рентгеновского излучения в энергию

электрических сигналов, которые после усиления и преобразования в замкнутой телевизионной системе используются для получения увеличенного телевизионного изображения на экране кинескопа.

Рентгенотелевизионный микроскоп снабжен устройством для вращения и перемещения исследуемого объекта, что позволяет вести непрерывное изучение всех точек зоны объекта. При этом выявляются различные дефекты соединений: поры, раковины, трещины и т. д.

Контроль соединений на герметичность. Герметичность сварных и паяных соединений и ее сохранение при работе электровакуумных и полупроводниковых приборов – важная задача, так как конструкция и принцип работы электровакуумных приборов требуют наличия в них высокого вакуума. Рабочее давление газов в современных электровакуумных приборах составляет  $6,3 \times 10^{-5}$ – $6,3 \times 10^{-7}$  Па. Отсутствие или нарушение герметичности соединений прибора приводит к выходу из строя катодов, окислению электродов, возникновению дуговых разрядов и, в конечном итоге, к выходу лампы из строя.

Большинство полупроводниковых приборов и микросхем, хотя и не работают в условиях вакуума, требуют надежной их изоляции от воздействия окружающей среды и особенно от влаги. Существующие способы защиты поверхности покрытием лаком, пассивацией, оксидированием недостаточны, чтобы на длительный срок гарантировать электронно-дырочные переходы в приборах от механических повреждений и особенно от проникновения к их активной части поверхности вредных примесей. Поэтому подавляющее большинство полупроводниковых приборов и микросхем требует полной их герметизации. Незначительное нарушение герметичности полупроводникового прибора приводит к медленному изменению характеристик, иногда даже к их улучшению и лишь с течением времени к окончательному выходу прибора из строя.

Поэтому важно уметь определять степень герметичности корпусов приборов в процессе производства, чтобы отбраковывать ненадежные в работе приборы.

Газ и вредные примеси проникают внутрь приборов через места нарушения герметичности, называемые течами. Природа течей, а следовательно, и характер проникновения сквозь них газов и примесей могут быть различными. Одна из причин появления течей – сквозные дефекты сварных и паяных соединений корпусов приборов.

Условия проникания газов и вредных примесей в электровакуумные и полупроводниковые приборы, как правило, различные. В электровакуумных приборах газ проникает в откачанный объем; в полупроводниковых – внутрь корпуса при отсутствии разности давлений. На практике целесообразно применять вакуумно-технические методы определения течи и степени герметичности на все виды конструкций приборов.

В вакуумной технике течь принято характеризовать количеством воздуха, которое она пропускает в единицу времени из атмосферы в объем, откачанный до давления, пренебрежимо малого в сравнении с атмосферным, и выражать в единицах потока газа –  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ .

В настоящее время разработаны многочисленные методы обнаружения течей и аппаратура для их реализации. Современные течеискатели характеризуются способностью избирательно реагировать на то или иное вещество, носящее название пробного. Процесс поиска течи заключается в улавливании течеискателем пробного вещества, проникающего через нее. Чем выше избирательная способность прибора, чем заметнее его реакция на пробное вещество, тем больше чувствительность течеискателя. В свою очередь, реакция прибора на проникновение сквозь течь пробного вещества тем существеннее, чем сильнее это вещество отличается от воздуха по электрическим, тепловым и другим свойствам.

На рис. 156 дана классификация основных методов контроля герметичности. В верхней части схемы перечислены газообразные и жидкие

пробные вещества, в нижней – способы индикации проникшего через дефект пробного вещества.

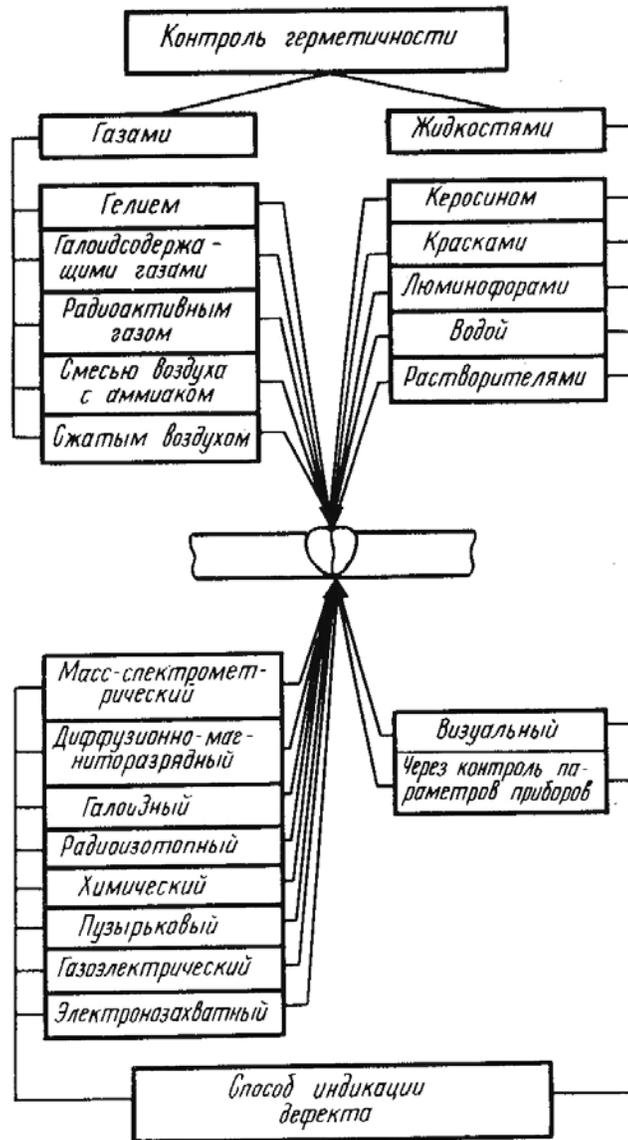


Рис. 156. Классификация основных методов контроля герметичности

В большинстве случаев газообразные и жидкие пробные вещества в процессе поиска течей обнаруживают в газовой фазе. Однако существуют методы, например люминесцентный, когда обнаруживаются непосредственно жидкие пробные вещества, проникающие сквозь материал по капилляру течи.

Чувствительность, определяющая возможность применения метода обнаружения течи для решения тех или иных задач герметизации, характеризуется минимальным потоком пробного вещества, регистрируемого

прибором. Из всех перечисленных в табл. 10 методов течеискания наиболее частое применение находят вакуумно-жидкостный, погружением в нагретую жидкость, масс-спектрометрический и электрозахватный. Первые два метода используют для обнаружения грубых течей в соединениях корпусов полупроводниковых приборов и микросхем. Для обнаружения тонких течей (примерно  $10^{-13}$  м<sup>3</sup>•Па/с) используют масс-спектрометрический метод в двух вариантах – способом обдува и с помощью вакуумированной камеры с предварительной опрессовкой изделий гелием. Электрозахватный метод может быть использован для поиска как грубых течей, так и тонких.

Таблица 10

Основные методы течеискания и их характеристики

Методы контроля герметичности	Пробное вещество	Минимальная регистрируемая течь, м <sup>3</sup> ×Па/с (порядок)
Опрессовка	Воздух (смесь воздуха с аммиаком)	$3 \times 10^{-9}$ $10^{-8}$ – $10^{-9}$
Вакуумно-жидкостный	Воздух	$10^{-9}$
Погружением в нагретую жидкость	Воздух	$5 \times 10^{-7}$
Косвенные	Вода, ацетон	$10^{-8}$
Высококачественным разрядом	Воздух, пары растворителей	$10^{-7}$
Радиоактивный	Радиоактивный газ	$10^{-12}$
Люминесцентный	Раствор люминофора	$10^{-10}$
Галоидный	Галоидсодержащие газы	$10^{-8}$
Масс-спектрометрический	Гелий	$10^{-13}$
Диффузионно-магниторазрядный	Гелий	$10^{-9}$
Электрозахватный	Воздух, гексафторид серы	$10^{-10}$

Обычно на практике необходимо определять не только наличие натекания, но и место нахождения дефекта в соединении, для того чтобы попытаться установить причину его возникновения. С помощью гелиевого течеискателя это сделать практически нельзя, так как даже при очень аккуратной работе можно указать только область нахождения течи. При необходимости проведения анализа брака место течи может быть найдено люминесцентным методом.

Этот метод основан на использовании капиллярных сил, возникающих при попадании жидкости в дефект соединения. В качестве проникающей жидкости применяют люминесцирующую жидкость (раствор люмогена золотисто-желтого в трихлорэтилене). Этой жидкостью заполняют исследуемый объем и выдерживают в таком состоянии определенное время, зависящее от размеров дефектов. Затем соединение осматривают в ультрафиолетовом свете. После того как течь обнаружена, по месту дефекта делают микрошлиф, который затем изучают под микроскопом.

### **5.3. Оценка качества соединений методами разрушающего контроля**

Механические испытания сварных и паяных соединений. Механические испытания соединений – эффективные методы контроля и оценки качества сварных и паяных соединений при обработке технологии сборки изделий. Основные методы определения механических свойств соединений и их отдельных зон устанавливаются ГОСТами и ОСТами, предусматривающими статические и ударные испытания при нормальных, а в некоторых случаях при пониженных и повышенных температурах.

Испытание на прочность образцов соединений, выполненных по выбранному технологическому процессу, позволяют оценить рациональность применения данной технологии для выполнения соединений.

При испытании образцов представляется возможным определить прочность соединения в направлении действия нагрузки на соединение в условиях эксплуатации, а исследование характера разрушения позволяет выявить слабый элемент соединения.

Изменяя размеры соединения или процесс его выполнения, можно установить воздействие различных конструктивных и технологических фактов на прочность соединения и наметить путь повышения этого показателя. Проиллюстрируем сказанное примером механических испытаний соединений

между соединительными проводниками и контактными площадками микросхем.

Для оценки качества (прочности) сварных соединений тонких проводников с пленками на плоских подложках обычно применяют механические испытания (рис. 157) на растяжение под различными углами к поверхности подложки ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ).

При таких испытаниях оцениваются механические свойства соединений и их чувствительность к надрыву в месте перехода к контактной площадке. Обычно принято считать, что прочность соединения при испытании на растяжение под углом, равным нулю (испытание на срез), должно быть не менее 70 % прочности привариваемого проводника при условии разрушения его вблизи сварной точки.

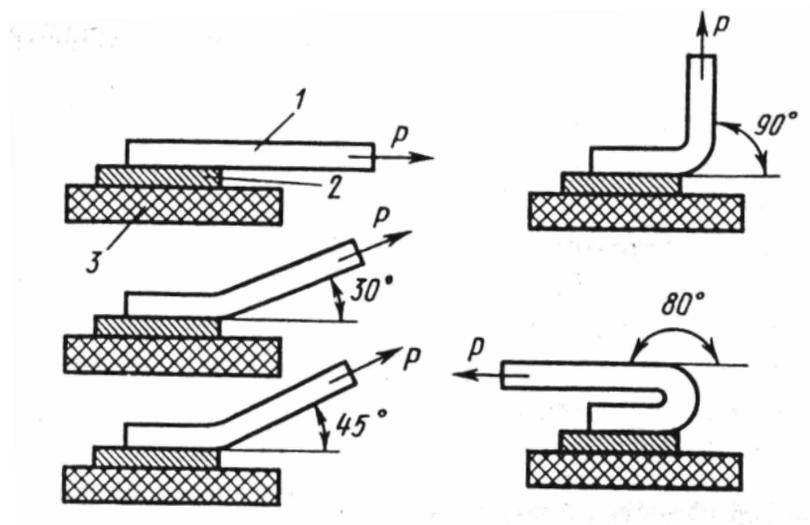


Рис. 157. Схемы испытаний на прочность соединений проводников с контактными площадками под различными углами: 1 – проводник, 2 – контактная площадка, 3 – керамическая подложка

При определении механических свойств соединений фиксируются не только усилия отрыва, но и характер разрушения (рис. 158).

Вид отрыва (рис. 158, а) свидетельствует о нарушении режима микросварки или о недостаточной очистке соединяемых поверхностей.

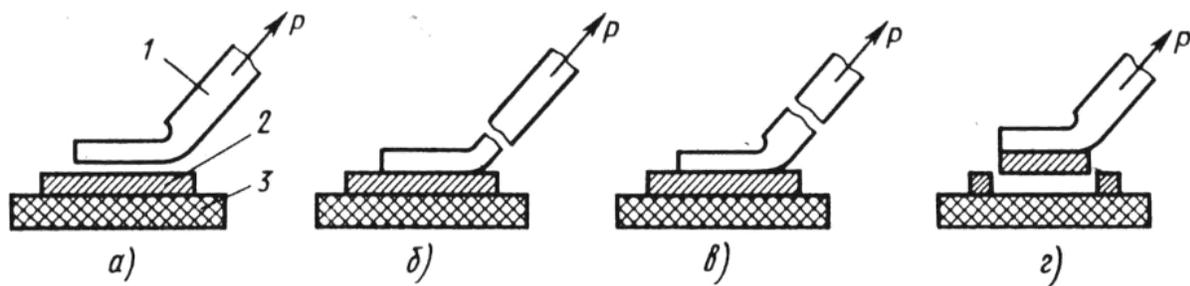


Рис. 158. Характер разрушения микросварных соединений при испытании на отрыв: а – отрыв сварной точки от контактной площадки, б – разрыв по проволоке в месте пережима, в – разрыв проволоки вне зоны сварки, г – отрыв металлической пленки от подложки; 1 – проводник, 2 – контактная площадка, 3 – керамическая подложка

Разрыв по проволоке (рис 158, б) указывает на нарушение геометрии рабочего торца сварочного инструмента или на изменение параметров режима сварочной установки (чрезмерная деформация проводника). Разрушение (рис. 158, г) свидетельствует о недостаточной адгезии пленки к подложке.

Собранные приборы нагружают на центрифуге при линейном ускорении до 25 000g. Приборы располагаются во вкладышах, расположенных по окружности барабана. В процессе вращения барабана соединения воздействует сила, которая может достигать нескольких грамм-сил. Сварные соединения с низкой прочностью разрушаются и ненадежные приборы бракуются.

Испытания сварных соединений на термостойкость. Механические испытания позволяют предварительно оценить влияние на прочность соединения условий выполнения сварки и пайки. Завершающий этап – модельные испытания, которые определяют работоспособность конструкций в условиях, приближающихся к эксплуатационным, в частности при смене температур. При этом следует ожидать возникновения объемного напряженного состояния, оказывающего наибольшее воздействие на прочность соединений (в особенности при сварке и пайке разнородных материалов).

Детали и узлы электровакуумных приборов подвергаются многократным нагревам при пайке, обезгаживании и откачке. Некоторые узлы приборов, (например катодные) работают постоянно в режиме смены температур при включении и выключении прибора.

Учитывая, что температурные воздействия на сварную или паяную конструкцию бывают различными, исследования проводят исходя из условий работы узла. Так, для оболочковых узлов обычно применяют следующий режим испытаний: нагрев до температуры 700–750 °С в течение 10–15 минут. Выдержка 5 минут и охлаждение до 20 °С в течение 30–40 минут. После каждого термоцикла образцы испытывают на герметичность гелиевым течеискателем. Термостойкость соединения считается достаточной, если число циклов нагрева до разрушения превышает в 2–3 раза число нагревов соединения при изготовлении прибора.

Металлографические исследования. Металлографический контроль включает четыре вида испытаний: контроль излома, макроструктуры, микроструктуры, исследование микроструктуры замером микротвердости.

Контроль излома проводят на образцах, оставшихся после механических испытаний или на технологических пробах. В сварном соединении можно исследовать изломы швов, околошовной зоны и основного металла. При контроле излома проверяют, вязким или хрупким было разрушение, отмечают наличие трещин, пор, неметаллических включений. Горячая трещина в изломе видна по ее темной окисленной поверхности. Поры имеют характерный вид округлых или вытянутых пустот с гладкой поверхностью. При контроле излома в настоящее время наряду с оптическими находят широкое применение растровые электронные микроскопы.

Для контроля микро- и макроструктуры из соединения вырезают образец, включающий все зоны, шлифуют его, полируют и подвергают травлению для выявления структуры. Структура исследуется на оптических металлографических микроскопах типа МИМ-7, МИМ-9. При макроструктурном анализе выявляют строение шва, размеры зон термического влияния, наличие дефектов. Обычно микроструктуры исследуют при увеличении в 30–100 раз.

Микроструктуру соединений проверяют на специально приготовленных микрошлифах. Ее анализируют при увеличении в 100–600 раз. При этом

определяют размер зерна, наличие включений, структуру, обнаруживают микродефекты. Для оценки неоднородности и структурных составляющих соединений применяют метод замера микротвердости. Микротвердость измеряют на специальных приборах (обычно типа МПТ-3), совмещающих в себе микроскоп для наблюдения структуры и измерения отпечатков алмазной пирамиды с приспособлением для получения этих отпечатков.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие классы делятся все методы контроля качества сварных и паяных соединений?
2. Какие методы относятся к разрушающему контролю?
3. Какие методы относятся к неразрушающему контролю?
4. Какие дефекты выявляются при визуальном контроле?
5. В чем сущность рентгеновских методов контроля качества соединений?
6. Как классифицируются методы контроля герметичности соединений?
7. Как проводят оценку прочности соединений тонких проводников с контактными площадками?
8. Какие виды испытаний входят в металлографический контроль соединений?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемый читатель! Если вы внимательно прочитали эту книгу, то получили подробные сведения о сварочных процессах в электронном машиностроении и поняли, как многообразна, сложна эта область техники и науки, как много возможностей открывают знания по сварке для целей современного производства. Применение знаний по сварке тесно связано с другими предметами: химией, физикой, математикой.

Становление инженера возможно на основе искреннего интереса к данной специальности, постоянной учебы, изучения специализированной литературы. Дальнейшее развитие инженера связано с закреплением полученных знаний путем анализа и применения технической литературы, журналов, справочников, изобретений. Однако получение и накопление знаний само по себе не является большой ценностью: для инженера важным является практическое применение знаний для производства, для облегчения труда людей, получения экономического результата.

Техническое знание основано на многовековом опыте человечества, которое получало его в результате тяжелого труда, методом проб и ошибок. Поэтому к знанию, к книгам следует относиться с уважением и любовью, помня о том, что они действуют на наше сознание, изменяют внутренний мир и понуждают нас становиться уверенными в себе, знающими свою специальность инженерами.

Может оказаться, что не все прочитанное будет вам понятно или прочитанного окажется недостаточно для удовлетворения вашего интереса к сварке. В этом случае рекомендуется изучить дополнительную литературу, которая приводится в библиографическом списке.

Авторы надеются, что пособие поможет вам освоить вашу профессию, закрепить знания и достойно подготовиться к практической работе на производстве.

## Библиографический список

1. Бер А. Ю., Минскер Ф. Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1986.
2. Блинов И. Г., Кожитов Л. В. Оборудование полупроводникового производства. – М.: Машиностроение. – 1986.
3. Буслович С. Л., Гельфгат Ю. М., Коциньш И. А. Автоматизация пайки печатных плат. – М.: Энергия. – 1976.
4. Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В. Пайка деталей электровакуумных приборов. – М.: Энергия. – 1967.
5. Грачев А. А., Кожевников А. В., Лебига В. А. Ультразвуковая микросварка. – М.: Энергия. – 1977.
6. Давыдов В. А., Маслов Г. А. Сварка плавлением в микроэлектронике. – М.: Машиностроение. – 1979.
7. Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А. Конструирование и технология вакуумно–плотных паяных соединений. – М.: Энергия. – 1968.
8. Ковшиков Е. К., Маслов Г. А. Микросварка давлением. – М.: Машиностроение. – 1976.
9. Конюшков Г. В., Копылов Ю. Н. Диффузионная сварка в электронике. – М.: Энергия. – 1974.
10. Красулин Ю. А., Назаров Г. В. Микросварка давлением. – М.: Металлургия. – 1976.
11. Кривошей А. В., Бельцев А. П. Пайка и сварка в производстве микроэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия. – 1974.
12. Рыкалин Н. Н., Узлов А. А., Зуев И. В. Лазерная и электроннолучевая сварка материалов. – М.: Машиностроение. – 1985.
13. Мазур А. И., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. процессы сварки и пайки в производстве полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь. – 1981.
14. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. Микроплазменная сварка. – Киев, Наукова думка. – 1979.
15. Моряков О. С. Сварка и пайка в полупроводниковом производстве. – М.: Высшая школа. – 1984.
16. Фраткин Ю. Б. Технология контроля электронных приборов. – М.: Высшая школа. – 1984.
17. Шехмейстер Б. И. Сборочные операции в электровакуумном производстве. – М.: Высшая школа. – 1987.