

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Московский государственный институт электроники и математики
(Технический университет)**

Кафедра технологических систем электроники

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине

«Технология материалов и изделий электронной техники»

Москва 2006

Составитель канд.техн.наук. Б.А. Лапшинов

УДК 621.52

Технология создания неразъемных соединений: Метод. указания к лабораторной работе по дисциплине «Технология материалов и изделий электронной техники» / Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост. Б.А. Лапшинов. М., 2006. – 28с.

Содержанием работы является изучение технологических процессов создания неразъемных соединений при изготовлении различных изделий электронной техники. В работе проводятся исследования процессов конденсаторной и лазерной сварок.

Для студентов III курса ФЭ.

Ил. 16. Библиогр.: 3 назв.

ISBN 5-94506-133-6

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение технологических процессов создания неразъемных соединений в производстве изделий электронной техники:

- изучение технологического процесса лазерной сварки;
- изучение технологического процесса контактной электросварки;
- изучение технологического процесса создания паяных соединений.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Типы электронных приборов

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. 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 различной аппаратуре. Дискретные полупроводниковые приборы также широко применяют в аппаратуре и не все их типы могут быть заменены интегральными микросхемами.

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 $13 \cdot 10^{-4}$ 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.).

На рис. 1 показана конструкция электронно-лучевой трубки, а на рис. 2 - конструкция ее электронно-оптической системы.

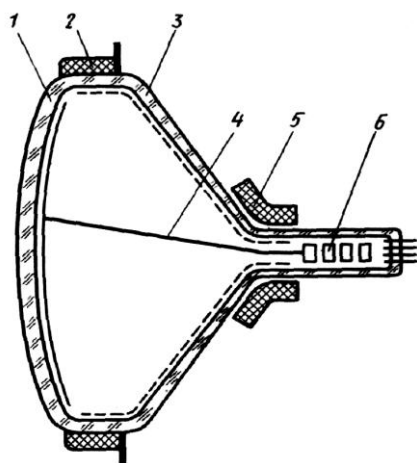


Рис. 1. Конструкция электронно-лучевой трубки:

1 – экран; 2 - взрывозащитная рамка;
3 - оболочка (колба); 4 - электронный луч;
5 - отклоняющая катушка;
6 - электронно-оптическая система

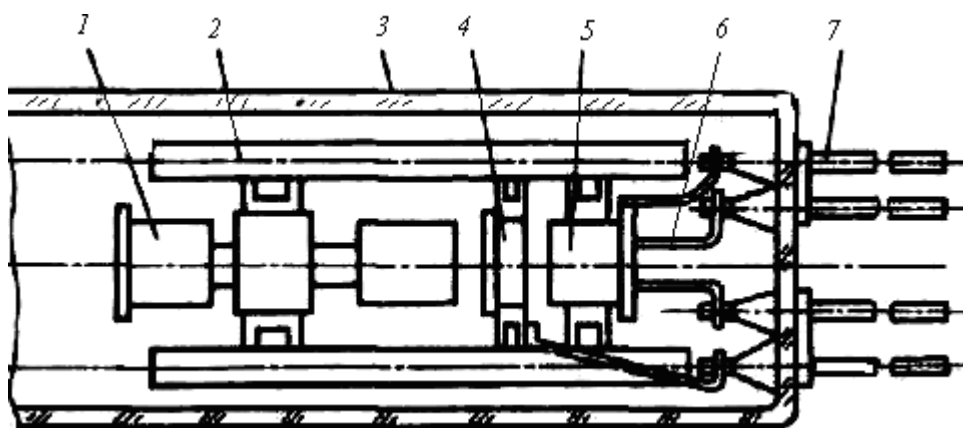


Рис. 2. Конструкция электронно-оптической системы:

1 - анод; 2 - изолятор; 3 – оболочка; 4 - ускоряющий электрод;
5 - катодно-модуляторный узел; 6 - соединительный проводник; 7 - внешний вывод

Электронно-оптическая система (рис. 2) 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.

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.

На рис. 3 представлены конструкции полупроводниковых микросхем

в металлостеклянном и металлокерамическом корпусах. Конструкция в металлостеклянном корпусе достаточно распространена в серийном производстве. Эта конструкция имеет 8 или 12 внешних выводов 1, впаянных в стеклоизолятор 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.

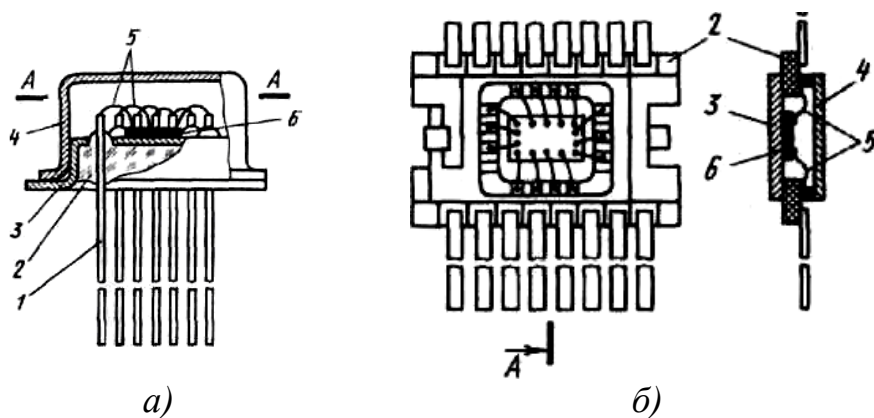


Рис. 3. Полупроводниковая интегральная микросхема: *а* - в металлостеклянном корпусе, *б* - в металлокерамическом корпусе; 1 - внешние выводы; 2 – изолятор; 3 - основание корпуса; 4 - крышка корпуса; 5 - соединительные проводники; 6 - кристалл микросхемы

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

2. 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 припои, не содержащие летучих в вакууме элементов — цинка, кадмия, висмута, свинца, фосфора.

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.

Сварка и пайка представляют собой процессы создания неразъемных соединений деталей и являются важнейшими операциями сборки деталей в узлы и целые конструкции.

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.

СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

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

Общая схема методов сварки плавлением (рис. 4) 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 кромках. 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 в глубь свариваемых элементов и в окружающую среду. Происходит кристаллизация металла сварочной ванны с образованием литой структуры шва, т.е. создание химических связей по сечению сварного соединения. Частично оплавленные зерна основного металла на границе сварочной ванны являются основанием для "пристройки" атомов 4, 5 из жидкости при кристаллизации шва.

При сварке встык и в ряде других случаев для восполнения основного металла, 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 дополнительный металл в виде проволоки, ленты или порошка, который называют

присадочным.

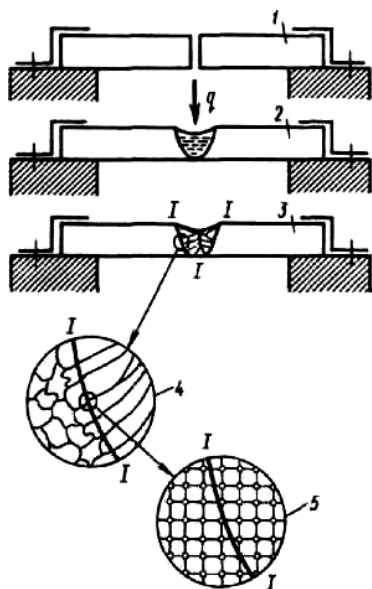


Рис. 4. Схема стадий образования соединения сваркой плавлением: 1 – сборка под сварку; 2 – образование сварочной ванны под воздействием источника теплоты; 3 – кристаллизация ванны с образованием сварного соединения; 4 – макроструктура зерен на границе шва; 5 – «стыковка» кристаллических решеток на границе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

Обычно при сварке плавлением швы имеют протяженность, значительно превышающую размеры сварочной ванны, поэтому процесс ведут, непрерывно перемещая источник теплоты q относительно свариваемых кромок.

В качестве источника тепловой энергии используют дуговой разряд, поток плазмы, сфокусированный поток электронов или фотонов, теплоту химических реакций. По источнику тепловой энергии обычно называют способ сварки (дуговая, электронно-лучевая, лазерная и т. д.).

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.

Микроплазменная дуга – это разновидность дуги, горящей между неплавящимся электродом и изделием. Для генерации микроплазменной дуги используется специальное устройство – плазмотрон.

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.

Лазерный луч для целей сварки начал использоваться в начале 60-х годов XX в. 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 (атомные или молекулярные системы). 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.

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

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/см²) 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.

К сварке давлением относятся все способы, при которых металл может иметь в зоне соединения любую температуру, от комнатной 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.

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 двух поверхностей. Таким образом, процесс образования монолита приводит систему в более устойчивое состояние с меньшим запасом свободной энергии. Следующая стадия образования соединения — образование химических связей, также требует введения энергии в соединяемые вещества.

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).

2. Классификация методов сварки давлением

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.

Существует следующая классификация 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, приводящем 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.

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

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. 5). Прочность соединения зависит от относительной глубины вдавливания инструмента и качества подготовки поверхности. Минимальная глубина вдавливания инструмента определяется свойством материала.

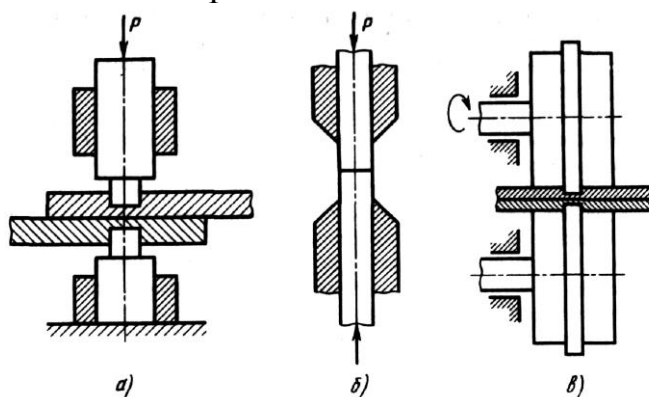


Рис. 5. Схема холодной сварки:

а - сварка внахлестку; *б* - сварка встык; *в* - шовная сварка

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

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.

Процессы соединения металлов с приложением давления P при нагреве до температуры T (PT -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. Характерной особенностью всех этих способов является интенсивная 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 *PT*-процессы делятся на: низкотемпературные, когда температура сварки близка к температуре рекристаллизации ($T_{нагр} = 0,4T_{пл}$); 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 *PT*-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, и сопротивление пластической деформации уменьшается.

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, а, следовательно, и механических свойств всей зоны металла, нагреваемой в процессе сварки.

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.

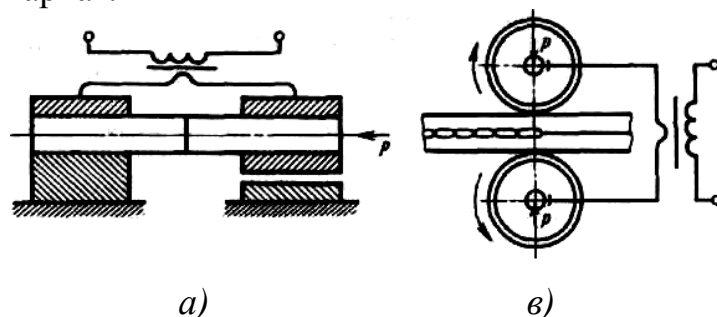
Количество теплоты, которое выделяется в проводнике при прохождении электрического тока, определяется законом Джоуля-Ленца.

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".

Схемы основных современных способов контактной сварки приведены на рис. 6. Они отличаются сопряжением деталей в месте соединения, особенностями токоподвода и приложения сварочного давления.

Стыковая сварка (рис. 6, 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. 6, 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 под 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".



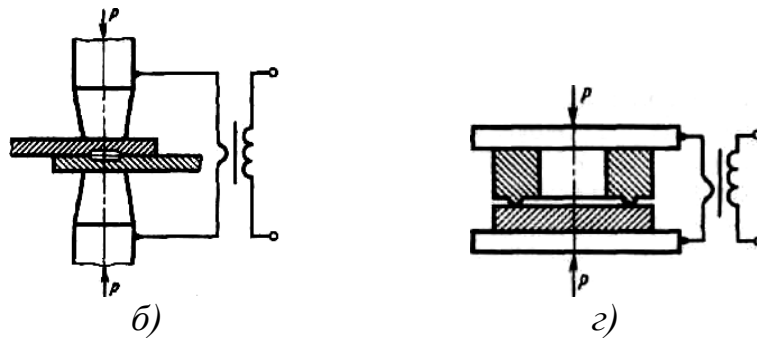


Рис. 6. Основные способы контактной сварки:

а – стыковая; б – точечная; в – роликовая; г - рельефная

Шовная (роликовая) сварка (рис. 6, 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. 6, 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 проволоочные элементы (электроды, выводы), трубы, полосы, листы; герметизируют корпуса приборов и интегральных микросхем, осуществляют монтаж приборов на платы и т.п.

В качестве электродов для контактной сварки используют стержни из меди или специальных медных сплавов. Например, используется сплав БрХН6Цр, имеющий стойкость, превышающую стойкость медных электродов в 3—5 раз.

При герметизации корпусов микросхем роликовой сваркой в качестве инструмента используются конические ролики (рис. 7), свободно вращающиеся на полуосях. Ролики изготавливаются из меди. Для увеличения стойкости используют также ролики из медно-кадмиевого сплава МК.

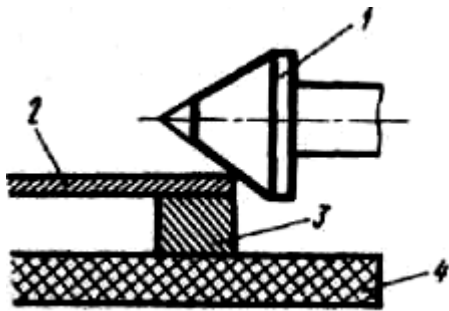


Рис. 7. Электрод для роликовой сварки при герметизации корпусов микросхем:

1 - роликовый электрод; 2 - крышка микросхемы; 3 - металлический пояс; 4 - керамическое основание

Процессы соединения металлов с приложением давления P при нагреве до температуры T в защитной атмосфере A (PTA -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) 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 PTA -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 P при нагреве до температуры T в защитной атмосфере A в течение времени t ($PTAt$ -процессы). В результате продолжительного нагрева в вакууме ($1,33 \cdot 10^{-3} — 1,33 \cdot 10^{-1}$ Па) или в восстановительной атмосфере сварные соединения получаются при относительно небольших давлениях и при невысоких нагревах за счет развития процессов схватывания во времени. При этом сравнительно мало изменяются свойства соединяемых, часто разнородных материалов, что делает $PTAt$ -процессы особенно эффективными и целесообразными.

Как и во всех других процессах сварки давлением, в $PTAt$ -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.

К $PTAt$ -процессу относится диффузионная сварка в вакууме.

Процессы соединения металлов с приложением давления P при нагреве до температуры T при взаимном перемещении f кромок (PTf -процессы) . Взаимное перемещение f 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.

3. Устройства нагрева установок сварки давлением

Устройства, 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 токопроводы 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 подводить электрическую энергию пропустить через детали в виде тока больших значений (100 - 10 000 А) при низком напряжении (1 - 10В).

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 близко 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. 8): на ядре трансформатора 1 располагаются первичная 3 и вторичная 2 обмотки и секционированный регулятор коэффициента трансформации 4. Ток к

деталю 8 поступает по токоподводам 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.

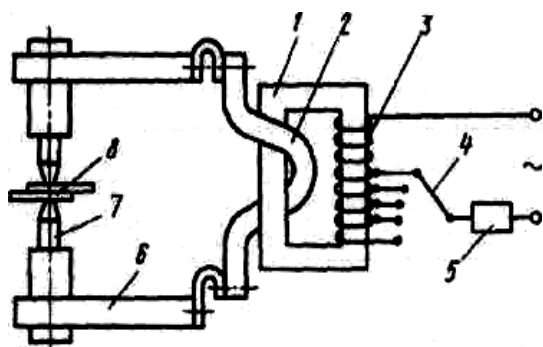


Рис. 8. Схема источника нагрева при электроконтактной сварке:

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. 9.

Разряд конденсаторов с регулируемой емкостью C_p преобразуется с помощью сварочного трансформатора T . В левом положении перекидного ключа Π 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 плавления.

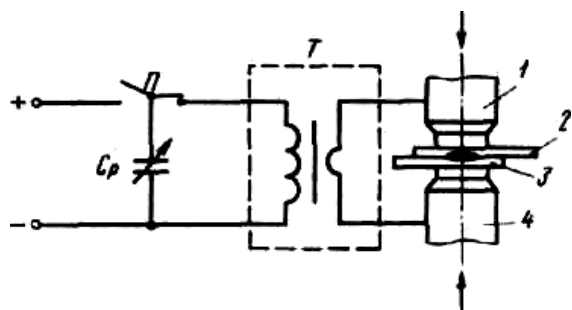


Рис. 9. Схема нагрева деталей при конденсаторной сварке

ПАЙКА В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

1. Образование соединения 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. 10 показана конструкция паяного соединения.

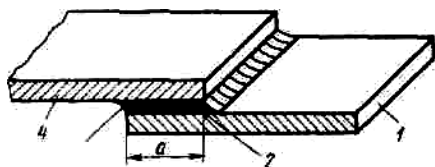


Рис. 10. Конструкция паяного соединения:

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. 11, а); плавление припоя (рис. 11,б); смачивание, растекание и заполнение капиллярного зазора жидким припоем (рис. 11, в); растворение основного металла в жидком припое и взаимная диффузия компонентов основного металла и припоя (рис. 11, г); охлаждение и кристаллизация паяного шва (рис. 11, 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.).

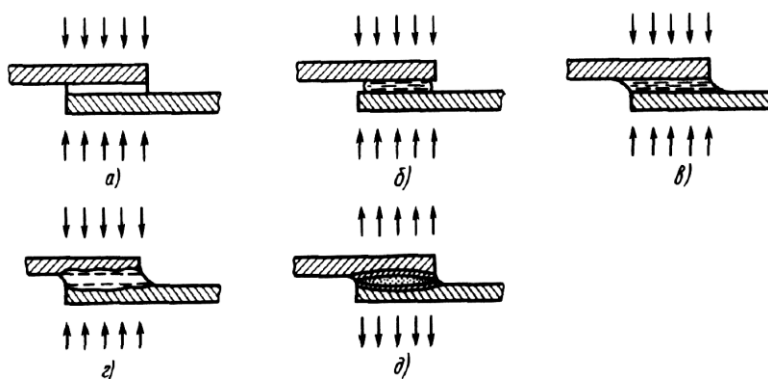


Рис. 11. Основные стадии образования паяного соединения (стрелками показано направление потоков тепла)

Расплавленный припой должен растечься по поверхностям соеди-

няемых кромок, а это возможно лишь при хорошей смачиваемости их поверхности припоем.

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.

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.

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 обволакивает расплавленный припой и нагретые кромки деталей тонким слоем. 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.

Кроме флюсов для удаления окисных пленок с поверхности соединяемых кромок используется нагрев деталей в контролируемой атмосфере или в вакууме.

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: вязкость, поверхностное натяжение жидкости, шероховатость поверхности твердых металлов и другие факторы.

Помимо растворения в системе расплавленный припой — основной материал протекают процессы диффузии. 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 основной металл и компонентов основного металла в припой.

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. При этом ближе к основному металлу образуются зоны, обогащенные компонентами основного металла, ближе к центру шва - компонентами припоя.

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.

2. Характеристика источников нагрева при пайке

Локальный нагрев места пайки

Пайка нагретым инструментом (с использованием паяльника). Источником теплоты является твердое тело в виде постоянно или импульсно нагреваемого инструмента. При постоянном нагреве инструмент имеет, как правило, общий разогрев, обеспечивающий необходимый запас теплоты, аккумулируемой во всей массе инструмента. 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_p , стабильность этой температуры, запас теплоты в паяльном жале и т. д. Температура рабочего конца жала задается обычно на 30 - 100 °С 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. 12) 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.

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 и микроплазменными горелками. Для этого могут быть использованы миниатюрные кислородно-водородные горелки и косвенная плазменная дуга.

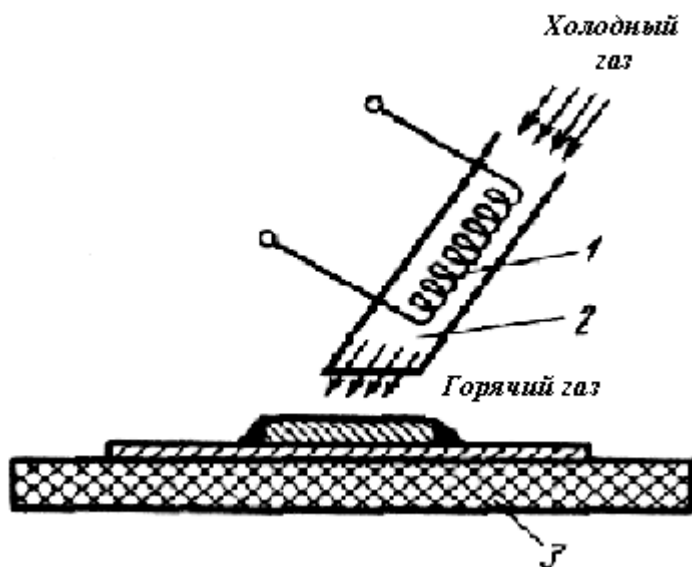


Рис. 12. Схема нагрева места пайки нагретым газом:

1 – нагреватель; 2 – сопло;
3 – паяемое изделие

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. 13, 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.

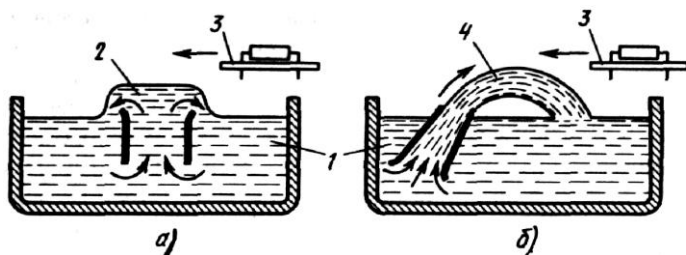


Рис. 13. Схема пайки волной (а) и струей (б) припоя:

- 1 - ванна с припоем;
- 2 - волна припоя;
- 3 - соединяемые детали;
- 4 - струя припоя

При пайке струей припоя (рис. 13, 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.

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. 14, а), либо с помощью различного рода отражающих зеркал (рефлекторов). При этом предпочтение отдается системам с рефлекторами (рис. 14, 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 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 электронно-оптической системы. Теплота в соединяемых деталях выделяется при бомбардировке их расфокусированным потоком электронов.

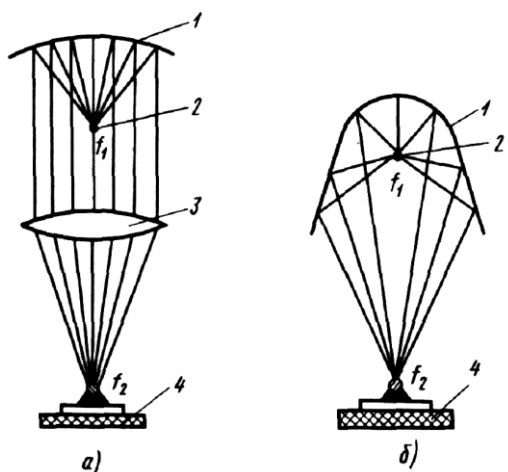


Рис. 14. Схема нагрева при пайке лучистой энергией:
 а - фокусировка оптической системой; б - фокусировка эллиптическим зеркалом;
 1 - зеркало; 2 - источник излучения; 3 – линза; 4 - соединяемые детали

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. 15, а). 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 паяют детали, из которых можно удалить остатки солей после пайки.

При косвенном нагреве в соляных ваннах (рис. 15, 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.

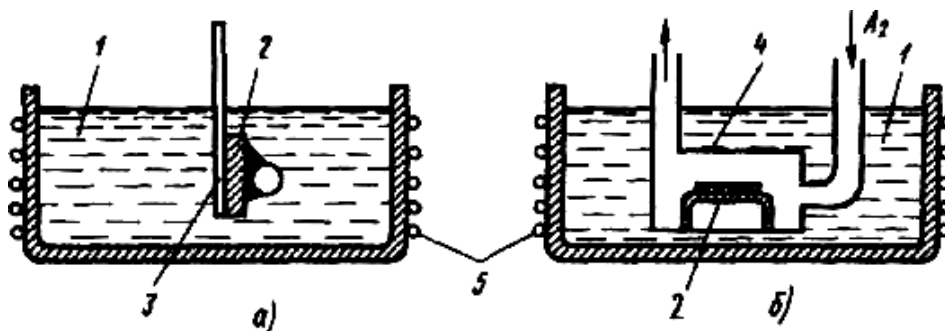


Рис. 15. Схема нагрева при пайке погружением в соляную ванну:
а - прямой нагрев, *б* - косвенный нагрев;

1 - ванна с расплавом солей; 2 - соединяемые детали; 3 – оснастка;
 4 - контейнер; 5 - нагреватель

При пайке погружением в расплавленный припой 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.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Создание сварных соединений на установке контактной сварки СС-1

Установка СС-1 предназначена для осуществления операций контактной сварки изделий электронной техники. Схема установки показана на рис. 8.

Основные характеристики установки:

- максимальная производительность установки 60 точек в мин.;
- суммарная толщина свариваемых деталей из никеля...0,05 – 0,5 мм;
- пределы регулирования усилия сжатия свариваемых деталей 0,6 – 8,0 кг;
- максимальный рабочий ход верхнего электрода 20 мм.

Задание

Провести сварку внахлест образцов из никелевой ленты при

различных энергиях сварочных импульсов.

Определить размер сварочных точек, пользуясь микроскопом МБС. Результаты измерений представить в табличной форме.

2. Создание сварных соединений на установке лазерной сварки «Квант 16»

Установка «Квант 16» предназначена для точечной сварки металлов при глубине проплавления до 0,5 мм.

Технические характеристики установки:

- активный элемент (стекло с неодимом), мм 10 x 260;
- длина волны излучения, мкм 1,06;
- номинальная энергия излучения в импульсе, Дж 10;
- длительность импульса излучения, мсек 4;
- диаметр светового пятна, мм 0,7 – 1,4;

Установка включает в себя следующие элементы: ОКГ с оптической системой, приспособлением для полуавтоматической сварки, блоком охлаждения, блоком поджига, катушкой индуктивности и системой подачи обеспыленного воздуха; выпрямитель В2-5000-ЭФ; источник тока ИТ2-3Ф; накопитель емкостной; систему управления СУМ-4; измеритель энергии ИЭ-2; кабели.

Блок-схема установки показана на рис. 16.

Оптический квантовый генератор (ОКГ) вырабатывает мощный световой импульс, который в виде параллельного пучка лучей попадает в оптический блок, фокусирующий излучение на поверхности свариваемых деталей.

Выпрямитель, источник тока и емкостной накопитель энергии служат для электропитания импульсной лампы оптической накачки ОКГ. Для получения необходимой длительности светового импульса ОКГ в разрядную емкость цепи емкостного накопителя установлена катушка индуктивности. Блок поджига служит для подачи высоковольтного импульса, который инициирует разряд емкостного накопителя через лампу накачки.

Блок охлаждения поддерживает нормальный тепловой режим работы ОКГ. Для измерения энергии импульса ОКГ служит измеритель энергии ИЭ-2. Свариваемые детали устанавливаются в специальном приспособлении. С целью поддержания необходимых условий окружающей среды в установке создана обеспыленная зона. Для подачи в нее обеспыленного воздуха служит воздухоподводящее устройство. Блок СУМ-4 служит для управления источником питания ОКГ.

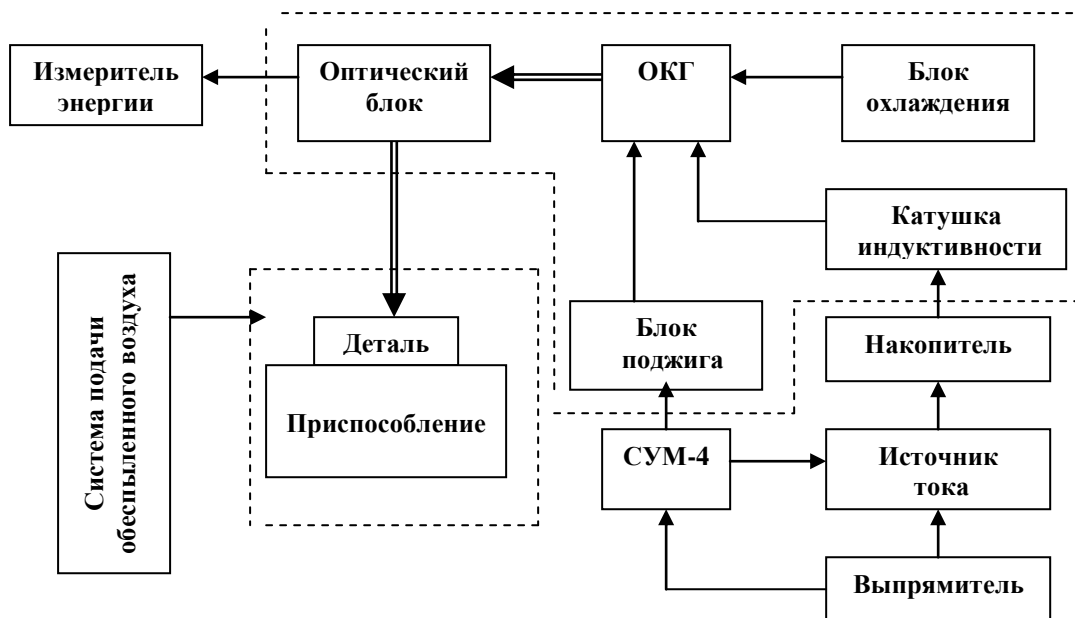


Рис. 16. Блок-схема установки «Квант – 16»

Задание

1. Ознакомиться с устройством установки и с правилами работы на ней в соответствии с инструкцией по эксплуатации;
2. Положить на рабочий стол установки пластины из нержавеющей стали и соединить их встык. Перемещая стол, совместить сварной шов с перекрестием окуляра установки;
3. Сварить пластины отдельными точками при различных режимах лазерного луча;
4. Произвести измерение диаметра ядра сварных точек на микроскопе. Результаты измерений занести в таблицу и построить графическую зависимость диаметра сварных точек от параметров сварных импульсов;
5. Разломить пластины руками по сварным точкам и произвести замер глубины проплавления материала в зависимости от параметров лазерных импульсов. Результаты измерений занести в таблицу и построить соответствующие графики.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о работе должен содержать:

1. Название лабораторной работы.
2. Формулировку цели работы.
3. Краткое описание и схемы установок, используемых в работе.
4. Таблицы и графические зависимости, полученные в результате проведения работы.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991.
2. Бер А.Ю., Минскер Ф.Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981.
3. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высш. школа, 1986.

Учебное издание

Технология создания неразъемных соединений

Составитель
ЛАПШИНОВ Борис Алексеевич

Редактор Е.С. Резникова
Технический редактор О.Г. Завьялова

<http://www.miem.edu.ru/rio/>
rio@miem.edu.ru

Подписано в печать . Формат 60x84/16
Бумага офсетная №2. Ризография. Усл.печ.л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,58
Изд. № 101. Тираж 25 экз. Заказ . Бесплатно
Московский государственный институт электроники и математики.
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3/12.
Отдел оперативной полиграфии Московского государственного
института электроники и математики.
113054, Москва, ул. М. Пионерская, 12.