

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

**Абралов М.А., Дуняшин Н.С.**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**по дисциплинам «Пайка металлов» и «Сварка пластмасс и склеивание»  
для подготовки магистров по специальности  
5А 522701 - «Машины и технология сварочного производства»**

**ТАШКЕНТ 2002**

УДК 621.791.1

Конспект лекций по дисциплинам «Пайка металлов» и «Сварка пластмасс и склеивание» для подготовки магистров по специальности 5А 522701 «Машины и технология сварочного производства»/ ТашГТУ; Абралов М.А., Дуняшин Н.С. Ташкент, 2002. 1 с.

Курс «Пайка металлов» по учебному плану читается на 1 семестре магистратуры. В этом конспекте изложены основные вопросы теории и элементов технологии современных процессов пайки в объеме, необходимом для изучения студентами высшего специального заведения по специальности магистратуры 5А 522701 «Машины и технология сварочного производства»

Курс «Сварка пластмасс и склеивание» по учебному плану читается на 3 семестре магистратуры. В этом конспекте изложены основные вопросы теории и элементов технологии современных процессов сварки пластмасс и склеивания в объеме необходимом для изучения студентами высшего специального заведения по специальности магистратуры 5А 522701 «Машины и технология сварочного производства»

Кафедра «Машины и технология сварочного производства»

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ташкентского государственного технического университета

Рецензент: главный сварщик ГАО ТАПОиЧ Сорокин Г.В.

Объем учебной нагрузки по видам занятий:

	«Пайка металлов»	«Сварка пластмасс и склеивание»
Общий объем	40ч.	36ч.
Лекции	20ч.	24ч.
Лабораторные работы	10ч.	12ч.
Практические занятия	10ч.	
Самообразование	28ч.	28ч.
Самостоятельная работа	22ч.	22ч.

## «ПАЙКА МЕТАЛЛОВ»

### Введение

Пайка является наиболее древним способом соединения металлов. На основе археологических раскопок установлено, что человек достаточно хорошо владел им еще 3 – 5 тысяч лет назад. Так, при раскопках на территории древнего Египта были найдены паянные медно-серебряным припоем трубы и паяные изделия.

На территории СНГ также было найдено большое количество самых различных паяных изделий, относящихся к глубокой древности. Обычно это оружие, предметы домашнего обихода и украшения – особенно в древней Руси, на Южном Урале и Украине (г. Киев).

В развитие пайки металлов огромный вклад внесли русские ученые. Так, например, М.В. Ломоносов впервые наблюдал и описал явление спаивания металлов в разряде атмосферного электричества. Д.И. Менделеев в своем труде «Основы химии» первым дал объяснение процесса флюсования при пайке с применением в качестве флюса хлористого цинка.

В XVIII и XIX вв. в связи с развитием промышленности пайка вышла за рамки ремесла; ее стали применять также в производственных условиях. Первыми оценили преимущества высокотемпературной пайки тульские оружейники, начав широко применять ее для соединения ответственных деталей.

Однако, несмотря на эти примеры, пайка оставалась ремеслом, и применение ее в промышленности было весьма ограничено. Только в 30-х годах 20 века, в связи с потребностями массового производства и появлением таких новых источников нагрева, как электрические печи и высокочастотные установки, пайка начала находить широкое промышленное применение. Именно в этот период разработана пайка в высокопроизводительных конвейерных электропечах и созданы автоматы для индукционной вакуумной пайки. Ученые СНГ внесли большой вклад в развитие пайки металлов и во многом способствовали ее прогрессу. В СНГ разработаны и внедрены в производство высокопрочные и кислотостойкие припои, активные газовые среды, специальные печи для пайки титановых, алюминиевых и магниевых сплавов, а также пайки металлов с полупроводниками, графитом, керамикой и другими материалами. После второй мировой войны начался период бурного развития пайки, вызванный прогрессом в атомной, ракетной, радиоэлектронной и других отраслях промышленности.

Пайка металлов быстро превращается в современный высокопроизводительный технологический процесс.

В настоящее время пайка металлов находит применение во всех отраслях техники: в самолетостроении – пайка панелей с сотовым наполнителем, камер сгорания жидкостных ракетных двигателей. В радиоэлектронной промышленности – пайка печатных радиосхем (плат), в

станкостроении – пайка режущего инструмента, в автотракторостроении – радиаторов, паяных блоков и т.д.

Преимущества пайки:

- 1) возможность соединения за один прием множества заготовок - групповой метод обработки металлов, наиболее соответствующий условиям массового производства;
- 2) возможность соединения разнородных металлов и металлов с неметаллическими материалами.

Темпы механизации и автоматизации этого процесса в последние годы стали значительно выше, чем сварки. Пайка металлов, как прогрессивный технологический процесс, получает с каждым годом все большее развитие в нашей стране.

## **Лекция № 1**

### **Пайка металлов**

1.1. Теоретические основы пайки металлов

1.2. Классификация процессов пайки.

#### **1.1. Теоретические основы пайки металлов**

Пайкой называется процесс соединения металлов в твердом состоянии припоями, которые при расплавлении смачивают паяемые поверхности, заполняют капиллярный зазор между ними и образуют паяный шов при кристаллизации.

Из определения следует, что процесс образования паяного соединения связан с нагревом. Для получения спая, наряду с нагревом, необходимо обеспечить еще два основных условия:

- 1) удалить с поверхности металла в процессе пайки окисную пленку.
- 2) ввести в соединительный зазор между ними расплавленный связующий металл.

При кристаллизации вступившего во взаимодействие с паяемыми металлами более легкоплавкого связующего металла, образуется паяное соединение.

Процесс пайки имеет много общего со сваркой, и, прежде всего со сваркой плавлением, но, несмотря на внешнее сходство между ними имеется принципиальные различия.

1) Если при сварке плавлением свариваемый и присадочный металл в сварочной ванне находится в расплавленном состоянии, то при пайке паяемый металл не плавится. Образование соединения без кромок паяемых деталей является основной особенностью процесса пайки.

2) При пайке формирование шва происходит путем заполнения припоем капиллярного зазора между соединяемыми деталями, т.е. процесс пайки связан с капиллярным течением присадочного материала, что не имеет места при сварке плавлением.

3) Пайка, в отличие от сварки плавлением, может быть осуществлена при любых температурах лежащих ниже температуры плавления основного металла.

Эти различия имеют своим следствием иную, чем при сварке плавлением природу процессов, протекающих при образовании паяного шва.

## 1.2. Классификация процессов пайки.

Пайку можно классифицировать: во-первых, по сущности физико-химических процессов, протекающих при формировании паяных швов, и, во-вторых, по разновидностям технологии пайки, связанным с применяемыми для нагрева источниками тепла или оборудованием.

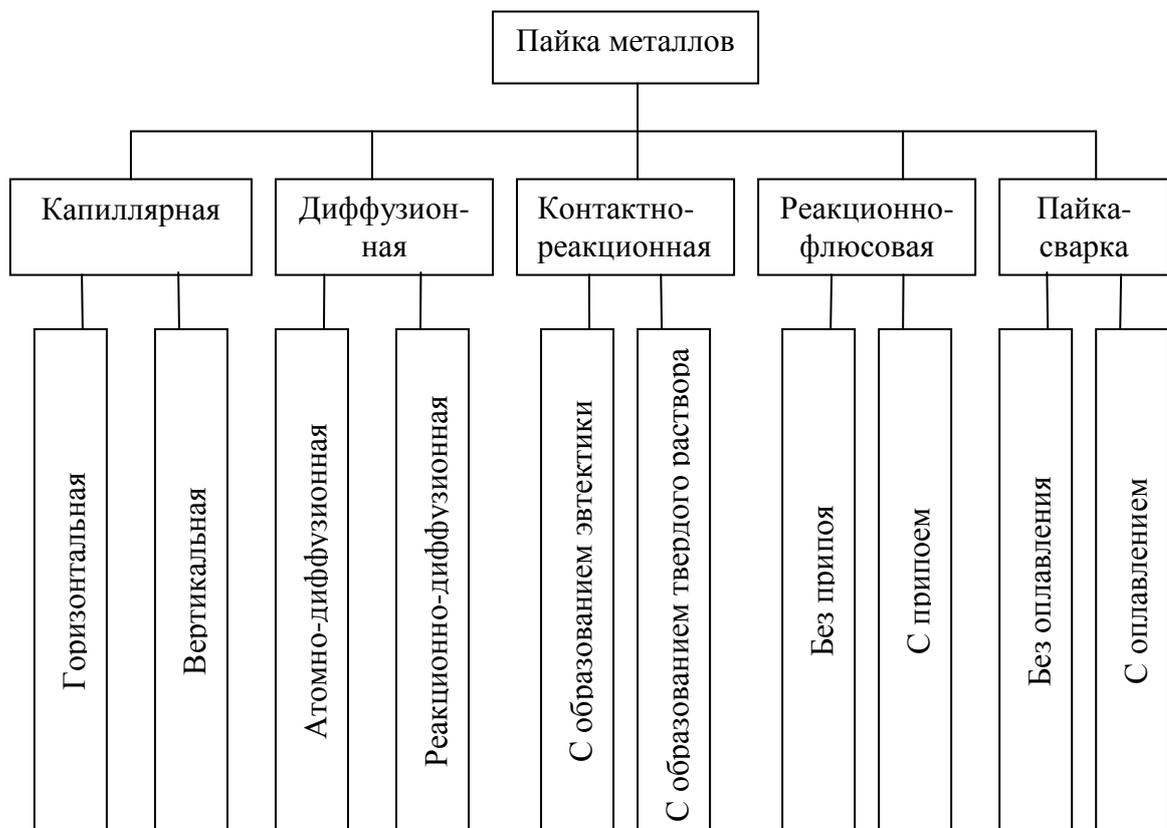


Рис. 1.1. Классификация методов пайки.

По сущности физико-химических процессов к основным разновидностям или методам пайки относятся:

- 1) капиллярная пайка;
- 2) диффузионная пайка;
- 3) контактно-реакционная;
- 4) реакционно-флюсовая;
- 5) пайка-сварка.

1) Капиллярной пайкой называется метод пайки, при котором припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями деталей и удерживается в нем за счет капиллярных сил. Во всех случаях, когда в

паяном соединении имеется перекрытие элементов детали (нахлестка) возможна капиллярная пайка. Однако капиллярные явления присущи всем методам пайки, поэтому данный термин является условным, обозначающим процессы пайки, связанные с течением припоев под действием капиллярных сил.

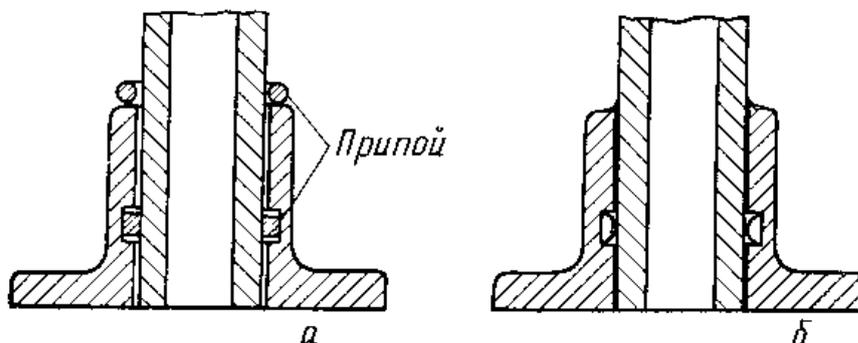


Рис. 1.2. Схема капиллярной пайки:

- а) до пайки
- б) после пайки

2) Диффузионной пайкой называется метод пайки при высоких температурах, отличающийся длительной выдержкой, проводимой с целью упрочнения соединения за счет взаимной диффузии компонентов припоя и паяемых материалов.

При диффузионной пайке в зависимости от сечения основного металла и припоя, во-первых, возможно взаимное растворение припоя и основного металла с образованием в шве твердого раствора, благодаря чему существенно повышается пластинчатость и прочность паяного соединения - атомно-диффузионная пайка; во-вторых, в процессе диффузионной пайки возможно образование в шве весьма тугоплавких, но, как правило, хрупких интерметаллидов, возникающих при протекании реакционной диффузии, которые приводят к повышению температуры плавления металла шва и, следовательно, к повышению жаропрочности паяемых соединений - реакционно-диффузионная пайка.

Так, например, при пайке W припоем системы Pt-W с температурой плавления  $855^{\circ}\text{C}$ , протекает реакция:



с образованием в шве сплава с температурой плавления выше  $2000^{\circ}\text{C}$ .

3) Контактно-реакционной пайкой называется метод пайки, при котором между соединяемыми металлами и припоем протекает активная реакция с образованием в контакте между ними нового более легкоплавкого сплава эвтектического состава или твердого раствора с минимумом на кривой Ликвидуса. Образовавшийся легкоплавкий сплав заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение. Случай взаимодействия между соединяемыми металлами имеет место, например, при пайке меди с серебром без нанесения припоя.

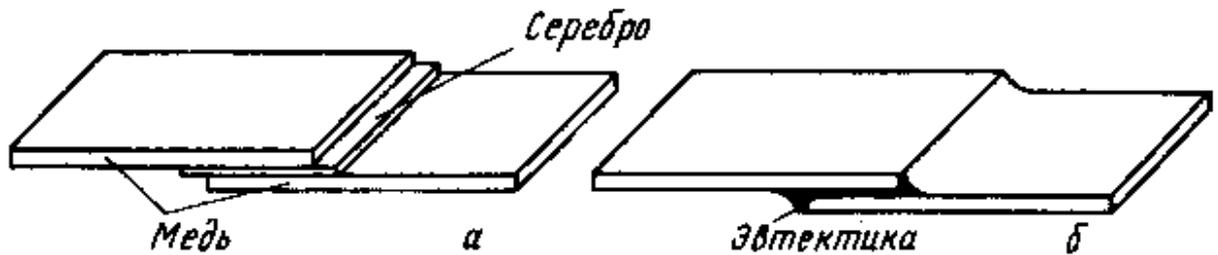
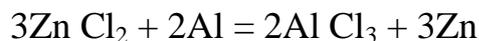


Рис. 1.3. Схема контактно-реактивной пайки:

- а) до пайки;  
б) после пайки.

4) Реакционно-флюсовой пайкой называется метод пайки, при котором припой образуется за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом. Реакционно-флюсовая пайка может осуществляться в двух вариантах: без внедрения припоя и с дополнительным введением припоя.

Реакционно-флюсовую пайку без введения припоя можно продемонстрировать на примере пайки алюминия с флюсом, содержащим большое количество хлористого цинка. При пайке на соединяемые поверхности алюминиевых деталей наносится избыточное количество флюса. При нагреве между хлористым цинком и алюминием протекает реакция:



Восстановленный из хлорида цинк является в данном случае припоем. Он осаждается на поверхности алюминия, затекает в зазор и соединяет паяемые детали.

5) Пайкой-сваркой называется метод пайки, при котором паяные соединения образуются способами, характерными для сварки плавлением, но с применением припоя в качестве присадочного материала. Пайка-сварка делится на пайку без оплавления кромок соединяемых деталей и с оплавлением кромок одной из соединяемых деталей, изготавливаемой из более легкоплавкого металла.

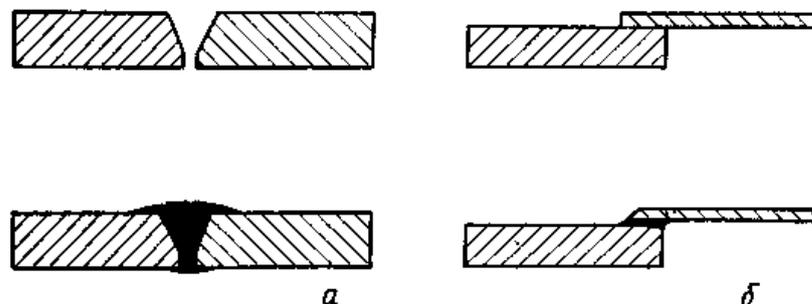


Рис. 1.4. Схема образования шва при пайке-сварке:  
а – без оплавления кромок деталей; б – с оплавлением кромок одной детали.

## Лекция №2 Способы пайки

Рассмотренные методы пайки могут быть осуществлены с применением различных способов пайки в зависимости от используемых источников нагрева.

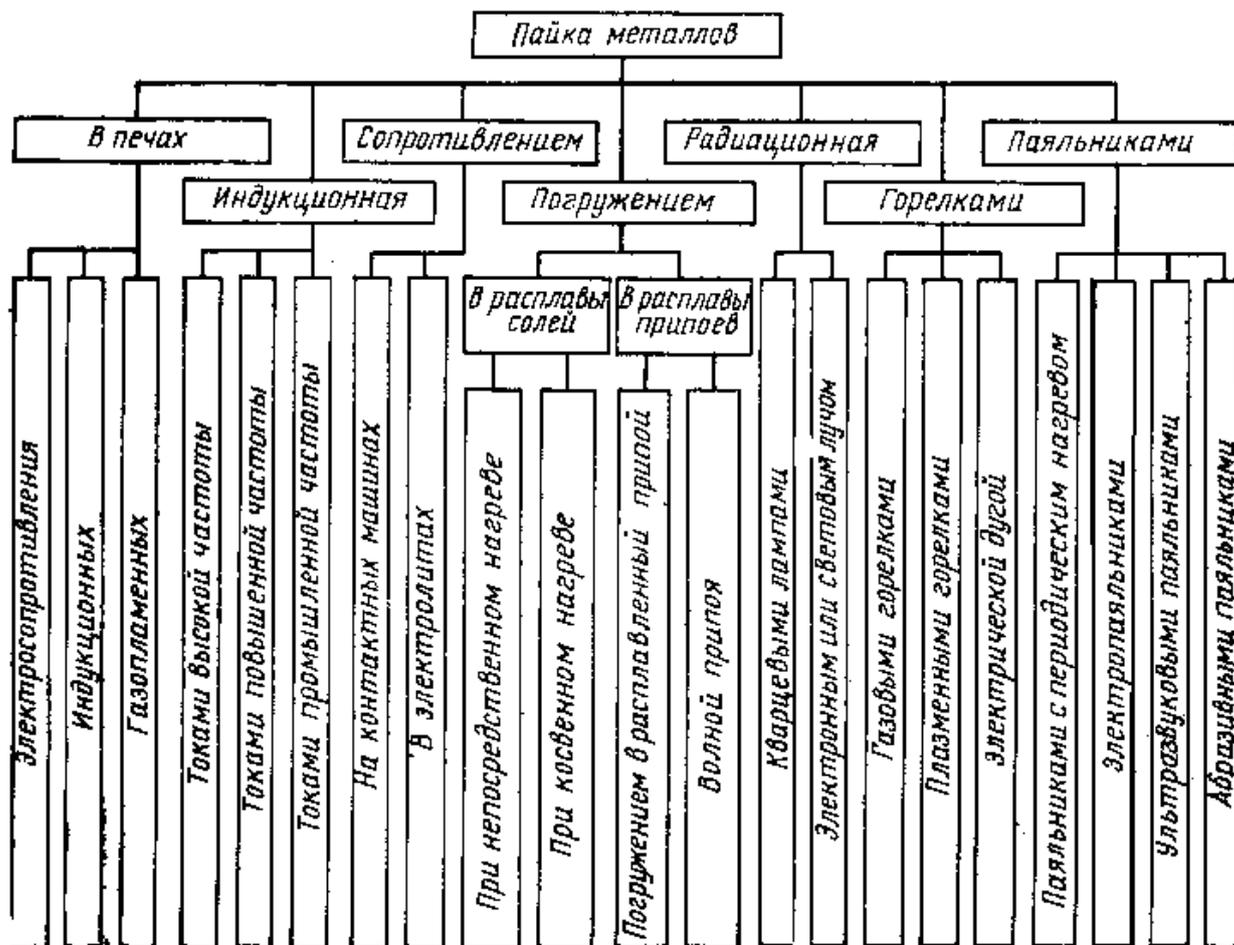


Рис 2.1. Классификация способов пайки.

1) Пайка в печах обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной деформации даже при их больших габаритах и сложной конфигурации.

Для пайки применяются печи с нагревом электросопротивлением, индукционным нагревом и газопламенные печи. Пайка крупногабаритных деталей производится в камерных печах с неподвижным подом. Для массовой пайки сравнительно мелких деталей применяются печи с сеточным конвейером или роликовым подом. В этих печах для предохранения деталей от окисления и повышения качества пайки создается специальная газовая атмосфера.

Пайка в печах позволяет широко применять механизацию паяльных работ и обеспечить стабильное качество паяных соединений.

2) Индукционная пайка может производиться с нагревом детали токами высокой, повышенной и промышленной частоты. В этом случае необходимое тепло выделяется за счет тока, индуктируемого непосредственно в подлежащих пайке деталях. Различают две разновидности пайки с индукционным нагревом: стационарную и с относительным перемещением индуктора или детали.

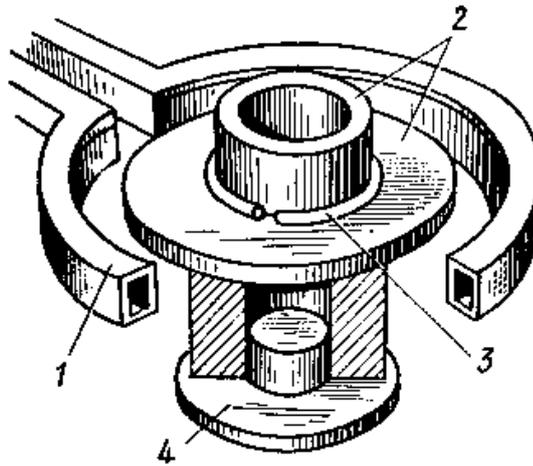


Рис. 2.2. Принципиальная схема индукционной пайки:

1 - индуктор; 2 - паяемые детали; 3 - припой; 4 - подставка

3) Пайка сопротивлением происходит за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока через паяемые детали и токопроводящие элементы. При этом соединяемые детали являются частью электрической цепи. Нагрев сопротивлением осуществляется или на контактных машинах аналогичных сварочным или в электролитах. При пайке в электролитах тепловой эффект возникает за счет высокого электрического сопротивления водородной оболочки, образующейся вокруг паяемой детали (катода), погруженной в электролит.

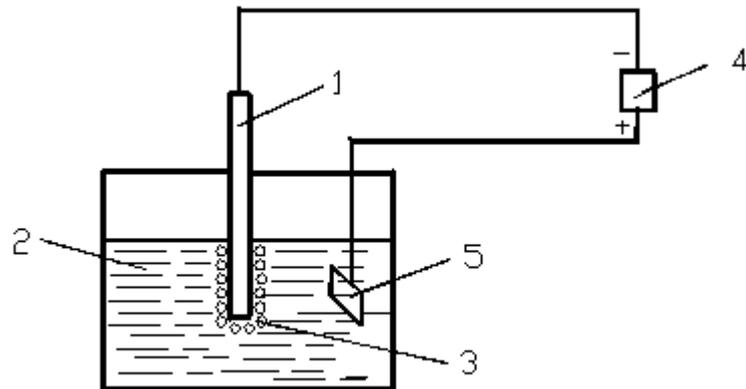


Рис. 2.3. Принципиальная схема пайки сопротивлением:

1 - паяемые детали; 2 - электролит; 3 - водородная оболочка; 4 - источник питания; 5 - анод.

4) Пайка погружением осуществляется путем нагрева деталей в ваннах с расплавами солей или припоев. При пайке в соляных ваннах нагрев может быть непосредственным или косвенным.

При пайке в соляных ваннах при непосредственном нагреве деталей, детали погружаются в расплавы солей, выполняющих роль не только источника тепла, но и флюса. Преимуществом этого способа является очень высокая скорость нагрева.

При пайке в соляных ваннах с косвенным нагревом паяемая деталь, помещенная в контейнер со спец. газовой средой или вакуумом, погружается в соляную ванну. Такой способ пайки обеспечивает несколько меньшую скорость нагрева, но качество поверхности паяемой детали получается более высокой.

При нагреве в расплавленных припоях, подготовленные к пайке детали частично или полностью погружаются в ванну с припоем. Этот способ пайки нашел широкое применение при изготовлении автомобильных и авиационных радиаторов, твердосплавного инструмента, а также в радио- и электропромышленности. Пайка в расплавленных припоях имеет две разновидности: погружением в расплавленный припой и волной припоя.

Пайка волной припоя состоит в том, что подаваемый насосом расплавленный припой образует волну над уровнем расплава. Паяемая деталь перемещается в горизонтальном направлении. В момент касания волны происходит пайка. Этот способ пайки получил большое распространение в радиоэлектронной промышленности при производстве печатного радиомонтажа.

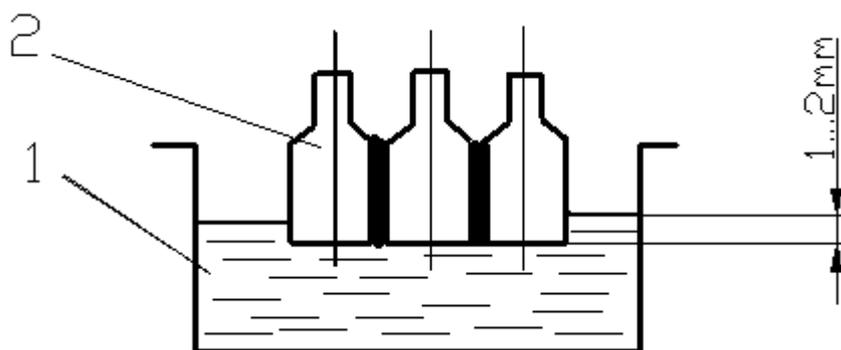


Рис. 2.4. Схема пайки погружением в расплавленный припой:  
1 - припой; 2 - паяемые детали.

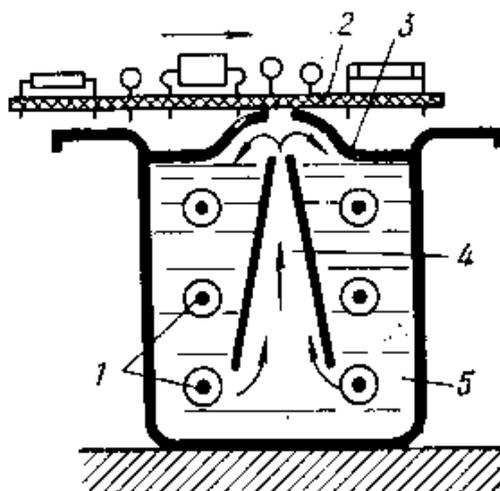


Рис. 2.4. Принципиальная схема пайки волной припоя:

1 - электронагреватель; 2 - плата; 3 - волна; 4 - сопло; 5 - припой.

5) Радиационный нагрев осуществляется за счет излучения кварцевых ламп, расфокусированного электронного луча или мощного светового потока от квантового генератора (лазера). Радиационный нагрев позволяет значительно сократить продолжительность пайки, использовать точную электронную аппаратуру для регулирования температуры и времени пайки. При радиационном нагреве лучистая энергия превращается в тепловую непосредственно в материале паяемых изделий.

6) При пайке горелками местный нагрев паяемых деталей и расплавление припоя осуществляется за счет тепла, выделяющегося в газовых горелках при сгорании углеводородов, в плазменных горелках за счет тепла плазменной струи и тепла электрической дуги косвенного действия. Эти источники нагрева различны по своей природе, но применение их для пайки идентично, поэтому их можно рассматривать одновременно.

Из перечисленных способов нагрева газовые горелки обладают большей универсальностью. Применяя различные углеводороды в смеси с воздухом или кислородом, можно получить необходимые для пайки металлов температуры нагрева. Питание газовых горелок горючим газом может производиться от баллонов, газовой сети или от газового генератора.

Плазменные горелки дают более высокую температуру нагрева и поэтому могут быть перспективными для пайки таких тугоплавких металлов, как W, Ta, Mo, Nb.

7) Пайка паяльниками ввиду простоты их устройства и общедоступности этого способа нашла чрезвычайно широкое применение в различных областях техники. При этом способе пайки нагрев основного металла и расплавление припоя осуществляются за счет тепла, аккумулированного в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе пайки нагревается.

Паяльники можно разделить на четыре группы:

- 1) с периодическим нагревом;
- 2) с электронагревом;

- 3) ультразвуковые;
- 4) абразивные.

Паяльники с периодическим нагревом и электронагревом нашли наибольшее распространение для флюсовой пайки черных и цветных металлов при температурах ниже 300-350 °С.

В ультразвуковых паяльниках колебания ультразвуковой частоты используются для разрушения окисной пленки на поверхности паяемого металла под слоем расплавленного припоя. Паяльники для ультразвуковой пайки могут быть и без подогревателя. В последнем случае для расплавленного припоя используется посторонний источник нагрева. Основное преимущество ультразвуковых паяльников - возможность без флюсовой пайки. Это нашло применение главным образом для пайки алюминия легкоплавкими припоями.

Абразивные паяльники, как и ультразвуковые, применяются для обслуживания алюминия и алюминиевых сплавов без применения флюсов. Окисная пленка при пайке удаляется за счет простого трения паяльником по обслуживаемой поверхности. Основным достоинством этих паяльников по сравнению с ультразвуковыми является возможность лужения и пайки алюминия и алюминиевых сплавов без применения дорогостоящего оборудования.

### **Лекция № 3**

#### **Процессы удаления окисной пленки при пайке**

- 3.1. Классификация способов удаления окисной пленки
- 3.2. Флюсы и их роль
- 3.3. Композиция флюсов
- 3.4. Механизм флюсования

#### **3.1. Классификация способов удаления окисной пленки**

При всех рассмотренных способах пайки нагрев основного металла и расплавление припоя должны производиться при удалении с их поверхности окисной пленки и защите от дальнейшего окисления под воздействием кислорода воздуха. С этой целью при пайке применяют флюсы, газовые среды, физико-механические способы разрушения окисной пленки и самофлюсующиеся припои.

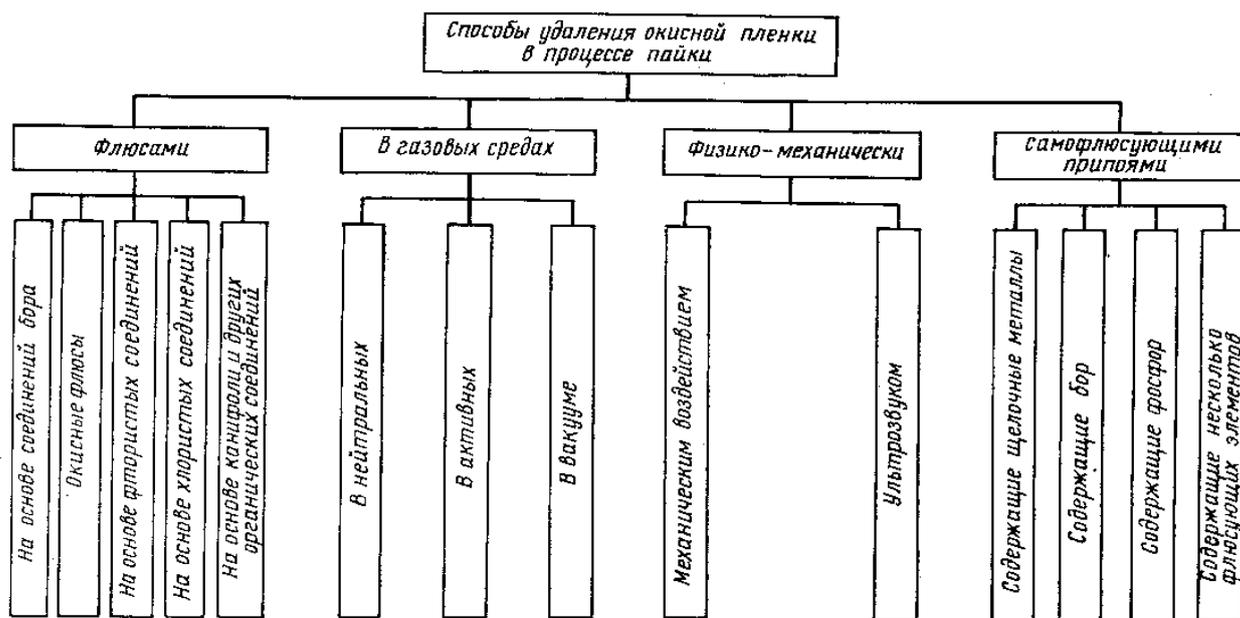


Рис. 3.1. Способы удаления окисной пленки в процессе пайки.

1) Флюсами называются вещества, применяемые в процессе пайки для удаления окисной пленки с поверхности металлов и защиты их от окисления.

а) Флюсы на основе соединений бора применяются при пайке всех черных и цветных металлов.

б) Флюсы на основе фтористых соединений применяются при пайке тех металлов и сплавов, для которых боридные флюсы недостаточно активны и вследствие этого не обеспечивают удаление окисной пленки в процессе пайки.

в) Флюсы на основе хлористых соединений бора применяются главным образом при пайке алюминиевых и магниевых сплавов.

г) Флюсы на основе канифоли и др. органических соединений применяются только для низкотемпературной пайки меди и некоторых сплавов на ее основе.

2) Газовые среды, применяемые при пайке, делятся на нейтральные, активные и вакуумные.

Нейтральной средой называется газовая атмосфера, применяемая для защиты паяемого металла и припоя от окисления в процессе пайки (аргон, гелий).

Активной средой называется газовая атмосфера, применяемая для удаления окисной пленки с паяемого металла и припоя и для защиты их от окисления в процессе пайки (водород, угарный газ). Водород применяется при пайке более ответственных конструкций.

Нейтральные и активные среды, состав которых контролируется и поддерживается постоянным в процессе пайки, называются контролируруемыми газовыми атмосферами.

Вакуум применяется при пайке для предупреждения окисления паяемого металла и припоя, а также для удаления с поверхности некоторых металлов окисной пленки.

3) Физико-механические способы удаления окисных пленок в процессе пайки имеют две разновидности:

а) разрушение окисных пленок механическим воздействием.

б) разрушение окисных пленок ультразвуком под слоем нанесенного на основной металл расплавленного припоя.

4) Самофлюсующимися называются припои, содержащие компоненты, активно реагирующие с окисной пленкой паяемого металла и припоя с образованием легкоплавких шлаков, которые, растекаясь по поверхности основного металла и припоя, предохраняют их от окисления.

### 3.2. Флюсы и их роль

Процесс взаимодействия твердого паяемого металла с расплавленным припоем активно может протекать только после удаления с поверхности паяемого металла окисной пленки, которая препятствует образованию металлических связей.

Несмотря на то, что при подготовке деталей к пайке окисная пленка с них удаляется, в атмосфере воздуха металл снова окисляется. С повышением температуры процесс окисления усиливается. Окисные пленки надежно изолируют металл, поэтому взаимодействие его с расплавленным припоем возможно лишь при условии удаления пленки окислов непосредственно в процессе пайки, что достигается многими средствами, наиболее распространенными из которых является применение флюсов.

Одновременно с удалением окисной пленки и защитой основного металла и припоя от окисления флюс должен удовлетворять еще нескольким требованиям:

1) иметь при температуре пайки достаточную жидкотекучесть;

2) способствовать формированию шва;

3) легко удаляться после пайки;

4) остатки флюса не должны оказывать коррозионного воздействия на паяемый металл;

5) нагрев флюса не должен вызывать изменения его состава и свойств;

6) флюс должен сохранять свои флюсующие свойства в течение всего процесса пайки.

Нанесенный на соединяемые поверхности паяемых металлов и краев флюс в процессе нагрева плавится, растекается, смачивает их при некоторой температуре, вступает в химическое взаимодействие, результатом которого является удаление окисной пленки. С повышением температуры интенсивность этого взаимодействия усиливается.

### 3.3. Композиция флюсов

В зависимости от физико-химических свойств паяемых металлов и припоя в качестве компонентов флюсов применяются соли, кислоты, окислы, а также вещества органического происхождения.

Флюсы могут быть как однородными веществами, например тетраборно-кислый натрий (обезвоженная бура) -  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  или хлористый цинк

$ZnCl_2$ , так и сложными системами, состоящими из двух и более компонентов.

### **3.4. Механизм флюсования**

Согласно существующим представлениям механизм взаимодействия активных компонентов флюсов в процессе пайки обычно сводится к трем основным схемам:

1) химическое взаимодействие между активным флюсующим веществом и окисной пленкой - в результате чего последняя связывается в соединения, растворимые во флюсе, образуя сравнительно легкоплавкий шлак.

2) химическое взаимодействие между активным флюсующим веществом и металлом, в результате чего происходит разрушение и постепенный отрыв окисной пленки.

3) растворение окисной пленки основного металла и припоя во флюсе.

В условиях флюсовой пайки все три схемы действия флюса могут проявляться одновременно, кроме того, на протекание этих процессов определяющее влияние оказывает состав основного металла и припоя, что нельзя не учитывать, особенно при содержании в них таких активных компонентов, как Cr, Al, V, Be. При длительном взаимодействии, например, при печной пайке металлы могут частично растворяться во флюсах, особенно в тех случаях, когда в составе флюса имеются соли основного металла. После расплавления флюса происходит смачивание им окисленной поверхности основного металла. При этом создаются условия для взаимодействия активных компонентов флюсов с поверхностью основного металла и припоя. Наиболее легко смачивают поверхность окисленного металла органические жидкости, что объясняется их низким поверхностным натяжением. Соли, входящие в состав флюсов, имеют в расплавленном состоянии также сравнительно низкое поверхностное натяжение, что способствует хорошей смачиваемости ими поверхности основного металла и припоя. С повышением температуры пайки поверхностное натяжение расплавленных солей снижается, что улучшает условия смачивания.

## **Лекция № 4**

### **Процессы образования паяного шва**

4.1. Состав и свойства припоев

4.2. Классификация припоев

4.3. Процессы смачивания и капиллярного течения припоев

#### **4.1. Состав и свойства припоев**

В качестве припоев для пайки металлов, а также металлов с неметаллическими материалами нашли применение, как чистые металлы, так и сплавы. Чтобы удовлетворять условиям процесса пайки и

обеспечить получение качественных паяных соединений припой должен отвечать следующим требованиям:

- 1) температура плавления припоев должна быть не менее чем на 50-100°С ниже температуры плавления паяемых металлов;
- 2) при температуре пайки припой должен хорошо смачивать основной металл и заполнять соединительные зазоры;
- 3) с паяемыми металлами припой должен сплавляться с образованием кромок коррозионностойких паяных соединений;
- 4) коэффициент термического расширения паяемого металла и припоя не должен резко отличаться;
- 5) припой должен по возможности не содержать дефицитных компонентов;
- б) технология изготовления и применения припоев должна быть общедоступной.

В настоящее время в технике применяются десятки металлов в чистом виде и тысячи сплавов на их основе, которые могут подвергаться пайке. Однако наибольшее распространение в металлоконструкциях получили сплавы на основе железа, меди и никеля, для которых и разработано большинство известных припоев.

#### 4.2. Классификация припоев

Большинство известных припоев можно классифицировать:

- а) по температуре плавления:
  - особолегкоплавкие:  $T_{пл} < 145^{\circ}\text{C}$  - основа Cd-Sn-Pb
  - легкоплавкие:  $145^{\circ}\text{C} < T_{пл} < 450^{\circ}\text{C}$  - основа Al-Cu-Mg
  - среднеплавкие:  $450^{\circ}\text{C} < T_{пл} < 1100^{\circ}\text{C}$  - основа Mg-Al-Cu и др.
  - высокоплавкие:  $1100^{\circ}\text{C} < T_{пл} < 1850^{\circ}\text{C}$  - основа Mn-Co-Ni и др.
  - тугоплавкие:  $T_{пл} < 1850^{\circ}\text{C}$  - основа Ni-Cr-Si-B-Fe и др.
- б) по температурному интервалу плавления
  - с узким температурным интервалом плавления;
  - с широким интервалом плавления;
- в) по способности к флюсованию:
  - флюсуемые - элемент раскислитель Li, K, Ca, P, Zn, B
  - самофлюсующиеся;
- г) по степени расплавления
  - расплавляемые;
  - частично расплавляемые;
- д) по способу изготовления:
  - литые;
  - тянутые;
  - катаные;
  - прессованные;
  - измельченные;
  - спеченные;
  - штампованные;

- е) по виду полуфабриката
- листовые;
  - ленточные;
  - трубчатые;
  - пастообразные;
  - проволочные;
  - прутковые;
  - композитные;
  - металлокерамические;
  - армированные;
  - фасонные;
  - порошковые;
  - плакированные и др.

### 4.3. Процессы смачивания и капиллярного течения припоев

Капиллярные явления играют в пайке исключительно большую роль. Оттого насколько хорошо расплавленный припой смачивает поверхность основного металла, зависит прочность и коррозионная стойкость паяных соединений.

Смачиваемостью называется первая ступень физико-химического взаимодействия жидкости с поверхностью твердого тела, результатом которой является растекание ее тонким слоем. Наименьшая температура, при которой расплавленный припой смачивает основной металл, называется нижним пределом температурного интервала смачивания и лимитируется свойствами припоев сохранять стабильность при нагреве выше температуры ликвидуса и возможностями предупредить окисление их в процессе пайки.

Из теории капиллярности известно уравнение капиллярности (формула Лапласа):

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $p_1$ - давление с вогнутой стороны;

$p_2$ - давление с выпуклой стороны;

$\sigma_{1,2}$  - поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой;

$r_1$  и  $r_2$  - радиусы вогнутой и выпуклой стороны.

Разность давления  $p_1-p_2$  будет уравновешиваться столбом жидкости высотой  $h$ :

$$h = \frac{4\sigma_{1,2} \cdot \cos \theta}{d \cdot \gamma \cdot g},$$

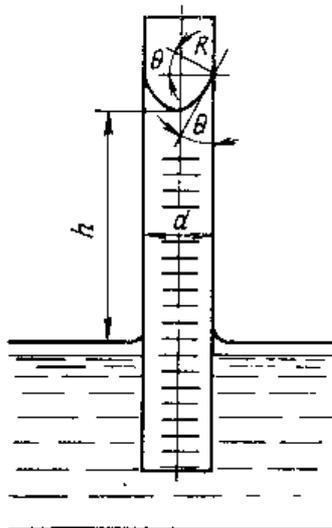
где  $\theta$  - краевой угол или угол смачивания;

$\gamma$  - плотность жидкости;

$g$  - ускорение свободного падения;

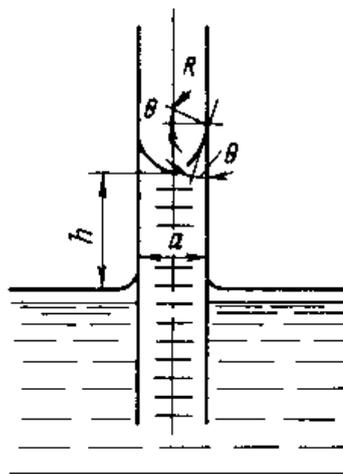
$d$  - диаметр капилляра.

Из уравнения (1) видно, что высота поднятия жидкости в капилляре прямо пропорциональна ее поверхностному натяжению и смачиваемой способности и обратно пропорциональна диаметру капилляра и плотности жидкости.



$$h = \frac{4\sigma_{1,2} \cdot \cos \theta}{d \cdot \gamma \cdot g} \quad (1)$$

Рис. 1. Схема поднятия жидкости по капилляру



$$h = \frac{2\sigma_{1,2} \cdot \cos \theta}{d \cdot \gamma \cdot g} \quad (2)$$

Рис. 2. Схема поднятия жидкости между параллельными пластинами

Из уравнения (2) видно, что высота капиллярного поднятия жидкости в зазоре между двумя параллельными пластинами в 2 раза меньше, чем в капилляре круглого сечения.

При растекании капли жидкости на плоской поверхности твердого тела условия ее равновесия могут быть выражены в виде равновесия векторов сил поверхностного натяжения в точке на границе 3-х фаз. Этой границей является периметр смачивания:

$$\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

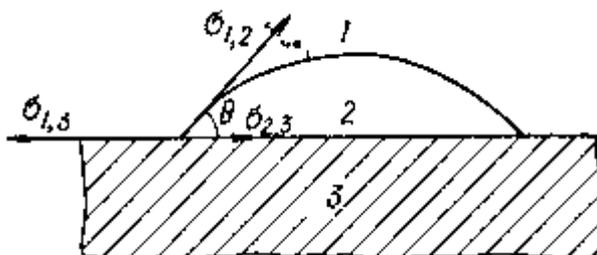


Рис. 3. Схема равновесия векторов сил поверхностного натяжения капли на поверхности твердого тела:

1 – газ; 2 - капля припоя (жидкость); 3 - основной металл твердого тела;  
 $\sigma_{1,3}$  - поверхностное натяжение между твердым телом и газовой средой, действующей на каплю по периметру ее основания;

$\sigma_{2,3}$  - поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом;

$\sigma_{1,2}$  - поверхностное натяжение на границе с газовой средой.

$$\text{Из уравнения (3) выразим } \cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}} \quad (4)$$

Это выражение является вторым уравнением капиллярности.

$\cos \theta$  - коэффициент смачивания, характеризует смачивающую способность жидкости.

При  $\cos \theta < 0$  или  $\cos \theta > 90^\circ$  жидкость практически не смачивает поверхность твердого тела.

При  $\cos \theta = 1$  или  $\theta = 0$  имеет место полное смачивание поверхности твердого тела.

Согласно статической теории жидкости смачивание поверхности основного металла расплавленным припоем и затекание расплавленного припоя в капиллярный зазор зависит от поверхностного натяжения в расплавленном состоянии.

Согласно первому уравнению капиллярности, чем выше значение поверхностного натяжения жидкости, тем выше поднимается она в капиллярном зазоре:

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Процесс смачивания расплавленным припоем основного металла в значительной мере зависит от соотношения их физико-химических свойств и, в частности запаса свободной поверхностной энергии основного металла. Эта энергия твердого металла определяет величину возникающих при пайке сил взаимодействия с припоем и является косвенным показателем активности протекающих между ними процессов.

Поэтому при анализе явления смачивания и капиллярного течения при пайке рассматривают всю совокупность физико-химических свойств припоя и основного металла, а также условия пайки.

В зависимости от смачивающей способности припоев находят способность их растекания по поверхности паяемого металла. Эта характеристика припоев оценивается коэффициентом растекания равным разности работ адгезии припоя к паяемому материалу и когезии частиц припоя:

$$\begin{aligned} k &= A_a - A_k; \\ A_a &= \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}; \\ A_k &= 2\sigma_{1,2}; \\ k &= \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3} - \sigma_{1,2} = \sigma_{1,3} - \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3} = \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2} \cdot \cos \theta - \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3} = \sigma_{1,2} \cdot \cos \theta - \sigma_{1,2} = \\ &= \sigma_{1,2} (\cos \theta - 1) \quad (5) \end{aligned}$$

где  $k$  - коэффициент растекания;

$A_a$  - работа адгезии;

$A_k$  - работа когезии.

Из последнего выражения следует, что коэффициент растекания находится в непосредственной зависимости от краевого угла смачивания. И полное растекание будет иметь место при полном смачивании, т.е. при  $\cos\theta = 1$ .

Кроме этого на процесс смачивания и затекания припоя в соединительный зазор существенно влияет способ удаления окисной пленки в процессе пайки.

Так, в случае флюсовой пайки, наряду с удалением окисной пленки с паяемого металла и припоя, флюсы действуют как поверхностно активные вещества, снижая поверхностное натяжение расплавленных припоев, что способствует улучшению смачивания паяемой поверхности.

При применении активных или нейтральных газовых сред, наряду с удалением окисной пленки, может происходить взаимодействие примесей, содержащихся в газовой среде с основным металлом и припоем.

На процесс смачивания и капиллярного течения припоя в зазоре значительно влияют такие технологические факторы, как вид механической обработки основного металла, способ очистки перед пайкой, режим пайки и другие. Например, шлифованные поверхности хорошо смачиваются расплавленным припоем; полированные с применением паст поверхности плохо смачиваются расплавленным припоем из-за остатков пасты; детали, обдутые песком, смачиваются припоями удовлетворительно.

## **Лекция № 5**

### **Физико-химические процессы образования паяного шва**

- 5.1. Процессы диффузии и растворения при пайке.
- 5.2. Процесс кристаллизации при пайке.
- 5.3. Обработка деталей после пайки.

#### **5.1. Процессы диффузии и растворения при пайке.**

Диффузией называется процесс перемещения частиц в направлении убывания их концентрации. В результате диффузии происходит выравнивание состава вещества и равномерное заполнение всего объема. Диффузия в твердых веществах протекает очень медленно. Однако с повышением температуры процессы диффузии заметно усиливаются.

При высокотемпературной пайке расплавленный припой находится в контакте с основным металлом от нескольких секунд до десятков минут. За это время протекает диффузия компонентов припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя.

Существование диффузии в металлах показывает, что при определенных условиях атомы или ионы смещаются из своих положений в узлах кристаллической решетки и могут перемещаться по всему объему.

В твердых металлах диффузия может происходить по поверхности (поверхностная диффузия), по границам зерен (граничная диффузия) и в объеме отдельных зерен (объемная диффузия).

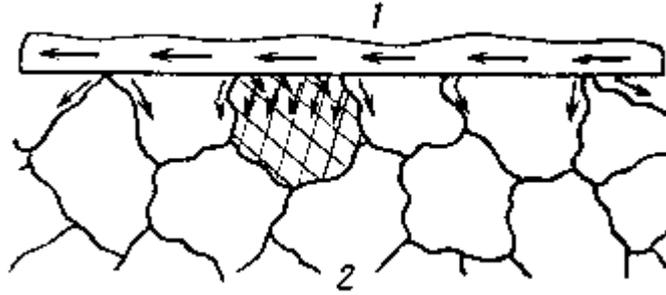


Рис. 5.1. Схема диффузии припоя в основной металл:  
1 – припой; 2 – основной металл.

Диффузия по границам зерен в некоторых случаях протекает очень интенсивно, приобретая характер растворения основного металла в расплавленном припое, в результате чего целые зерна отрываются и переходят в расплав припоя. Такую картину можно наблюдать, например, при пайке меди припоями ПСр-72 с добавкой никеля.

Существуют термины атомная и реактивная диффузия.

Атомная диффузия наиболее просто протекает в процессе диффузии и растворения, когда взаимодействующие металлы (припой и основной металл) не образуют между собой интерметаллических соединений. В этом случае процесс переноса атомов твердого основного металла в жидкий припой протекает активно и определяется скоростью диффузии.

Реактивная диффузия. Если паяемый металл и расплавленный припой образуют между собой химическое соединение, то в процессе пайки на границе раздела основной металл - припой в результате реакции на твердой поверхности может возникнуть слой интерметаллических соединений. Если основной металл и расплавленный припой могут образовывать между собой несколько интерметаллических фаз, то на границе с твердым металлом возникает несколько слоев. Последовательность их возникновения будет зависеть от условия равновесия между образующимися фазами и расплавом припоя. Физико-химическая природа и строение реактивных фаз, образующихся на границе основной металл - припой зависит от внешних условий процесса и в первую очередь от температуры.

Количественная оценка диффузии может быть произведена на основе законов диффузии.

Согласно первому закону диффузии:  $dm = -DS\Delta c/x dt$ ,

где  $dm$  - количество диффундирующего вещества;

$D$  - коэффициент диффузии, численно измеряемый количеством вещества в молях или граммах, продиффундировавшего за единицу времени через единицу площади ( $см^2$ ) при градиенте концентрации равном единице;

$S$  - площадь в перпендикулярном направлении диффузии;  
 $\Delta c/x$  - градиент концентрации  $C$  в направлении диффузии;  
 $dt$  - время диффузии;  
 знак "-" в формуле указывает на то, что диффузия протекает в сторону уменьшающейся концентрации вещества.

### **5.2. Процесс кристаллизации при пайке.**

Кристаллизация при пайке является сложным процессом и имеет ряд особенностей:

1) Кристаллизация протекает в узком соединительном зазоре при незначительной толщине прослойки жидкого металла.

2) При кристаллизации происходит взаимодействие между расплавленным припоем и твердым основным металлом, поверхности которых освобождены от окисных пленок.

3) При кристаллизации в капиллярном зазоре диффузия приводит к сильно выраженной зональной ликвации сплавов в шве.

4) Кристаллизация образующегося в шве сплава происходит или непосредственно на кристаллитах основного металла или на слое интерметаллического соединения, возникающего в отдельных случаях на границе основной металл - припой.

При температуре пайки в результате взаимодействия основного металла и расплавленного припоя в шве образуется сплав, отличающийся по составу и свойствам 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, к центру шва компонентами основного припоя. Это объясняется тем, что более тугоплавкая часть расплава в шве кристаллизуется в первую очередь на поверхности основного металла, оттесняя более легкоплавкую часть к центру шва.

На структуру и свойства паяных швов большое влияние оказывает также скорость охлаждения в процессе кристаллизации. Медленное охлаждение приводит к образованию более равновесной и грубозернистой структуры. С увеличением скорости охлаждения структура становится более мелкозернистой.

Таким образом, изменяя режим и условия пайки можно существенно влиять на структуру и свойства паяных швов, а следовательно, и на качество паяных изделий.

### **5.3. Обработка деталей после пайки.**

После пайки паяные детали подвергаются дальнейшей обработке, связанной с удалением остатков флюса, зачисткой наплывов припоя и термической обработкой.

Для удаления остатков флюсов деталь промывают в холодной или горячей воде в специальных растворах или зачищают металлической щеткой, обдувают песком и т.п.

Остатки флюсов, содержащих хлористые соли щелочных металлов и щелочно-земельных металлов, необходимо удалять особенно тщательно, т.к. они оказывают активное коррозионное воздействие на металл.

Удаление остатков хлоридных флюсов с алюминиевых сплавов производится промывкой в горячей и холодной воде, после чего изделие погружается на 5-10 мин в 5% - раствор хромового ангидрида для пассивирования поверхности.

Медные и латунные детали после пайки с применением флюсов обрабатывают в спец. пассивирующем растворе при температуре 40-50<sup>0</sup>С в течение 10-15 минут, затем следует промывка в горячей воде и осушка нагретым воздухом.

Остатки боридных флюсов сложного состава после пайки в большинстве случаев образуют прочную стекловидную пленку, которая не растворима в воде и может быть удалена только опескоструиванием или другими механическими средствами.

Остатки тетраборнокислого натрия с деталей паянных медно-цинковыми и серебряными припоями можно удалить в 10 % растворе серной кислоты. Детали погружаются на 10-15 минут в этот раствор, подогретый до температуры 20-40<sup>0</sup>С. После этого промываются горячей и холодной проточной водой и обдуваются горячим воздухом.

## **Лекция № 6**

### **Конструирование и расчет паяных соединений**

6.1. Конструирование паяных соединений

6.2. Расчет паяных соединений на прочность.

#### **6.1. Конструирование паяных соединений**

Паяным соединением называется элемент паяного изделия, включающий паяный шов и прилегающие к нему участки соединяемых металлов. Паяным швом называется прослойка металла между соединяемыми деталями, состоящая из зоны сплавления и диффузионных зон, величина которых зависит от состава припоя и паяемых металлов, а также от режимов пайки. В зависимости от вида конструкции и ее назначения пайка может применяться при соединении плоских элементов деталей, стержневых и трубчатых элементов деталей, криволинейных поверхностей элементов деталей между собой и с плоскими элементами.

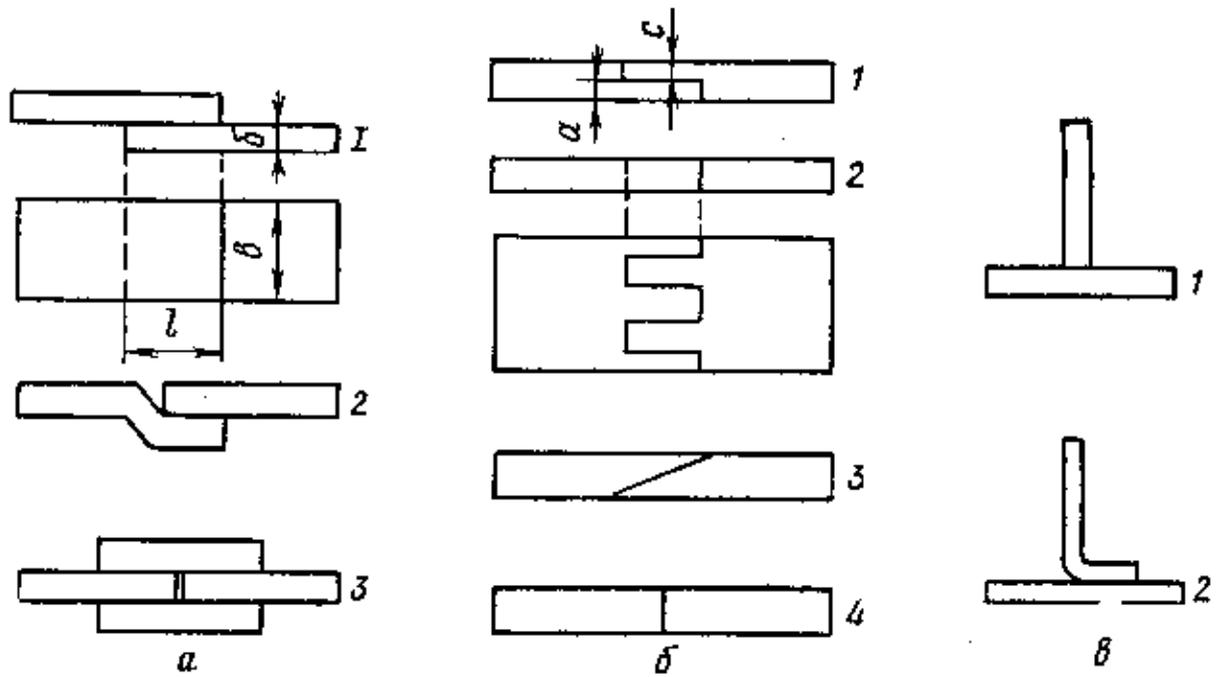


Рис. 6.1. Виды соединений плоских элементов при пайке:

а – нахлесточное;

б - ступенчатое и гребенчатое;

в – тавровое.

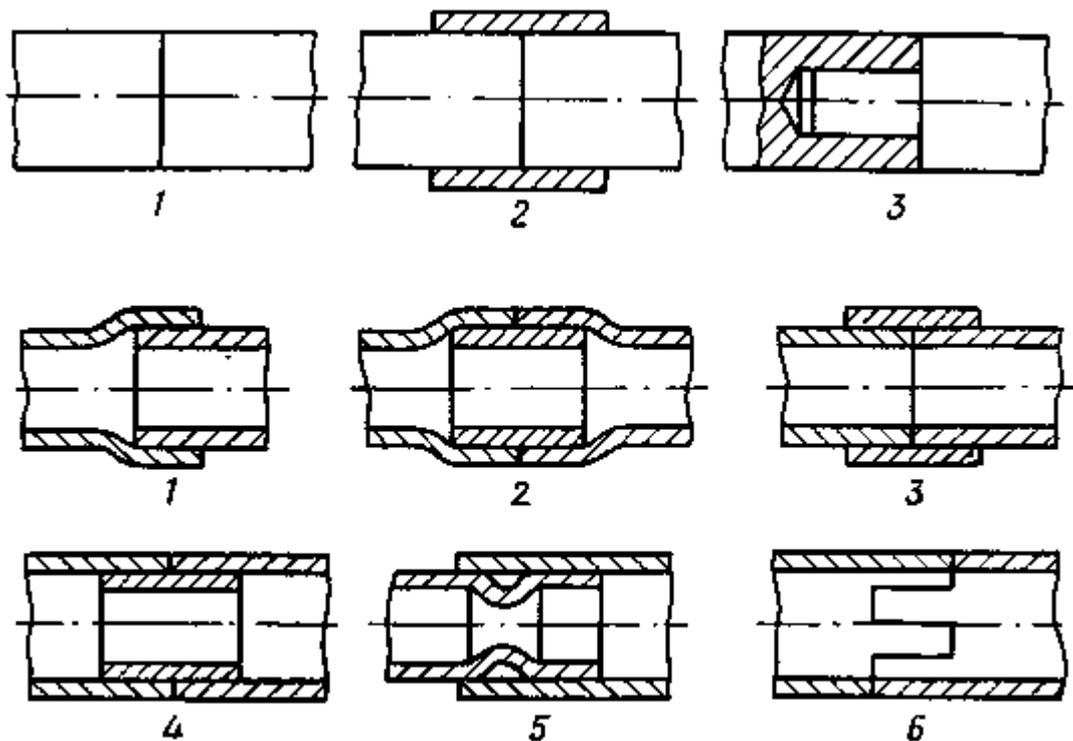


Рис. 6.2. Соединения стержневых и трубчатых элементов деталей при пайке между собой.

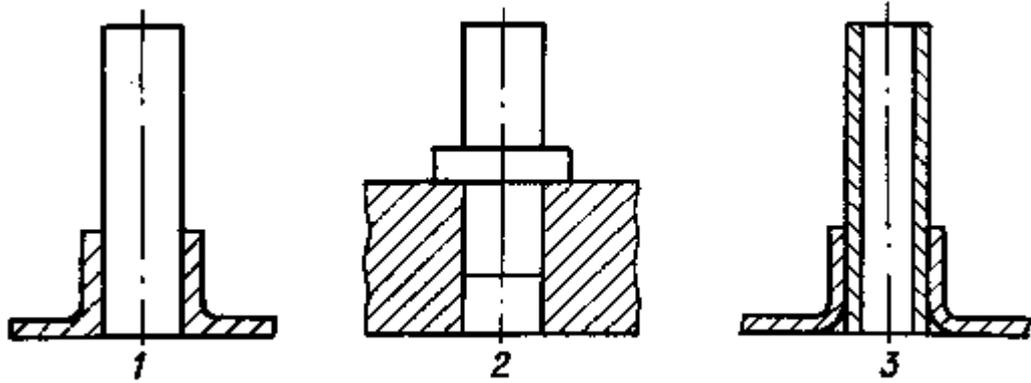


Рис 6.3. Соединение стержневых и трубчатых элементов при пайке с плоскими элементами.

К паяным соединениям в зависимости от назначения изделия могут предъявляться, наряду с общими, и специальные требования:

- 1) по герметичности;
- 2) электропроводности;
- 3) коррозионной стойкости,

которые должны учитываться при выборе основного металла, припоя, способа пайки и при конструировании изделия. Кроме этого, одно из основных условий конструирования паяных изделий - обеспечение в соединении капиллярного зазора и создание условий для течения в нем припоя. Оптимальные значения зазоров, применяемых при пайке некоторых сплавов, приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Основной металл	Припой	Величина зазора, мм
Углеродистые стали	Медь	0,02-0,15
	Латунь	0,05-0,30
	Серебро	0,05-0,15
Нержавеющие стали	Медь	0,02-0,15
	Латунь	0,05-0,30
	Серебро	0,05-0,15
	Никельхромовые припои	0,05-0,20
Медь и медные сплавы	Медноцинковый	0,10-0,30
	Меднофосфорный	0,02-0,15
	Серебро	0,03-0,15
Титан	Серебро	0,05-0,10
	Серебряномарганцевый	0,05-0,10
Алюминий	На алюминиевой основе	0,10-0,30

При конструировании паяного изделия необходимо предусматривать условия закрепления элементов изделия в процессе пайки. Это особенно важно при групповой пайке изделий сложной конфигурации. Отдельные части паяного изделия перед пайкой могут закрепляться путем связывания нихромовой проволокой при помощи зажимов, подставок, соединяемых элементов, конструкций.

Припой применяется в виде проволоки, прутков, полос, фольги, зерен, порошка, паст и т.п., что необходимо также учитывать при конструировании деталей.

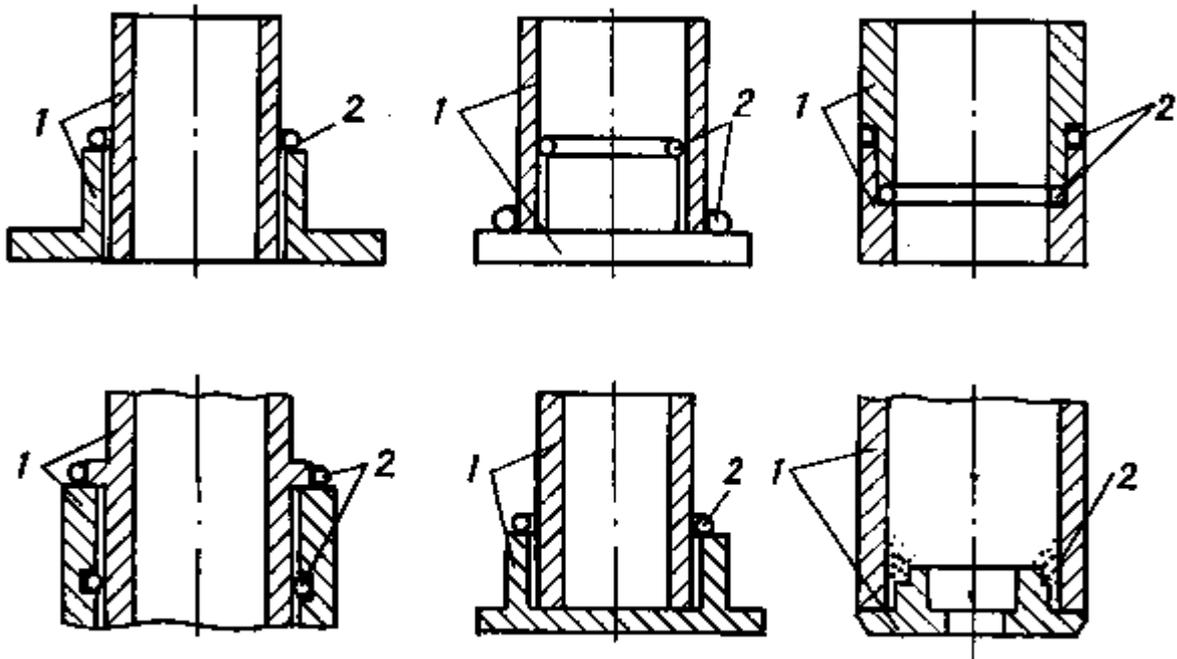


Рис. 6.4. Способы размещения припоя в соединениях деталей.

Особенности конструирования паяных изделий неразрывно связаны с технологией пайки. Как при общем, так и при местном нагреве зона шва должна равномерно нагреваться до температуры пайки. Это обеспечивает сохранение заданного зазора по всему шву, что, в свою очередь, способствует равномерному течению флюса и припоя.

## 6.2. Расчет паяных соединений на прочность.

При расчете паяных соединений на прочность необходимо исходить из того, что прочность паяного изделия определяется прочностью ее наиболее слабого элемента. Таким элементом, как правило, является паяный шов, т.к. прочность припоя в литом состоянии обычно ниже прочности основного металла. Поэтому при конструировании необходимо выбирать такой тип соединения и так его располагать, чтобы обеспечить равнопрочность всего изделия. Это можно достигнуть только при правильном сочетании материалов, технологии пайки и соответствующем конструировании.

Прочность паяного соединения при одном и том же основном металле и припое можно регулировать величиной перекрытия соединяемых элементов, т.е. изменением площади шва.

Расчет прочности паяных соединений производится на основе тех же предпосылок, что и сварных. Если элемент паяной конструкции работает на продольную растягивающую силу, то расчетным усилием паяного соединения является:

$$P=[\sigma]_p \cdot F,$$

где  $[\sigma]_p$  - допустимое напряжение для основного металла изделия при растяжении;

$F$  - площадь поперечного сечения наиболее слабого из соединяемых пайкой элементов конструкции.

При работе элемента паяной конструкции на сжатие расчетным усилием паяного соединения является:

$$P=[\sigma]_{сж} \cdot F,$$

где  $[\sigma]_{сж}$  - допустимое напряжение для основного металла.

При работе элемента паяной конструкции на изгиб расчетный момент определяется из соотношения

$$M=[\sigma]_p \cdot W,$$

где  $W$  - момент сопротивления сечения наиболее слабого из соединяемых элементов.

Для нахлесточных соединений напряжение в паяном шве на срез,

$$P=[\tau]_{ср} \cdot b \cdot l,$$

где  $[\tau]_{ср}$  - допускаемое напряжение в паяном шве на срез,

$$[\tau]_{ср}=0,7 [\sigma]_p, \text{ Н/м}^2;$$

$b$  - ширина шва, м;

$l$  - величина нахлестки, м.

Величина нахлестки может быть определена из условия равнопрочного соединения.

Допустимое напряжение для основного металла изделия составляет:

$$P=[\sigma]_p \cdot F.$$

Эта нагрузка должна восприниматься паяным швом без разрушения, тогда приведенное выражение можно приравнять:

$$[\sigma]_p \cdot F=[\tau]_{ср} \cdot b \cdot l,$$

откуда величина нахлестки:

$$l = \frac{[\sigma]_p \cdot F}{[\tau]_{ср} \cdot b}$$

При применении ступенчатого паяного соединения расчет производится при одновременном учете срезающих и растягивающих напряжений:

$$P=[\tau]_{ср} \cdot b \cdot l + [\sigma]_p \cdot b(a+c), \text{ Н}$$

где  $[\sigma]_p$  - допустимое напряжение в паяном шве на растяжение;

а и с - толщина ступеней соединения.

Если стыковое паяное соединение работает на растяжение, то допускаемые усилия в нем определяются из соотношения:

$$P = [\sigma]_p \cdot b \cdot \delta, \text{ Н - при растяжении;}$$

$$P = [\sigma]_{сж} \cdot b \cdot \delta, \text{ Н - при сжатии.}$$

## Лекция № 7

### Технология пайки различных материалов

- 7.1. Технология пайки конструкционных сталей
- 7.2. Технология пайки чугуна
- 7.3. Технология пайки инструментальных сталей и твердых сплавов.
- 7.4. Технология пайки титана и его сплавов
- 7.5. Технология пайки алюминия и его сплавов
- 7.6. Технология пайки меди и ее сплавов.

#### 7.1. Технология пайки конструкционных сталей

Металлы и сплавы, применяемые в промышленности, существенно отличаются друг от друга по составу и физико-химическим свойствам, поэтому они требуют различного подхода при решении задач, связанных с подготовкой их к пайке, удалением окисной пленки в процессе пайки, выбором припоя и режимов пайки.

а) углеродистые и низколегированные стали.

Процесс пайки низкоуглеродистых и низколегированных сталей не вызывает особых затруднений и может быть осуществлен всеми известными способами. Высокотемпературная пайка углеродистой и низколегированной сталей производится медью, медно-цинковыми и другими припоями на медной основе.

Пайка углеродистых и низколегированных сталей при низких температурах производится главным образом оловянно-свинцовыми и свинцовыми припоями. В качестве флюса наибольшее распространение получили водные растворы хлористого цинка.

Подготовка поверхности, сборка, нанесение припоев и флюсов, процесс пайки и обработка после пайки углеродистых и низколегированных сталей осуществляются по обычной технологии.

б) высоколегированные конструкционные стали

Эти стали также можно паять всеми способами с применением рекомендованных выше припоев и флюсов.

Затруднения в процессе пайки встречаются только в тех случаях, когда легирующие элементы, например, хром, образуют на поверхности стали химически устойчивые окислы. В этом случае применяют более активные флюсы, а в качестве газовой среды используют трехфтористый бор в смеси с азотом или аргоном. Возможен и другой вариант высокотемпературной пайки высоколегированной стали без снижения

прочности основного материала - это совмещение процесса пайки с закалкой и последующим отпуском. Такая термическая обработка паяных изделий дает возможность не только сохранить прочность основного металла, но и существенно повысить прочность паяных соединений.

в) нержавеющие и жаропрочные стали

В связи с высоким содержанием хрома поверхность этих сталей покрыта химически устойчивой окисной пленкой, состоящей в значительной части из труднорастворимых в обычных флюсах окислов хрома, поэтому пайка данных сталей представляет некое затруднение. Так, например, окисная пленка на нержавеющих жаропрочных сталях в газовых восстановительных средах восстанавливается при температуре пайки 1200°С, в то время как на обычных конструкционных сталях окисная пленка восстанавливается при 900°С. Поэтому при пайке нержавеющих и жаропрочных сталей в качестве восстановительной атмосферы часто используют трехфтористый бор в смеси с инертными газами, который более активен и восстанавливает окислы при более низких температурах.

Длительный нагрев нержавеющих аустенитных сталей при температуре 500-700°С делает их склонными к интеркристаллитной коррозии, поэтому нагрев под пайку и охлаждение после пайки нужно производить быстро.

## 7.2. Технология пайки чугуна

Основная трудность при пайке чугуна - наличие в его структуре графита, затрудняющее смачивание поверхности основного металла расплавленным припоем.

Для удаления графита обычно применяют пескоструйную обработку с последующим выжиганием графита окислительным пламенем газовой горелки или удаления его путем электрохимической обработки в соляной ванне при температуре 450 - 510°С.

Для удаления окисной пленки и защиты чугуна от окисления более целесообразно применять также активные флюсы № 209 и № 284 (таблица 7.1.), которые растворяют графит на поверхности чугуна в процессе пайки и благодаря этому обеспечивают надежное смачивание припоем соединяемых поверхностей.

Таблица 7.1.

Марка	Химический состав, %			Температура плавления °С
	Фтористый калий (обезвоженный)	Фтороборат калия	Борный ангидрит	
№ 209	40 – 44	21 – 25	33 - 37	600 – 850
№ 284	33 – 37	40 – 44	23 - 25	500 – 850

При пайке чугунов в качестве припоев применяют обычно сплавы на медной основе, например, латуни.

Перегрев чугуна связан со структурным превращением, что при охлаждении влечет за собой выделение хрупкого цементита.

### 7.3. Технология пайки инструментальных сталей и твердых сплавов.

В качестве инструментальных иногда применяются высокоуглеродистые стали с содержанием 0,6-1,2% углерода. Такие стали можно паять всеми способами с учетом технологических рекомендаций по пайке конструкционных сталей и чугуна. Из-за недостаточной теплостойкости указанных сталей их легируют вольфрамом (до 18%), хромом (до 5%), ванадием (до 4%) и другими элементами, увеличивающими жаропрочность и позволяющими благодаря этому значительно повышать скорость резания. Такие инструментальные стали, называемые быстрорежущими, подвергают закалке с температурой 1200-1300°C и последующим отпуском при температуре 560-580°C или обработкой холодом. Поэтому быстрорежущие стали припаивают к корпусу инструмента из конструкционной стали в указанном интервале температур, применяя при этом высокотемпературные никелевые припои или ферросплавы, например, ферромарганец, содержащий 70-80 % марганца. Пайку инструмента из быстрорежущих сталей производят в газопламенных печах погружением в соляную ванну, а также индукционным способом с использованием флюсов № 200 и № 201 (состав которых приведен в таблице 7.2).

Таблица 7.2

Марка флюса	Химический состав				Температура плавления, °C
	Борная кислота	Тетраборно кислый натрий	Фтористый кальций	Легатура	
№ 200	68-72	10-21	8-10	-	850-1150
№ 201	79-81	13-15	4-8	0,4-0,6	850-1100

Состав легатуры: 48 % H, 48 % Cu, 4 % Mn.

Сразу после затвердевания припоя производится закалка инструмента.

В настоящее время во всех областях техники большое распространение получил твердосплавный инструмент. Поверхность твердых сплавов трудно смачивается расплавленными припоями, поэтому при пайке следует использовать более активные боридно-фторидные флюсы № 200 и 201 и др.

Наилучший результат, т.е. наибольшая долговечность инструмента достигается при пайке серебряными припоями легированными для теплостойкости никелем или марганцем. Однако ввиду дефицитности серебряные припои для пайки твердосплавного инструмента применяются редко. Наибольшее распространение получили медно-цинковые припои, типа латуни Л-62, легированной для повышения теплостойкости небольшими добавками никеля, марганца или алюминия.

Твердосплавные инструменты можно паять различными способами, но наиболее перспективными является пайка методом погружения и индукционная, которая дает возможность механизировать и даже автоматизировать этот процесс.

#### **7.4. Технология пайки титана и его сплавов**

Титан и его сплавы обладают высокой химической активностью по отношению к газам. При взаимодействии с воздухом титан не только окисляется, но и образует нитриды. В результате взаимодействия с водородом на поверхности титана и титановых сплавов образуются также хрупкие гидриды. Поэтому газовые атмосферы, содержащие азот и водород для пайки титана и титановых сплавов не пригодны. На поверхности титана всегда имеется альфированный слой, насыщенный атмосферными газами. Перед пайкой этот слой необходимо удалить пескоструйной обработкой или травлением в растворе следующего состава: 20-30 мл HF, 30-40 мл HCl на литр воды. Время травления 5-10 мин при комнатной температуре. При такой обработке на поверхности титана все же остается тонкая пленка, препятствующая смачиванию титана припоем.

Обычно пайку титана и его сплавов ведут в среднем вакууме или чистом аргоне при температуре 800-900°C, что способствует быстрой очистке поверхности титана и хорошему смачиванию его припоями. В качестве основы припоя часто выбирают серебро, которое образует с титаном интерметаллиды, или алюминий, который образует с титаном ограниченную область твердых растворов, что позволяет рассчитывать на получение менее хрупких паяных соединений.

Для получения более пластичных и прочных соединений можно применить диффузионную пайку титана, сущность которой заключается в том, что изделие при нанесении минимально необходимого количества припоя, например, никеля, железа и других металлов, выдерживают при температуре пайки до тех пор, пока в паяном соединении в результате изотермической кристаллизации и диффузии в твердом состоянии не образуется твердый раствор. Прочность соединений, полученных таким способом, близка к прочности основного металла.

#### **7.5. Технология пайки алюминия и его сплавов**

Главным препятствием при пайке алюминия является окисная пленка  $Al_2O_3$ , которая почти мгновенно образуется при ее удалении механическим способом. Окисная пленка алюминия является весьма стойким химическим соединением и имеет температуру плавления 2050°C. Ее не удастся растворить или восстановить обычными флюсами, применяемыми при пайке меди и стали. Для пайки алюминия и его сплавов применяются следующие способы: пайка трением, абразивная пайка,

ультразвуковая пайка, пайка горелкой, ацетилено-кислородным пламенем в печах, в соляной ванне и контактно-реактивная пайка.

В качестве припоя применяется припой на основе алюминия, например, № 34А с флюсом № 34А.

Состав флюса № 34А: KCl - 54-56%, LiCl - 29-35%, NaF - 9-11%, ZnCl - 8-12%.

Температура пайки - 420-620<sup>0</sup>С

Состав припоя № 34А: 6-0,5% Si; 28-1% Cu, остальное Al.

Температура плавления - 525<sup>0</sup>С

### **7.6. Технология пайки меди и ее сплавов.**

Окисная пленка на поверхности меди и ее наиболее распространенных сплавов – латуней, оловянистых бронз и медно-никелевых сплавов – легко восстанавливается в газовых средах или удаляется флюсами, поэтому процесс пайки этих металлов возможен всеми известными способами.

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 на границах зерен, а образующиеся при этом под большим давлением пары воды разрывают металл, имеющий при высокой температуре низкую прочность.

При пайке медных сплавов, легированных такими активными металлами, как алюминий, бериллий, хром и др., целесообразно их покрывать перед пайкой слоем никеля или меди толщиной 5 –10 мкм. По никелю и меди припои хорошо растекаются без флюса не только в восстановительной среде или вакууме, но даже в инертной атмосфере с образованием прочных соединений.

При пайке меди и ее сплавов сравнительно тугоплавкими припоями на основе меди или серебра можно использовать почти все известные флюсы на основе соединений бора.

При пайке меди оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями можно применять любой из известных флюсов, но целесообразно пользоваться спиртоканифольным флюсом, остатки которого не вызывают коррозию меди и поэтому их можно не смывать после пайки.

При пайке латуней и бронз спиртоканифольный флюс непригоден, потому что он может растворять окислы только на чистой меди.

Для высокотемпературной пайки меди используют чаще всего серебряные припои и реже припои на медной основе, потому что последние сравнительно тугоплавки и вызывают местное растворение основного металла в процессе пайки. Сравнительно легкоплавкими являются медно-фосфористые припои, которые дают удовлетворительные результаты при пайке меди, но для латуней их не применяют из-за хрупкости паяных соединений в результате образования хрупких фосфидов цинка

## Лекция № 8

### Контроль паяных соединений.

8.1. Дефекты паяных соединений.

8.2. Методы контроля паяных соединений.

#### 8.1. Дефекты паяных соединений.

Дефекты, образующиеся при изготовлении паяных конструкций, можно разделить на три группы:

- 1) дефекты заготовки и сборки под пайку;
- 2) дефекты паяных швов;
- 3) дефекты паяных соединений в целом.

Дефектами паяных швов являются:

##### 1. Поры

Причиной образования мелких газовых пор является выделение в процессе пайки газов, содержащихся в припое и флюсов, а также влияние окисной пленки в условиях недостаточного нагрева или малой выдержки при температурной пайке. При применении серебряных припоев основной причиной образования пор служит эффект сфероидизации. Поры, образовавшиеся в результате этого явления, отличаются от газовых пор наличием металлического остатка внутри поры. Причиной их образования в расплаве служит массоперенос через шлаковую пленку, находящуюся на поверхности сфероида, в результате наличия градиента концентрации компонентов в сфероиде и зоне сплавления.

##### 2. Раковины

Раковины в зоне сплавления образуются в результате недостаточного питания соединительного зазора припоем и усадочных явлений, происходящих при кристаллизации.

3. Отсутствие в отдельных местах спая между основным металлом и припоем

Причиной неспая является несмачивание в этих местах паяемого металла припоем, большой зазор и наличие влаги во флюсе и на заготовках припоя в виде адсорбированного слоя.

##### 4. Шлаковые включения

Шлаковые включения в шве образуются вследствие небрежной подготовки поверхности соединяемых элементов изделия перед пайкой, а также при слишком длительном нагреве под пайку, когда флюс, реагируя с основным металлом, образует твердые остатки, которые плохо вытесняются припоем. При пайке газовой горелкой шлаковые включения могут образовываться в результате применения пламени с избытком кислорода.

##### 5. Трещины

Трещины возникают под действием собственных напряжений в основном металле или при сотрясении паяемого изделия в процессе пайки, когда закристаллизовавшийся припой имеет низкую прочность.

Трещины, образующиеся в процессе кристаллизации и усадки припоя при высоких температурах, называются горячими. Трещины, образующиеся при температурах до 200°С, называются холодными.

В зависимости от расположения трещин в паяных соединениях их делят на три группы: трещины в шве, трещины в основном металле, трещины в зоне спая.

Образование трещин наиболее часто наблюдается в швах, спаянных припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации, а также загрязненными примесями.

Горячие и холодные трещины в основном металле возникают под действием собственных напряжений, образующихся при сборке, нагреве под пайку, при кристаллизации металла шва и охлаждении паяного изделия.

Трещины в зоне спая часто образуются при пайке разнородных материалов с резко различными физико-химическими свойствами.

#### 6. Недостаточное заполнение зазора припоем

На качество заполнения зазора большое влияние оказывает наличие вредных примесей в припоях. При загрязнении припоев окислами резко снижается их жидкотекучесть.

К дефектам паяного изделия в целом относятся деформации и коробления, появляющиеся в результате неравномерного нагрева и охлаждения в процессе пайки, а также из-за небрежной сборки под пайку. Образование этих дефектов можно предупредить или уменьшить применяя нагрев, постепенно охлаждая изделие после пайки, а также применяя приспособления, надежно фиксирующие положение отдельных элементов изделия при сборке, пайке и охлаждении. Для предотвращения образования дефектов в паяных соединениях в первую очередь необходимо строго соблюдать технологию пайки.

## 8.2. Методы контроля качества.

Качество паяных швов в значительной степени зависит от правильного выбора конструкции соединения, припоя, флюса или защитной атмосферы и технологии пайки. При изготовлении деталей и узлов методом пайки необходимо строго контролировать не только готовую продукцию, но и процесс пайки, включая подготовительные операции.

Контроль при подготовке к пайке заключается в проверке соответствия материала изделия, припоя и флюса маркам, указанным в технологической карте, точности подгонки, включая величину зазоров, нахлестки и других параметров соединения, а также чистоты поверхности соединяемых деталей.

В процессе пайки необходимо контролировать температуру, давление и время выдержки, не допуская перегрева деталей и припоя.

После пайки проводят приемку и испытание паяных изделий. Для испытания качества паяных соединений могут быть применены методы контроля без разрушения и с разрушением.

Неразрушающие методы контроля:

#### 1. Визуальный осмотр

Внешний осмотр часто совмещают с промером заготовок, сборочных зазоров, с проверкой размеров готового изделия.

Внешним осмотром проверяют качество заготовок и сборку под пайку, а также качество готового изделия. При осмотре заготовок обращают внимание на чистоту соединяемых поверхностей, на отсутствие забоин, вмятин, на качество покрытия. При осмотре сборки обращают внимание на правильность установления капиллярных зазоров, на наличие и закрепление припоя, на надежность закрепления элементов паяемого изделия. При контроле готового изделия проверяют соответствие его чертежу и техническим условиям.

Внешний осмотр паяных соединений позволяет выявить качество заполнения зазоров, образование галтелей, наличие трещин в галтельных участках шва и других наружных дефектов.

#### 2. Метод контроля ультразвуком

Этот метод контроля основан на способности ультразвуковых колебаний отражаться от поверхности внутренних неоднородностей металла. Ультразвуковой контроль отчетливо выявляет такие дефекты в паяных соединениях, как трещины, поры, раковины, шлаковые включения, незаполнение шва припоем.

#### 3. Магнитные методы контроля

Они основаны на явлении рассеивания магнитного поля в местах расположения трещин и других дефектов. При применении этих методов легко обнаруживаются те дефекты, которые имеются на поверхности или неглубоко от поверхности и не располагаются в направлении действия магнитного поля.

При контроле методом магнитного порошка паяные детали намагничиваются постоянным или переменным током. После этого на поверхность намагниченных деталей наносят слой сухого магнитного порошка при помощи пульверизатора или детали погружают в суспензию магнитного порошка в масле или керосине. Скопление порошка на поверхности паяных деталей указывает место нахождения дефектов.

#### 4. Рентгеновский контроль

Применяется при определении внутренних дефектов ответственных паяных соединениях. Для контроля паяных соединений применяют рентгеновские аппараты низкого напряжения. По рентгеновским снимкам определяют размеры, расположение и характер внутренних дефектов в паяных швах.

#### 5. Испытание паяных соединений давлением воздуха или воды

Этот метод контроля производится после внешнего осмотра.

При пневмоиспытании в паяное изделие нагнетают воздух до давления, установленного техническими условиями, после чего швы смачивают мыльной водой или изделие погружают в воду. Неплотности определяют по появлению пузырьков воздуха на паяных швах.

При испытании давлением воздуха для повышения чувствительности к нему можно добавлять аммиак в количестве 1% по объему. В этом случае паяные швы покрывают бумажной лентой, пропитанной 5% - ным водным раствором азотно-кислой ртути или раствором фенолфталеина. После выдержки 5 – 10 мин под давлением бумажные ленты осматривают. Неплотности определяются по появлению черных или фиолетовых пятен на бумаге.

Методы контроля разрушением:

а) Механические испытания паяных соединений можно разделить на три группы:

- лабораторные испытания паяных образцов;
- статические и динамические испытания паяных изделий в лабораторных условиях;
- испытание паяных изделий в лабораторных условиях.

Лабораторные испытания паяных соединений проводят при разработке новых припоев, при отработке технологии пайки и контроле механических свойств паяных изделий. В зависимости от степени ответственности паяных изделий проводят лабораторные испытания отдельных узлов или полностью изделий в условиях, имитирующих эксплуатационные нагрузки.

Для паяных соединений наибольшее распространение получили испытания на срез и на отрыв.

б) Металлографические исследования заключаются в определении микроструктуры шва с помощью оптического или электронного микроскопа. При вырезке и обработке образцов из исследуемого паяного соединения в случае малой твердости припоя поверхность его будет несколько ниже поверхности основного металла. При шлифовании такой шов засоряется твердыми частицами, что искажает результаты микроструктурного анализа.

в) Коррозионные испытания проводят с целью определения пригодности их для продолжительной работы в условиях эксплуатации.

Коррозионную стойкость паяных соединений при электрохимической коррозии обычно устанавливают:

- 1) во влажной камере;
- 2) частичным или полным погружением паяных образцов в различные жидкие среды. Этот вид испытания можно проводить как в состоянии покоя, так и в движении, т.е. при перемещении жидкости или при неоднократном погружении и извлечении образца из жидкости;
- 3) испытанием образцов в коррозионно-активных средах под нагрузкой.

## Лекция № 9

### Организация паяльных работ.

- 9.1. Разработка технологического процесса пайки.
- 9.2. Нормирование при разработке технологии пайки.

#### 9.1. Разработка технологического процесса пайки.

При разработке технологического процесса пайки необходимо стремиться к тому, чтобы были достигнуты:

1. Наименьшая трудоемкость сборки и пайки, для чего должны применяться передовые способы пайки и высокопроизводительное оборудование.
2. Сокращение количества рабочих, занятых в технологическом процессе сборки и пайки, что достигается совмещением профессий и обслуживанием одним рабочим нескольких установок.
3. Минимальная производительность работ в соответствии с количеством изделий, установленным на программу.
4. Наименьший расход материалов и энергии, потребных для изготовления заданной продукции при обеспечении высокого качества изделий.

Разработке технологического процесса сборки и пайки иногда предшествует расчленение изделия на узлы или отдельные детали с тем, чтобы проводить сборку и пайку на отдельных рабочих местах. Технологический процесс сборки и пайки разрабатывают в зависимости от типа производства.

В единичном производстве можно ограничиться составлением маршрутной ведомости, в которую включают следующие данные:

1. Наименование и условное обозначение изделия;
2. Название цеха (участка);
3. Название, условное обозначение или номер узла, на который составляется ведомость;
4. Перечень деталей, входящих в состав данного узла, с обозначением марки материалов.
5. Указания, откуда детали должны поступить на сборку и куда направлены после пайки.
6. Перечень операций основных и контрольных, подлежащих выполнению при сборке и пайке узлов, с указанием оборудования, а также специальности и разряда работы.
7. Нормы времени на выполнение каждой операции.

В мелко- и среднесерийном производстве (в отделах, цехах или на участках сборки и пайки) для сложных изделий составляют технологические карты, а для простых – маршрутные ведомости.

В технологические карты, помимо сведений, содержащихся в маршрутных ведомостях, необходимо включать:

1. Последовательный перечень основных, вспомогательных и контрольных операций с подразделением на переходы и все необходимые сведения по каждому переходу.

2. Нормы времени по каждому переходу и операции в целом, а также расход припоев, флюсов, газовых сред и других материалов.

3. Эскизы паяемых узлов с указанием последовательности сборки и пайки.

Для изделий крупносерийного и массового производства необходимо составлять подробные технологические карты, которые при массовом производстве дополняются инструкционными картами по каждой операции.

Инструкционные карты составляют подобно технологическим картам, но отдельно на каждую операцию или несколько операций с эскизами и подробным описанием каждого перехода.

В технологические ведомости, технологические и инструкционные карты о режиме пайки включаются следующие данные:

1. Температура пайки. При пайке в печи указывается температура предварительного разогрева печи.

2. Продолжительность выдержки.

3. Скорость нагрева.

4. Давление на соединяемые элементы изделия в процессе пайки.

5. Скорость охлаждения.

## **9.2. Нормирование при разработке технологии пайки.**

Нормированию при разработке технологии пайки подлежат:

1. Продолжительность работ по каждой операции и каждому переходу.

2. Количество и квалификация рабочих для выполнения каждой операции.

3. Расход материалов и энергии на каждый узел и на изделие в целом.

Продолжительность сборки и пайки устанавливают на основе ведомственных или заводских норм, а также технических данных применяемого оборудования. Под технически обоснованной нормой времени понимают наибольший допустимый расход времени на изготовление единицы продукции.

Техническая норма времени состоит из нормы штучного времени  $t_{шт}$  и нормы подготовительно-заключительного времени  $t_{п.з.}$ . Штучное время включает:

$$t_{шт} = t_0 + t_b + t_{об} + t_{отд},$$

где  $t_0$  – основное или технологическое время, затрачиваемое непосредственно на процесс пайки;

$t_b$  – вспомогательное время, затрачиваемое на очистку поверхности, подготовку оснастки, контроль перед сборкой, сборку и установку детали в приспособление, освобождение детали из приспособления после пайки, зачистку и клеймение;

$t_{об}$  – время обслуживания рабочего места, затрачиваемое на раскладку инструмента, уход за оборудованием, уборку рабочего места;

$t_{отд}$  – время отдыха – перерывы в работе для кратковременного отдыха.

Сумма основного и вспомогательного времени составляет оперативное время:

$$t_{оп} = t_0 + t_в.$$

Подготовительно-заключительным временем  $t_{п.з}$  называют время, затрачиваемое на ознакомление с заданием, чертежами, технологическим процессом, на подготовку оборудования и приспособлений перед работой и на завершение работ в конце рабочего дня.

При нормировании труда применяют расчетно-аналитический и опытно-статистический способы установления норм.

Количество производственных рабочих, занятых на сборке и пайке, определяют исходя, из трудоемкости работ на годовую программу и годового фонда времени. Количество вспомогательных рабочих и обслуживающего персонала устанавливают на основании норм обслуживания или рациональной расстановки рабочих по рабочим местам. Квалификация работ зависит от трех основных факторов: степени сложности работы, необходимой точности изготовления и степени ответственности изделия. Исходя из этих факторов, устанавливают разряд работ.

Расход припоев и флюсов зависит от типа шва, способа пайки, технических характеристик оборудования и характера производства. Составляющие нормы расхода материалов при пайке можно разбить на две части: 1) зависящие от геометрии шва; 2) зависящие от метода пайки, применяемого оборудования, характера производства, точности сборки и качества выполнения работ.

Обычно расход припоев определяют на основе расчетов и уточняют в процессе пайки. Количество вносимого в шов припоя должно быть достаточным для заполнения зазора и образования полномерных галтелей. Если припоя внесено мало, в паяном шве могут образовываться незаполненные припоем места, плохое формирование галтелей. Избыточное количество вносимого наряду с экономической нецелесообразностью отрицательно сказывается на качество паяных изделий. В этом случае значительное растекание припоя в зоне галтельных участков потребует дополнительной механической обработки деталей, возможно также припаивание деталей к приспособлениям, а при групповой пайке – друг к другу.

Норма расхода припоя на изделие с учетом безвозвратных потерь может быть определена из соотношения:

$$G = G_{п.д.} \frac{100}{100 - a},$$

где  $G$  – расход припоя, кг;

$G_{п.д.}$  – масса припоя, расходуемого на паяемую деталь, кг;

$a$  – процент угара и других безвозвратных потерь припоя.

Безвозвратные потери припоя при пайке не должны превышать 4%.  
 Определение массы припоя, наносимого на деталь при пайке, производят в соответствии с геометрией шва:

$$G_{п.д.} = Fl\rho\phi \cdot 10^{-3},$$

где  $F$  – площадь шва,  $\text{см}^2$ ;

$l$  – величина соединительного зазора,  $\text{см}$ ;

$\rho$  – плотность припоя,  $\text{г/см}^3$ ;

$\phi$  – коэффициент, учитывающий потери за счет наплывов в паяном соединении и принимаемый 1,2 – 1,8 в зависимости от способа пайки и условий производства.

Норму расхода припоя  $G$  на изделие находят также по удельным нормам расхода, если известна площадь шва и длина галтельных участков.

Норму расхода припоя на заполнение зазора определяют из соотношения:

$$Q = Fq \cdot 10^{-3},$$

где  $F$  – площадь шва,  $\text{см}^2$ ;

$q$  – норма расхода,  $\text{г/см}^3$ .

Норму расхода припоя на образование галтелей определяют из соотношения:

$$Q' = lq' \cdot 10^{-3},$$

где  $l$  – протяженность галтелей в паяном соединении,  $\text{см}$ ;

$q'$  – удельная норма расхода припоя на галтель,  $\text{г/см}$ .

Полную норму расхода определяют как сумму норм расхода припоя на заполнение соединительного зазора и на образование галтелей:

$$G = Q + Q'.$$

Нормы расхода флюсов в припайке подсчитывают, исходя из площади шва. Ниже приведены данные по расходу флюсов на единицу площади шва ( $\text{г/см}^2$ ) при пайке низкотемпературными припоями:

Водный раствор хлорида цинка	0,18
Прима 1	0,12
Паста 15 – 85	0,15
ФИМ	0,11
ВТС	0,15
Канифоль	0,13
КЭ	0,10
ЛТИ	0,15

При пайке с применением контролируемых атмосфер после заполнения пространства печи или контейнера газовой средой последующий расход ее незначителен. Обычно в магистрали, подающей газовую атмосферу, поддерживается избыточное давление не выше 10 – 30 мм рт.ст.

## Лекция № 10

### Техника безопасности при производстве паяных работ.

10.1. Техника безопасности при производстве припоев и флюсов.

10.2. Техника безопасности при подготовке к пайке и производстве паяльных работ.

10.3. Техника безопасности при эксплуатации оборудования.

Техника безопасности при производстве должна быть неразрывно связана с технологией производства. Изменение технологии процессов, внедрение новых материалов и способов производства, применение нового оборудования одновременно должно вызвать и соответствующее изменение в технике безопасности.

### 10.1. Техника безопасности при производстве припоев и флюсов.

При производстве припоев и флюсов для пайки путем сплавления из компонентов основными факторами, вызывающими вредное воздействие на организм человека, являются: высокая температура расплавленных металлов и флюсов, а также выделение вредных паров, газов и пыли. Из металлов, входящих в состав припоев, наиболее вредное воздействие на организм человека оказывают литий, калий, натрий, кадмий, бериллий, свинец, марганец и цинк.

Предельно допустимые концентрации ядовитых газов, паров и пыли в воздухе производственных помещений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Название вещества	ПДК вещества, мг/м <sup>3</sup>
Аммиак	20
Ацетон	200
Марганец и его соединение MnO <sub>2</sub>	0,3
Мышьяковистый водород	0,3
Окислы азота N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5
Окись цинка	5
Свинец и его соединения	0,01
Сероводород	10
Серная кислота и д.р.	2
Фосфорный ангидрид	1
Дихлорэтан	50
Хлористый водород и кислота	10
Хромовый ангидрид и др.	0,1

### 10.2. Техника безопасности при подготовке к пайке и производстве паяльных работ.

При подготовке заготовок к пайке применяют механические способы зачистки и травление. При использовании механических способов рекомендуется применять вращающиеся барабаны, гидropескоструйные установки, дробеструйные камеры. Если камера установлена в помещении цеха, то необходимо обеспечить соответствующее уплотнение ее двери и люков, исключающее возможность попадания пыли в общее помещение. При применении травления заготовок травильное отделение необходимо располагать в отдельном помещении. Работать с кислотами и щелочами необходимо в резиновых перчатках и кислотостойкой одежде. Лицо необходимо защищать от брызг защитными очками или экраном.

При пайке с применением газовых сред следует иметь в виду, что некоторые из них дают с воздухом взрывоопасные смеси. Поэтому перед нагревом контейнеры, реакторы или печи с такой атмосферой необходимо продувать чистым воздухом.

### **10.3. Техника безопасности при эксплуатации оборудования.**

При эксплуатации оборудования для пайки должны быть предусмотрены мероприятия против поражения током, взрывов газовых смесей, выброса расплавленных солей и металлов, против ожогов, действия излучения на глаза и кожу человека.

Для предупреждения поражения электрическим током при эксплуатации оборудования для пайки следует соблюдать следующие правила:

1. Корпуса источников питания, корпуса машин для контактной пайки должны быть заземлены.

2. В машинах и ламповых генераторах высокочастотных установок все металлические части и вторичный виток нагревательного контура должны быть заземлены.

3. Все устройства для подключения и переключения электрических цепей должны быть защищены кожухами.

4. При индукционной пайке для защиты от действия токов высокой частоты необходимо устанавливать специальные экраны.

5. Проводить какие бы то ни было работы в установках, находящихся под напряжением, категорически запрещается.

6. Номинальный ток плавких предохранителей не должен превышать указанного в электрической схеме.

Следует подчеркнуть, что при всех способах пайки основным условием безопасности работы при эксплуатации оборудования и производстве паяльных работ является четкая организация труда и соблюдение правил техники безопасности.

## «Сварка пластмасс и склеивание»

### Введение

Увеличение производства пластмасс по объему и номенклатуре, расширение областей применения этих материалов в народном хозяйстве стимулирует развитие исследований, разработку различных конструкций из пластмасс в машиностроении и других отраслях промышленности. Особое место среди этих процессов занимает сварка.

Развитие некоторых областей техники, особенно новых радиоэлектроники, ракетной техники, космонавтики и других - было бы невозможно без использования пластмасс.

Немаловажная роль в развитии производства и переработки пластмасс принадлежит русским ученым. Производство полимеризационных пластмасс теоретически подготовлено работами ряда ученых, среди которых следует назвать А.М. Бутлерова - создателя теории химического строения органических соединений, Г.Г. Густавсона, получившего в 1884 г. первые жидкие низкомолекулярные полимеры этилена, С.В. Лебедева, разработавшего способ получения синтетического каучука и др. Из иностранных ученых следует отметить В. Карозерса и Г. Штаудингера, которые провели ряд исследований по разработке теоретических основ промышленного получения многих полимеризационных пластмасс.

Промышленное применение сварки пластмасс началось во второй половине 40-х годов, когда ее стали использовать при производстве коррозионно-стойкой химической аппаратуры из непластифицированного поливинилхлорида.

Для этих целей применяли ручную сварку нагретым газом с присадочным материалом, отличающуюся простотой сварочного оборудования.

Создание на основе ПВХ пленочных материалов привело к разработке и освоению процесса высокочастотной сварки, обеспечивающего быстрый нагрев указанных материалов благодаря высокому фактору их диэлектрических потерь и позволяющего получать оптимальное распределение температуры по толщине свариваемого пакета.

Производство и применение в 50-х годах полиолефинов стимулировало разработку различных способов термоконтантной сварки и создание оборудования для их осуществления. Однако указанные способы сварки не позволяли соединять пластмассовые материалы с загрязненными поверхностями, например, при упаковке в полимерную тару различных продуктов, а также получать качественные соединения ориентированных термопластичных материалов и, в частности, появившихся в начале 60-х годов полиэтилентерефталатных пленок, что привело к созданию ультразвуковой сварки пластмасс, решающей данные проблемы.

Широкое применение полиолефинов больших толщин для производства крупногабаритных конструкций сложной конфигурации

привело к разработке в 60-х годах экструзионного и контактно-экструзионного способов сварки.

В настоящее время сложились научные школы по сварке пластмасс, занимающиеся изучением механизмов образования сварных соединений и технологии сварки различных материалов и конструкций. (в МВТУ им. Баумана, МАТИ и др.), основанные известными специалистами в области сварки: член-корреспондентом АН СССР проф. Г.А. Николаевым, в области химии полимеров доктором химических наук, проф. Е.Б.Тростянской и др.

В последние годы разработаны новые способы сварки, созданы уникальные образцы сварочного оборудования, изыскана возможность сварки трудносвариваемых перспективных материалов.

## **Лекция №1**

### **Общие сведения о пластмассах**

- 1.1. Понятие о пластмассах и полимерах.
- 1.2. Классификация полимеров
- 1.3. Получение полимеров.

#### **1.1. Понятие о пластмассах и полимерах.**

Пластические массы - это синтетические материалы органического происхождения, получаемые на основе высокомолекулярных природных или синтетических смол полимеров.

Часто в полимер с различной целью вводят добавки: стабилизаторы, пластификаторы, красители, наполнители.

Стабилизаторы служат для повышения стойкости полимеров при воздействии света, повышении температуры и других факторов. Обычно они предупреждают развитие цепной реакции разложения полимеров, обеспечивая тем самым повышение долговечности пластмасс и изделий из них.

Пластификаторы облегчают переработку пластмасс. При этом повышается прочность. В качестве пластификаторов применяются низкомолекулярные высококипящие и малолетучие жидкости, как дибутилфталат, трикрезилфосфат и др.

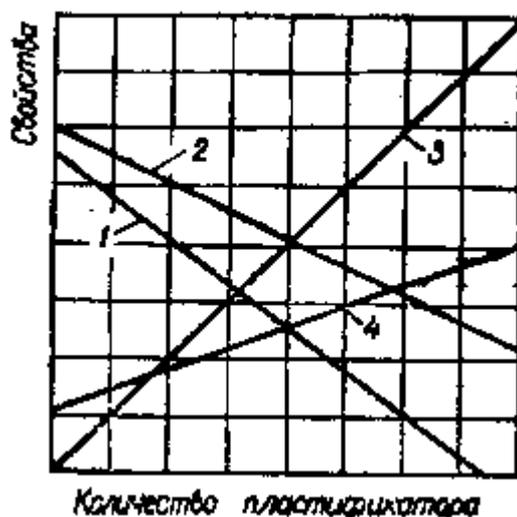


Рис. 1.1. Изменение механических свойств полимера в зависимости от количества пластификатора: 1 - прочность на сжатие, 2 - прочность на разрыв, 3 - прочность на удар, 4 - относительное удлинение.

Наполнители определяют механические свойства изделия, т.к. наполнитель играет роль своеобразного механического каркаса. В качестве наполнителей для производства пластмасс применяются материалы органического происхождения (тальк, каолин, слюды).

Свойства пластмасс определяются главным образом их основой - полимером.

Полимерами называют вещества, молекулы которых состоят из многочисленных элементарных структурных звеньев, соединенных между собой химическими связями в длинные цепи линейного или разветвленного строения.

В самой цепи атомы соединяются прочными химическими связями, действующими на расстоянии 1-1,5 Å; между цепями на расстоянии 3-4 Å действуют значительно более слабые межмолекулярные силы.

Для макромолекул линейной структуры принято обозначение:



где M - элементарное структурное звено цепи;

n - количество звеньев;

черточками показаны химические связи в макромолекулу полимера.

Название "полимер" связано с наименованием основного звена и включает приставку "поли" (от греческого слова "polis" - многий).

Например, название "полистирол" указывает, что элементарным звеном полимера является молекула стирола  $C_6H_5-CH=CH_2$ . Формула полистирола  $(C_8H_8)_n$ .

Мономерами называются первичные низкомолекулярные вещества, из которых образуются полимеры.

## 1.2. Классификация полимеров

По форме строения молекул полимеры разделяются на 3 группы:

1) линейные полимеры, состоящие из макромолекул, атомы которых соединены между собой химическими связями, длинные цепи.

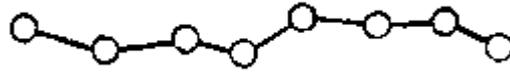


Рис. 1.2. Линейная структура макромолекулы.

Соединения, имеющие линейную структуру макромолекул характеризуется высокой прочностью, значительной упругостью и способностью к высокоэластической деформации.

Пример: полиэтилен  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ .

2) разветвленные полимеры, в которых в основной цепи макромолекулы появляются ответвления, состоящие из многократно повторяющихся мономерных звеньев.

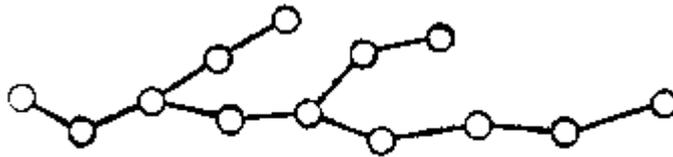


Рис. 1.3. Разветвленная система макромолекулы.

Появление в макромолекулах разветвлений (боковых групп) увеличивает расстояние между отдельными макромолекулами, вследствие чего улучшается растворимость, повышается пластичность и снижается механическая прочность.

Пример: Полистирол  $[-\text{CH}_2-\text{CH}-]_n$   
 $\quad \quad \quad |$   
 $\quad \quad \quad \text{C}_6\text{H}_5$

3) Сетчатые или трехмерные полимеры, в которых цепи, составляющие макромолекулы, образуют пространственную сетку. Цепи макромолекул сетчатых полимеров связаны между собой силами основных валентностей при помощи поперечных мостиков, образованных различными атомами.

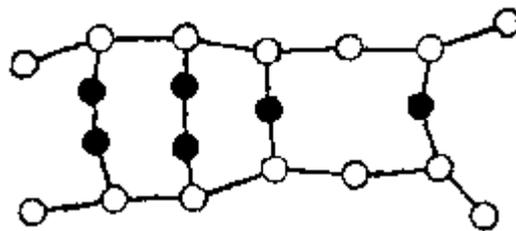


Рис. 1.4. Структура пространственного полимера.

Для макромолекул с пространственной структурой характерна высокая твердость и хрупкость, отсутствие растворимости, пластичности и эластичности при повышенной температуре.

В качестве примера образования "сшитых" молекул можно указать на реакцию вулканизации каучука, при которой в результате действия серы происходит соединение отдельных цепочек между собой.

По составу основной цепи макромолекулы полимера делят на три класса:

1) Карбоцепные полимеры, основные цепи которых построены только из углеродных атомов. К ним относятся полиэтилен, поливинилхлорид, политетрафторэтилен, полистирол, полиметилметакрилат и т.д.

2) Гетероцепные полимеры имеют в основных цепях помимо углерода атомы кислорода, азота, серы (поликарбонаты, полиамиды, полиэферы, полиакрилаты и др.).

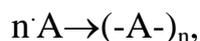
3) Элементоорганические полимеры могут иметь в основных цепях атомы кремния, бора, алюминия, титана, никеля, германия.

### 1.3. Получение полимеров.

Полимеры получают путем соединения исходных элементарных группировок (низкомолекулярных веществ) в результате реакций полимеризации или поликонденсации.

Полимеризация - это процесс соединения отдельных молекул в одну большую молекулу без выделения каких-либо низкомолекулярных веществ, вследствие чего полимер имеет состав, одинаковый с исходным мономером.

Если полимеризуются одинаковые молекулы, то полимеризация называется гомополимеризацией и идет по схеме:

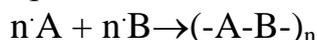


где A - молекула мономера;

(-A-) - молекула полимера;

n - степень полимеризации, т.е. число молекул мономера, образующих одну молекулу полимера.

В случае полимеризации смеси различных мономеров процесс называется сополимеризацией и происходит по схеме:



Процесс полимеризации может иметь ступенчатый или цепной характер.

Ступенчатая полимеризация заключается в том, что в начале две молекулы соединяются в димер, который, присоединяя еще одну молекулу, дает тример и т.д.

Процесс цепной полимеризации состоит из трех стадий:

1) возбуждение молекул;

2) роста цепи;

3) обрыва цепи.

Важнейшими факторами, определяющими процесс полимеризации, является температура, давление, концентрация инициатора и мономера.

В настоящее время в промышленности применяются следующие методы полимеризации:

1) Блочный метод заключается в том, что смесь мономера с другими компонентами (инициаторами) заливают в форму и прогревают в ней до определенной температуры. Полимер получается в виде сплошного блока, чаще всего имеющего форму пластины или цилиндра. В качестве инициатора применяются чаще всего перекиси, например, перекись бензоила.

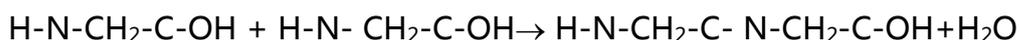
2) Полимеризация в растворителях может быть проведена двумя способами. В первом случае применяют растворитель, в котором растворимы как мономер, так и образующийся полимер. Образующийся конечный продукт представляет собой раствор полимера в растворителе. Во втором случае полимеризацию проводят в таком растворителе, в котором растворим только мономер. Образующийся при этом полимер непрерывно осаждается из раствора в виде суспензии и может быть отделен фильтрацией.

3) Полимеризация в водных эмульсиях является наиболее распространенным методом производства полимеров. При эмульсионной полимеризации мономер предварительно эмульгируют путем перемешивания в водной среде с добавкой эмульгаторов и затем добавляют инициатор, растворимый в воде или мономере. При перемешивании или взбалтывании происходит полимеризация. Для выделения полимера прибавляют кислоту или соль, что приводит к разрушению коллоидного раствора и осаждению полимера.

Поликонденсация - химический процесс получения высокомолекулярных органических соединений и различных низкомолекулярных исходных веществ, сопровождающийся отщеплением различных побочных продуктов (воды, спирта, хлористого водорода и т.д.). Образующиеся в результате поликонденсации высокомолекулярные соединения отличаются по составу от исходных веществ, тогда как при полимеризации исходный мономер и образующийся полимер имеет одинаковый состав.

Реакция поликонденсации носит ступенчатый характер.

Рост цепи происходит путем взаимодействия одной молекулы с другой, полученный продукт взаимодействует с третьей молекулой и т.д.



аминокислота.

## Лекция № 2

### Общие сведения о пластмассах.

#### 2.1. Физическое состояние полимеров.

2.2. Области применения пластмасс.

2.3. Свойства пластмасс.

2.4. Классификация пластмасс.

### **2.1. Физическое состояние полимеров.**

Полимеры могут быть как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии.

Аморфное состояние полимеров характеризуется хаотическим, не имеющим определенной направленности, расположением цепей и звеньев макромолекул.

Для кристаллического состояния свойственна определенная ориентация и направленность цепей и звеньев макромолекул. Способность полимера к кристаллизации зависит от отсутствия значительного разветвления макромолекул и от гибкости молекул. Кристаллизация наблюдается только у линейных полимеров или у полимеров, обладающих очень слабой сетчатой структурой. Кристаллические полимеры никогда не бывает закристаллизованными полностью и содержат как кристаллическую, так и аморфную фазу.

Любой аморфный полимер в зависимости от температуры может находиться в трех состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

Аморфное твердое состояние полимера называется стеклообразным. Колебательное движение звеньев и перемещение цепи как единого целого отсутствуют.

Высокоэластическое состояние характеризуется наличием колебательного движения звеньев или групп звеньев, вследствие которого цепь полимера приобретает способность распрямляться под воздействием нагрузки и возвращаться в первоначальное состояние после ее снятия.

В вязкотекучем состоянии макромолекулы полимера передвигаются относительно друг друга путем последовательного перемещения сегментов.

Переход полимера из одного физического состояния в другое совершается не при какой-нибудь определенной температуре, а в некотором диапазоне температур. Средние температуры областей перехода называются температурами перехода.

Температурой стеклования  $T_g$  называется температура перехода из высокоэластического состояния в стеклообразное.

Температурой текучести  $T_f$  называется температура перехода из вязкотекучего в высокоэластическое.

Переработка полимеров в изделия осуществляется в вязкотекучем состоянии, поэтому интервал между температурой текучести и температурой разложения полимера определяет температурный интервал его переработки и, в частности, сварки.

### **2.2. Области применения пластмасс.**

Развитие производства пластмасс объясняется широким применением их во всех областях промышленности и техники, а также в быту. Пластмассы стали заменителями металла, дерева, камня, стекла и других материалов.

Пластические массы широко распространены в машиностроении. Из них изготавливают детали машин и станков, такие как подшипники, штурвалы, бесшумные шестерни, рукоятки, щитки и др.

Различные детали легковых и грузовых машин получают из пластмасс. Широко применяются пластмассы в химической промышленности при производстве и облицовке различной аппаратуры, подвергающейся воздействию агрессивных сред.

В электротехнике, радио- и телевизионной технике, а также в приборостроении пластмассы используются как материалы для электроизоляции и изготовления корпусов приборов и установок. Пластмассы являются одним из основных материалов для электро-навигационного и радиотехнического оборудования судов, средств судовой автоматики и связи.

Все более широко применяются пластмассы в строительстве для внутренней облицовки стен и покрытия полов, для производства санитарно-технического оборудования, водопроводных труб и т.д. Гладкие водопроводные трубы из полиэтилена пропускают в полтора раза больше воды, чем металлические трубы при прочих равных условиях.

Пластические массы, допускающие любую расцветку, являются исключительно ценным материалом в архитектуре.

В легкой промышленности пластмассы используются как основной материал для игрушек и изделий галантереи, для обложек и портфелей, авторучек, плащей, накидок и других предметов широкого потребления. Все более широко пластмассы применяются в медицине при создании искусственных кровеносных сосудов, при косметических операциях лица. Сломанные кости в течение нескольких минут прочно склеиваются густой пластмассой, известной под названием остам, через которую легко прорастает костная ткань.

Невозможно назвать отрасль промышленности, где бы не применялись пластические массы. Перспектива их внедрения в различные области народного хозяйства практически неограничены.

### **2.3. Свойства пластмасс.**

Пластмассы обладают ценными свойствами, такими как: высокая пластичность, хорошая способность к формированию, небольшой удельный вес, высокая механическая прочность, высокие термо-, звуко- и электроизоляционные свойства, химическая стойкость, светостойкость, хорошая окрашиваемость, отличные клеящие, уплотнительные и термоизолирующие свойства, хорошая способность поглощать и гасить вибрации, образовывать тонкие и прочные волокна.

1) Удельный вес пластмасс колеблется в пределах 0,92-2,4 г/см<sup>2</sup>, и в среднем равен 1,6 г/см<sup>2</sup>. Исключение составляют газонаполненные пластмассы, обладающие наименьшими весовыми характеристиками. Самой легкой пластмассой является мипора - поропласт с удельным весом 0,014 г/см<sup>2</sup>.

2) Механические свойства. В зависимости от применения полимеров и состава наполнителей могут быть получены очень твердые и прочные материалы, а также гибкие высокоэластичные пленки. Механические свойства пластмасс характеризуются пределом прочности при растяжении, сжатии и изгибе, ударной вязкостью, твердостью, относительным удлинением, модулем упругости.

Определение предела прочности при растяжении производят на разрывной машине согласно ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 16971-71 при температуре окружающей среды 18-20<sup>0</sup>С. Образцы устанавливают в зажимах разрывной машины и плавно нагружают до разрушения.

Предел прочности при сжатии определяют согласно ГОСТ 4661-40. Испытания проводят на машинах или прессах, нагружая цилиндрический образец диаметром 10±5 мм и высотой 15±1 мм до разрушения.

Предел прочности при сжатии вычисляется по формуле:  $\sigma_{сж} = P_{max}/F$ ,  
где  $P_{max}$  - максимальная сжимающая нагрузка, Н  
F - площадь поперечного сечения образца до сжатия, м<sup>2</sup>.

Предел прочности при статическом изгибе определяется в соответствии с ГОСТ 4648-71. Испытуемый образец, имеющий форму прямоугольного бруска, помещают на опоры с округленными переходами и подвергают действию вертикальной разрушающей силы.

Ударную вязкость определяют в соответствии с ГОСТ 4647-80 на маятниковом копре.

3) Теплостойкость определяется по методу Мартенса или Вика согласно ГОСТ 9551-60. В обоих случаях прибор вместе с испытуемым образцом помещают в термошкаф так, чтобы указатель деформации и нагружающее устройство были вне его объема, и нагревают со скоростью 50 С/ч. За теплостойкость принимают ту температуру, при которой стрелка указателя опустится на 6 мм (по методу Мартенса) или при котором игла погружается в тело образца на 1 мм (по методу Вика).

4) Теплопроводность. Все пластмассы характеризуются, как правило, хорошими теплоизоляционными свойствами и плохо проводят тепло. Коэффициент теплопроводности пластмасс (при 25<sup>0</sup>С) находится в пределах (5,8-31,4)·10<sup>-2</sup> Вт/мград. Поэтому пластмассы применяются в качестве теплоизоляционных материалов.

5) Антифрикционные свойства. Многие пластмассы характеризуются высокими антифрикционными свойствами. Это позволяет применять их для изготовления подшипников трения. В этом отношении они являются полноценными заменителями дорогих и дефицитных антифрикционных металлических сплавов (оловянистой бронзы, баббита и др.). Показателями

антифрикционных свойств пластмасс являются потери объема материала при трении и коэффициент трения.

6) Высокая коррозионная стойкость. Пластмассы как диэлектрики совершенно не подвергаются электрохимической коррозии и очень стойки к химической коррозии, т.е. к воздействию различных агрессивных сред, поэтому в таких средах пластмассы не образуют гальванических пор и не разрушаются.

7) Оптические свойства. На основе полимеров могут быть изготовлены прозрачные пластмассы, не уступающие по оптическим свойствам лучшим сортам стекла. Такие пластмассы пропускают лучи света в широком диапазоне волн и, в частности, ультрафиолетовую часть спектра.

#### **2.4. Классификация пластмасс.**

Согласно ГОСТ 5752-51 "Пластические массы органического происхождения" пластмассы были разделены по химическому характеру связующего вещества, по характеру и структуре наполнителя. Но в силу своей сложности терминология не получила практического применения.

По классификации НИИ полимеризации пластиков в 1959 г. все пластмассы разделены на основе:

1) высокомолекулярных соединений, получаемых цепной полимеризацией;

2) высокомолекулярных соединений, получаемых поликонденсацией и ступенчатой полимеризацией;

3) химически модифицированных природных полимеров;

4) природных и нефтяных смол, полученных при деструкции различных органических веществ.

По физико-механическим свойствам при 20<sup>0</sup>С:

1) жесткие пластмассы - твердые упругие материалы аморфной структуры с высоким модулем упругости ( $10^9$  Н/м<sup>2</sup>) и малым удлинением.

2) полужесткие пластмассы - твердые упругие материалы кристаллической структуры со средним модулем упругости ( $4 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>) и высоким относительным удлинением

3) мягкие пластмассы - мягкие и эластичные материалы с низким модулем упругости ( $2 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>) и высоким относительным удлинением.

Все пластмассы по отношению к нагреванию можно разделить на 2 группы:

1) Терморезистивные - пластмассы, которые при повышенном нагреве не переходят через высокопластическое состояние. С повышением температуры они не изменяют своих свойств, а затем, не переходя в эластическое состояние, разлагаются. Подвергаются нагреву только один раз. К ним относятся пластмассы на основе фенол-формальдегидных смол и другие такие, как текстолит, бакелит, эбонит.

2) Термопластические - пластмассы, которые при нагревании размягчаются и становятся пластичными, а при охлаждении возвращаются в исходное состояние. Термопластические материалы могут подвергаться

многократному нагреву и охлаждению без заметного изменения структуры и свойств при условии, если они не нагреваются выше температуры разложения. К ним относятся винипласт, полиэтилен, полиамиды, полипропилен, фторопласт и другие.

### **Лекция №3**

#### **Общие сведения о сварке пластмасс.**

- 3.1. Особенности сварки пластмасс.
- 3.2. Физические основы сварки пластмасс.
- 3.3. Основные способы сварки пластмасс.
- 3.4. Химическая сварка пластмасс.
- 3.5. Сварка пластмасс с помощью растворителей.

#### **3.1. Особенности сварки пластмасс.**

По свариваемости пластмассы, как уже упоминалось, можно разделить на две группы: терморезистивные, которые преимущественно не свариваются, и термопластические, которые легко подвергаются сварке.

Сваркой пластмасс называется процесс образования неразъемного соединения путем доведения соединяемых поверхностей до вязкотекучего состояния с приложением давления. В результате чего частично или полностью исчезает граница раздела между соединяемыми поверхностями, и прочность материала в месте соединения, а также другие физические свойства приближаются к свойствам свариваемого материала.

Процесс сварки термопластических материалов отличается от процессов, протекающих при сварке металлов целым рядом особенностей:

1) При сварке пластмасс не образуется жидкая ванна. Процесс этот может происходить лишь при определенных условиях. Основными из них являются: повышенная температура в месте сварки (температура вязкотекучего состояния материала), наличие плотного контакта свариваемых поверхностей и определенное время протекания процесса. Пластмассы представляют собой большое количество взаимно растворенных полимеров, построенных из одних и тех же звеньев, но отличающихся молекулярным весом, поэтому они не имеют резко выраженной точки плавления, а при нагреве постепенно переходят из твердого состояния в высокоэластичное и далее в вязкотекучее, когда материал становится липким и отдельные детали под давлением могут прочно соединяться между собой, т.е. свариваться.

2) Термопластические массы при высоких температурах начинают разлагаться. При этом степень разложения зависит как от температуры, так и от длительности воздействия этой температуры. Таким образом, при сварке термопластов нагрев материала должен быть возможно более кратковременным, а температура не должна превышать температуру разложения.

3) Пластмассы обладают высоким коэффициентом температурного расширения, в несколько раз большим, чем у металлов.

### **3.2. Физические основы сварки пластмасс.**

Сварка полимерных материалов осуществляется в результате протекающей взаимной диффузии молекул полимера в контактирующих поверхностях или в результате химической реакции присоединения между звеньями молекул соединяемых полимеров. В зависимости от степени упорядоченности отдельных участков линейных молекул полимер может находиться в кристаллическом или аморфном состоянии.

В процессе сварки кристаллических полимеров по мере плавления полимера в нем постепенно нарушается упорядоченное разложение молекул и начинается переход из кристаллической фазы в аморфную. Температура перехода полимера из твердого состояния в жидкое может быть выше температуры плавления кристаллической фазы в нем и зависит от молекулярного веса полимера.

При большом молекулярном весе полимер, нагретый выше температуры плавления, перейдя в аморфную фазу, сохраняет еще твердое агрегатное состояние и только с дальнейшим повышением температуры постепенно переходит в вязкотекучее состояние.

Аморфное твердое состояние полимера характеризуется фиксированным, но разрыхленным расположением макромолекул относительно друг друга и лишь ограниченной подвижностью звеньев. С повышением температуры увеличивается энергия теплового движения макромолекул. Когда эта энергия становится достаточной, чтобы появилась гибкость всей молекулы, полимер переходит в высокоэластическое состояние (температура стеклования). Переход происходит постепенно в интервале температур 15-25°C. В высокоэластичном состоянии сравнительно небольшие напряжения вызывают перемещение молекул и их ориентацию в направлении действующей силы. После снятия нагрузки молекулы постепенно приобретают форму, характерную для равновесного состояния. При дальнейшем повышении температуры энергия тепловых движений возрастает настолько, что молекулы приобретают способность перемещаться относительно друг друга (вязкотекучее состояние).

Свариваемость полимеров за счет диффузии возможна только в зоне, допускающей свободное перемещение молекул, т.е. в стадии вязкотекучего состояния. Чем ниже температура перехода полимера в эту стадию и выше его текучесть, тем быстрее удастся достигнуть однородности материала в зоне сварного соединения.

### **3.3. Основные способы сварки пластмасс.**

В настоящее время применяется целый ряд способов сварки пластмасс, осуществляющихся с нагревом зоны соединения и без него.

Способы сварки с нагревом соединения в зависимости от применяемых источников нагрева можно разделить на две группы. К первой группе относятся способы сварки, в которых используется энергия посторонних источников тепла:

- 1) газовыми теплоносителями;
- 2) экструдированной присадкой;
- 3) нагревательными элементами.

Во всех приведенных способах тепло передается к свариваемым поверхностям пластмассы за счет конвекции, теплопроводности и частичного лучеиспускания.

Ко второй группе относятся способы сварки, в которых тепло генерируется внутри пластмассы за счет преобразования различных видов энергии. При этом используется энергия:

- 1) токов высокой частоты;
- 2) ультразвуковых колебаний;
- 3) трения;
- 4) инфракрасного излучения;
- 5) химических реакций;
- 6) лазерного излучения.

Без нагрева зоны соединения выполняется сварка с помощью растворителей.

Классификация способов сварки пластмасс приведена на рис 3.1.

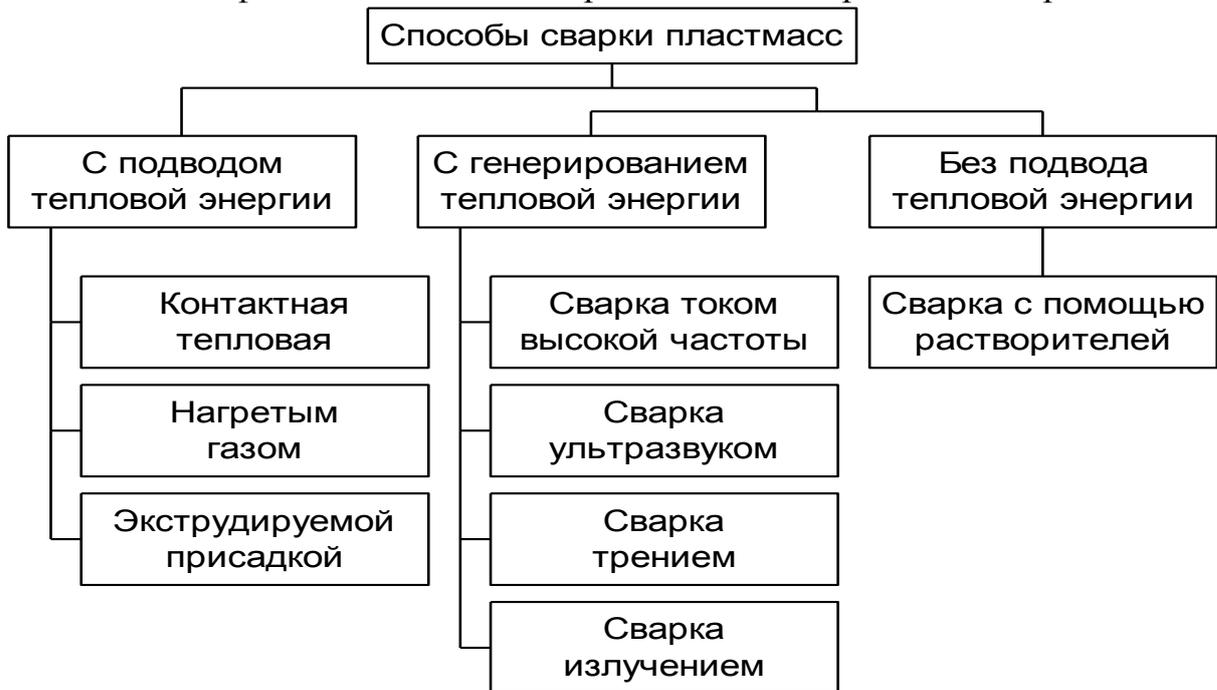


Рис. 3.1. Классификация способов сварки пластмасс.

Сварка газовыми теплоносителями относительно проста и позволяет получать разнообразные изделия при минимальных затратах на оборудование. Нагрев свариваемых кромок осуществляется за счет теплоотдачи от нагретого газа, поступающего из горелки. Применяется при изготовлении аппаратуры для химической промышленности.

Способ сварки экструдированной присадкой дает хорошие результаты, как при сварке пленок, так и при сварке листов большей толщины. Метод основан на подаче в место сварки присадки, находящейся в вязкотекучем состоянии.

Сварка нагретым инструментом применяется при изготовлении труб, упаковочной тары, чехлов и многих других изделий. Источником нагрева служат разогретые тела, которые передают тепло путем непосредственного соприкосновения с пластмассой.

Метод сварки токами высокой частоты основан на способности некоторых пластмасс нагреваться в высокочастотном электрическом поле, возникающем между электродами, которые одновременно сжимают свариваемые поверхности.

При сварке трением нагрев осуществляется за счет тепла, получаемого в процессе трения свариваемых поверхностей при приложении к ним давления.

Способ сварки ультразвуком основан на преобразовании механических высокочастотных колебаний, возбуждаемых в пластмассе, в тепло. Тепло, развивающееся преимущественно на свариваемых поверхностях, размягчает пластмассу и при приложении давления происходит сваривание деталей. Сварка ультразвуком особенно пригодна для сварки изделий, у которых доступ к месту соединения затруднен, и свариваемый материал не допускает нагрева по всему объему.

При сварке пластмасс инфракрасным излучением нагрев осуществляется за счет источника тепла инфракрасного излучения, получаемого при накаливании стержневых кварцевых ламп и других источников. Применяется преимущественно для сварки полимерных пленок.

### 3.4. Химическая сварка пластмасс.

Химическая сварка пластмасс применяется для сварки термореактивных пластмасс (стеклопластиков, текстолитов, пресспорошков, феноло-формальдегидных, эпоксидных, отвержденных полиэфирных смол).

Химическая сварка пластмасс осуществляется за счет химического взаимодействия свариваемых материалов с веществом, которое вводится в сварочный шов и играет в этом случае роль сшивающей добавки. Эти вещества реагируют с активными группами звеньев молекул, находящихся в зоне контакта.

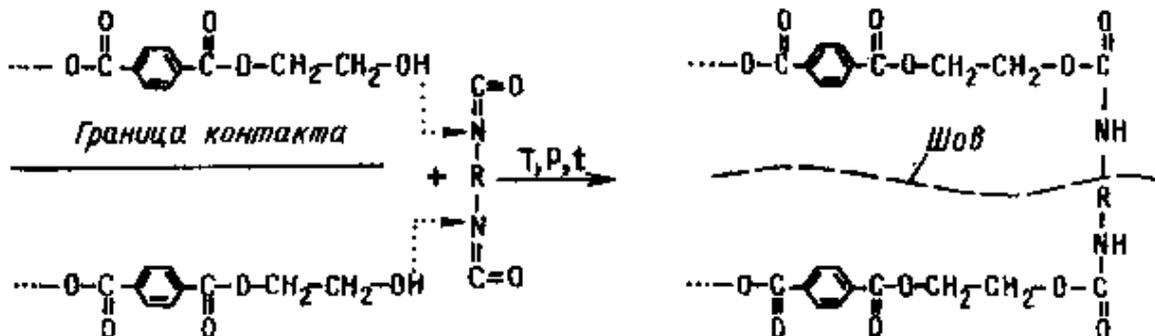


Рис 3.2. Механизм химической сварки ПЭТ при помощи диизоцианата.

Успех применения этого способа сварки зависит от многих факторов:

1) свариваемый полимер должен содержать высокоактивные функциональные группы достаточной концентрации, чтобы совокупность химических связей, возникших в месте соединения, обеспечивала необходимую механическую прочность.

2) низкомолекулярное вещество, выступающее в роли мостикообразующего, не должно испаряться при температуре сварки.

3) скорость реакции должна быть достаточно высокой.

4) реакция не должна сопровождаться выделением большого количества легко испаряющегося побочного продукта, который не должен разрушать полимер, или адсорбируясь в нем, изменять его качество.

### **3.5. Сварка пластмасс с помощью растворителей.**

Сущность сварки пластмасс с помощью растворителей заключается в том, что соединяемые поверхности смачиваются растворителем до тех пор, пока они не станут липкими, затем их складывают и выдерживают под давлением. Давление облегчает взаимную диффузию макромолекул в контактируемых поверхностях при обычной температуре.

Сварка с помощью растворителя применяется, когда полимер находится в аморфном состоянии (полиметилметакрилат, полистирол, поливинилхлорид и другие). Благодаря гибкости молекул в них возникают непрерывно чередующиеся межмолекулярные пустоты, в которых диффундирует растворитель. После заполнения свободных пространств в полимере молекулы растворителя начинают раздвигать молекулы полимера, облегчая их отрыв друг от друга. Эта стадия растворения называется набуханием. Как только межмолекулярное взаимодействие уменьшится настолько, что молекулы приобретают возможность перемещаться, начинается вторая стадия растворения - диффузия молекул полимера в растворитель.

## **Лекция № 4**

### **Сварка газовым теплоносителем.**

- 4.1. Сущность сварки газовым теплоносителем.
- 4.2. Виды сварки газовым теплоносителем.
- 4.3. Оборудование для сварки газовым теплоносителем.
- 4.4. Технология сварки газовым теплоносителем.

#### **4.1. Сущность сварки газовым теплоносителем.**

Сварка газовым теплоносителем (нагретым газом) основана на нагреве соединяемых поверхностей материала до температуры сварки струей нагретого газа. Выполняют ее с применением присадочного материала либо без него с помощью горелок различной конструкции. Нагретый газ, выходящий из сопла горелки, нагревает одновременно свариваемые кромки и

присадочный пруток, плотный контакт между которыми создается за счет прижатия прутка рукой сварщика.

При сварке в  $N_2$ , Ar или  $CO_2$  процесс идет в защитной инертной среде, что очень важно в тех случаях, когда требуется избежать окисления материала. Однако чаще всего применяется сжатый воздух, благодаря простоте его получения. Воздух и инертные газы подогреваются до температуры сварки за счет прохождения через электронагревательные элементы сварочной аппаратуры или же пламенем горящего газа, а затем подают к месту сварки.

#### 4.1.1. Преимущества сварки газовым теплоносителем:

- способ сварки может быть применен для сварки материалов различной толщины;
- позволяет осуществлять сварку протяженных швов сложной конфигурации при различном их положении в пространстве;
- не требует сложного оборудования.

#### Недостатки сварки газовым теплоносителем:

- низкая производительность процесса сварки;
- недостаточно высокая прочность сварного соединения.

#### 4.1.2. Области применения сварки газовым теплоносителем:

Газовым теплоносителем можно сваривать большинство известных термопластов – поливинилхлорид непластифицированный (винипласт), поливинилхлорид пластифицированный (пластикат), полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления, полипропилен, полиметилметакрилат, полиамиды.

Газовым теплоносителем можно сваривать панели, покрытия полов, ванны, воздуховоды, безнапорные трубопроводы и другие детали из материалов толщиной 1,5 – 20 мм, а также экраны, оболочки, герметичные чехлы и другие изделия из полимерных пленок.

## 4.2. Виды сварки газовым теплоносителем.

Сварку газовыми теплоносителями можно разделить на два вида:

### 1) Сварка с применением присадочного материала;

Сущность сварки газовым теплоносителем с присадкой заключается в том, что свариваемые детали и присадочный пруток нагревают до вязкотекучего состояния газовым теплоносителем, в качестве которого могут служить воздух, азот, аргон, углекислый газ и другие газы. При надавливании пруток приваривается к размягченным кромкам изделия, образуя сварной шов. Если пластифицированный пруток не выдерживает осевого давления, то используется прикатка его роликом.

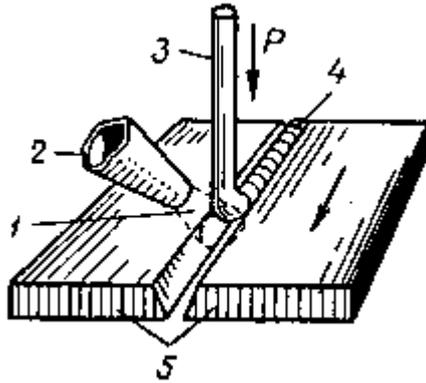


Рис. 4.1. Схема сварки нагретым газом с применением присадочного материала:

1 – струя газа; 2 – нагреватель; 3 – присадочный материал; 4 – шов; 5 – свариваемые детали.

Сварка нагретым газом с присадочным материалом может выполняться вручную и механизированным способом.

2) Сварка без применения присадочного материала основана на свойстве материалов прессоваться в нагретом состоянии при определенной температуре. Перед сваркой кромки листов срезают под углом  $20 - 25^\circ$ , листы складывают по кромкам, и последние равномерно нагревают подогретым газом. Непосредственно за струей нагретого газа следуют ролики, создающие давление при сварке. Оставаясь холодными, они не прилипают к материалу. Сварной шов при такой подготовке поверхности деталей под сварку получается незаметным, а изделие имеет одинаковую толщину во всех сечениях.

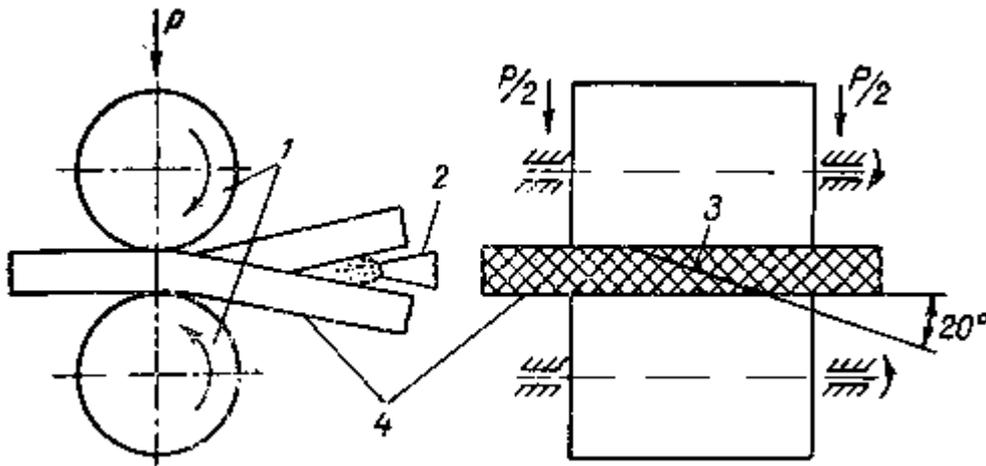


Рис. 4.2. Схема сварки нагретым газом без присадочного материала:

1 – ролики; 2 – нагреватель; 3 – шов; 4 – свариваемые листы.

Сварку без применения присадочного материала можно применять для соединения только плоских деталей.

#### 4.3.Оборудование для сварки газовым теплоносителем.

Для сварки термопластов нагретым газом применяются горелки, которые делятся на:

1) газовые горелки косвенного действия ГГК-1;

2) газовые горелки прямого действия ГГП-1;

3) газовые горелки с электрическим нагревом газа-теплоносителя прямого действия ГЭП-1 и ГЭП-2.

Технические характеристики большинства известных горелок практически одинаковы:

- мощность нагревательных элементов 500-800 Вт;
- расход газа-теплоносителя 0,08 см<sup>3</sup>/с;
- напряжение не более 36 В;
- скорость подачи воздуха или инертных газов 25 – 30 м/с;
- масса горелок 300 – 600 г.

При использовании газовых горелок косвенного действия передача тепла от продуктов сгорания к газу теплоносителю происходит через стенку, разделяющую эти потоки.

При использовании газовых горелок прямого действия газ – теплоноситель смешивается с продуктами сгорания.

В газовых горелках с электрическим нагревом газа – теплоноситель нагревается джоулевым теплом, выделяющимся при прохождении электрического тока через нагревательный элемент, изготовляемый из материала с высоким удельным сопротивлением. Нагревательный элемент может быть выполнен в виде проволочной спирали, омываемой потоком газа – теплоносителя, или в виде свернутой трубки (змеевика), к концам которой подводится напряжение, а внутри пропускается газ – теплоноситель.

#### **4.4. Технология сварки газовым теплоносителем.**

Качество сварных швов, полученных сваркой с применением присадочного материала, зависит от свойств основного материала и материала прутка, типа сварного шва, подготовки свариваемого материала и соблюдения сварщиком технологических приемов и режимов сварки.

Прочность и плотность сварного соединения обусловлены его видом и профилем, углом раскрытия и величиной зазора между свариваемыми кромками. Сварные соединения, применяемые при изготовлении изделий из пластмасс можно разделить на четыре вида: а) стыковое; б) нахлесточное; в) тавровое; г) угловое.

Стыковые швы могут быть без предварительной разделки кромок, с V – образной и X – образной разделкой. Разделка кромок не производится при сварке термопластов толщиной до 2 мм. V – образную и X – образную разделку кромок осуществляют при сварке листов толщиной 2 – 6 мм. X – образные швы обеспечивают более высокое качество соединения, чем V – образные, но подготовка кромок более трудоемка.

Угол раскрытия кромок применяют 55 - 60° для листов толщиной менее 5 мм и 70 - 90° - для листов толщиной более 5 мм.

Особое влияние на качество сварного шва оказывают:

- 1) скорость укладки присадочного прутка;
- 2) угол наклона прутка при подаче в шов

Сварщик должен подавать пруток под углом  $90^\circ$ . Если угол будет больше  $90^\circ$ , пруток вытягивается, а при дальнейшем охлаждении возникают усадочные напряжения, которые приводят к разрыву прутка. При наклоне прутка под углом меньше  $90^\circ$  он разогреется быстрее, чем основной материал, поэтому пруток не успевает привариваться к свариваемым деталям.

### 3) расстояния от наконечника горелки

Расстояние между наконечником и поверхностью сварного шва следует поддерживать постоянным (5 – 8 мм), в противном случае температура нагрева материала и присадочного прутка будет колебаться.

### 4) положение и направление горелки при сварке

Угол наклона наконечника горелки к поверхности шва выбирают в зависимости от толщины материала. При толщине до 5 мм угол наклона наконечника равен  $20 - 25^\circ$ , при толщине более 5 мм –  $30 - 45^\circ$ .

Основными параметрами режима сварки пластмасс газовым теплоносителем являются температура и расход газа, усилие, прикладываемое к присадочному прутку и скорость его укладки в разделку шва.

Образование сварных соединений при сварке газовым теплоносителем возможно только при условии, если соединяемые поверхности материала и присадочного прутка находятся в вязкотекучем состоянии, поэтому температура газа – теплоносителя на выходе из сопла сварочного аппарата должна быть на  $50 - 100^\circ \text{C}$  превышать температуру текучести полимера.

## Лекция № 5

### Сварка экструдированной присадкой (расплавом).

- 5.1. Сущность сварки экструдированной присадкой.
- 5.2. Способы сварки экструдированной присадкой.
- 5.3. Технология сварки экструдированной присадкой.
- 5.4. Оборудование для сварки экструдированной присадкой.

#### 5.1. Сущность сварки экструдированной присадкой.

Сущность сварки экструдированной присадкой состоит в том, что расплавленный материал, выходящий из экструдера или другого устройства, непрерывно подается в зазор между соединяемыми поверхностями, нагревает их до температуры сварки и, сплавляясь с ними, образует сварной шов.

Сварка экструдированной присадкой близка к процессу сварки термопластов газовым теплоносителем с присадочным материалом, а также к сварке металлов плавящимся электродом. Во всех случаях сварное соединение образуется за счет сплавления присадочного материала с кромками соединяемых деталей. Различие между сваркой металлов и полимеров состоит в том, что металл переходит в жидкую фазу, а полимер остается в вязкотекучем состоянии. Поэтому для получения плотного

контакта расплавленного присадочного материала с кромками свариваемых деталей необходимо создавать давление.

Теплота  $Q$ , вносимая экструдированной присадкой в зону сплавления, должна перевести в вязкотекучее состояние соединяемые кромки  $Q_1$ , обеспечить сохранение вязкотекучего состояния присадочного материала  $Q_2$  и компенсировать потери теплоты с поверхности шва  $Q_3$ , т.е.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Температура присадочного материала, при которой его необходимо вносить в зону сплавления, чтобы обеспечить процесс сварки:

$$T_s = (T_T - T_f)(1 + q_1 c_1 / (q c)) + T_f,$$

где  $T_f$  – температура окружающего воздуха, °С;  $T_T$  – температура текучести материала, °С;  $q_1$  – количество материала, которое необходимо нагреть до температуры текучести, кг;  $q$  – количество присадочного материала, вносимого в зону сплавления, кг;  $c_1, c$  – удельная теплоемкость присадочного и свариваемого материала.

### 5.1.1. Преимущества сварки экструдированной присадкой.

Этот метод прост, высокопроизводителен, обладает широкими технологическими возможностями и позволяет получать высококачественные соединения.

## 5.2. Способы сварки экструдированной присадкой.

Существует три способа сварки экструдированной присадкой:

- 1) бесконтактная экструзионная сварка или экструзионная сварка;
- 2) контактно – экструзионная сварка;
- 3) контактно – экструзионная с предварительным подогревом.



Рис. 5.1. Классификация способов сварки пластмасс экструдированной присадкой.

При бесконтактной сварке мундштук не контактирует со свариваемыми поверхностями, а устанавливается на определенном расстоянии от них. Это расстояние выбирается таким образом, чтобы расплав, выдавливаемый из экструдера, не успел переохладиться. Из этих же соображений температура расплава на выходе из мундштука должна превышать температуру текучести на 40 – 50°. Для плотного прижатия присадочного материала к свариваемым поверхностям применяются прижимные приспособления (ролики, ползуны и т.п.).

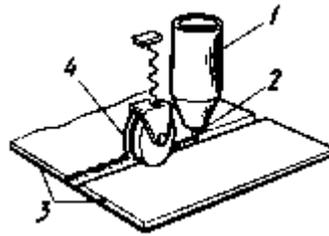


Рис 5.2. Схема экструзионной сварки пластмасс:

1- экструдер; 2 – мундштук экструдера; 3 – свариваемые детали; 4 – прикатывающий ролик.

Экструзионную сварку наиболее целесообразно применять для соединения полимерных пленок и пленочных армированных материалов непрерывным протяженным швом. Преимуществом сварки пленок по данной схеме является то, что исключается возможность утонения материала в зоне шва, которое наблюдается при других методах.

При контактно – экструзионной сварке разогретый мундштук экструдера, имеющий форму разделки кромок, вводят в разделку шва до контакта с кромками и перемещают по стыку под углом 10 - 15° к вертикали, одновременно заполняя его расплавленным присадочным материалом. В результате не только максимально снижаются тепловые потери в окружающую среду, но и дополнительно обеспечивается нагрев соединяемых поверхностей за счет теплопередачи от мундштука экструдера, температура которого близка к температуре выходящего из него расплава. Отсутствие зазора препятствует свободному вытеканию расплава из экструдера, что обеспечивает возможность использования давления, развиваемого в экструдере для создания сварочного давления. Сварочное давление  $P$  зависит от температуры присадки и числа оборотов шнека.

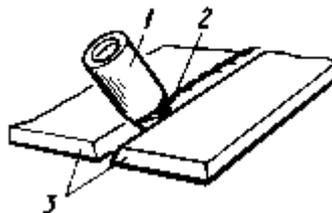


Рис 5.3. Схема контактно-экструзионной сварки пластмасс:

1- экструдер; 2 – мундштук экструдера; 3 – свариваемые детали.

### 5.3. Технология сварки экструдированной присадкой.

Процесс бесконтактной экструзионной сварки сложный и характеризуется большим числом параметров, наиболее существенные из которых температура присадочного материала на выходе из экструдера  $T_i, ^\circ\text{C}$ , сварочное давление  $P$ , МПа; скорость сварки  $v$ , м/с; скорость движения расплава в воздушном зазоре между мундштуком экструдера и материалом  $v'$ , м/с; количество присадочного материала, выходящего из экструдера в единицу времени  $G$ , кг/с; количество присадочного материала, вносимого в зону шва  $g$ , кг/с; диаметр присадочного материала  $d$ , м; расстояние между

мундштуком экструдера и свариваемым материалом  $S$ , м; температура присадочного материала, вносимого в зону шва  $T_s$ , °C.

Связь основных параметров процесса сварки описывается уравнением:

$$T_i = a \cdot e^{-x \cdot P} - k \cdot v + c,$$

где  $k$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $x$  – константы, учитывающие теплофизические свойства материала и его температуру.

Материал толщиной до 5 мм следует сваривать присадочным материалом диаметром 5 мм, материалы толщиной выше 5 мм – диаметром 10 мм. Увеличение или уменьшение диаметра присадочного материала ухудшает качество соединения.

Оптимальное расстояние между мундштуком экструдера и поверхностью свариваемого материала равно 0,1 м. Увеличение  $S$  приводит к значительным потерям присадочным материалом теплоты; уменьшение затрудняет создание сварочного давления, которое должно сообщаться присадочному материалу непосредственно после укладки его в шов.

Процесс контактно-экструзионной сварки характеризуется меньшим числом технологических параметров, чем экструзионная сварка. Основными технологическими параметрами контактно-экструзионной сварки при условии полного заполнения разделки расплавом являются температура присадочного материала на выходе из экструдера  $T_i$ , °C, сварочное давление  $P$ , МПа и скорость сварки  $v$ , м/с.

Оптимальное значение основных параметров процесса контактно-экструзионной сварки взаимообусловлены и практически не зависят от толщины материала:

$$T_i = a_1 \cdot e^{-x \cdot P} + k_1 \cdot v + c_1,$$

где  $k_1$ ,  $c_1$ ,  $a_1$ ,  $x$  – константы, учитывающие теплофизические свойства материала и его температуру.

Уравнение позволяет рассчитывать оптимальные режимы сварки, обеспечивающие получение сварных соединений с максимальной прочностью (90-100% прочности основного материала).

По производительности процесса и прочности сварных соединений контактно-экструзионная сварка практически не отличается от экструзионной. Характерная особенность рассматриваемого процесса – более высокая стабильность качества. Преимуществом является также низкая чувствительность его к состоянию поверхности материала. На режимы сварки и качество сварных соединений при этом способе сварки практически не влияет загрязнение свариваемых поверхностей и воздействие на них климатических факторов, затрудняющих образование качественных сварных соединений.

#### **5.4. Оборудование для сварки экструдированной присадкой.**

Для сварки экструдированной присадкой создана серия малогабаритных сварочных полуавтоматов, различающихся по конструктивному оформлению и производительности. Все полуавтоматы укомплектованы рабочими инструментами – пистолетами – экструдерами, которые в зависимости от

способа подачи расплава разделяются на шнековые (когда подача расплава осуществляется шнеком) и прямоточные (когда расплав выталкивается холодным присадочным материалом, загружаемым в экструдер).

Как шнековые, так и прямоточные пистолеты-экструдеры могут включать дополнительные приспособления для нагрева газа теплоносителя. В комплект всех пистолетов входят сменные мундштуки, которые имеют форму, соответствующую форме поперечного сечения разделочных кромок и служат для подачи присадки в разделку и создания сварочного давления. Полуавтоматы могут быть переносными, передвижными и стационарными.

Наиболее широкое применение получили полуавтоматы ПСП-5, ПСП-6 и РЭСУ-50 с прямоточными пистолетами и ПСП-3Э, ПСП-4 со шнековыми пистолетами. На базе полуавтомата ПСП-5 создан специализированный карусельный стенд УСА-1 для сварки чехлов щелочных аккумуляторов из ПЭВД.

## **Лекция № 6.**

### **Контактная тепловая сварка.**

- 6.1. Сущность процесса контактной тепловой сварки.
- 6.2. Контактно-тепловая сварка проплавлением.
- 6.3. Контактно-тепловая сварка оплавлением.
- 6.4. Оборудование для контактной тепловой сварки.

#### **6.1. Сущность процесса контактной тепловой сварки.**

Контактная тепловая сварка (термоконтактная) является способом, при котором нагрев соединяемых деталей осуществляется путем контакта с заранее нагретым или нагреваемым в процессе сварки инструментом.

По методам подвода теплоты к свариваемым поверхностям различают сварку оплавлением и сварку проплавлением. Контактная тепловая сварка, при которой нагретый инструмент находится в непосредственном контакте с соединяемыми поверхностями, называется методом сварки оплавлением. Переход термопласта в вязкотекучее состояние при этом методе происходит, начиная с поверхностей, подлежащих соединению, и сопровождается в большинстве случаев вытеканием расплава из-под нагревающего инструмента, т.е. соединяемые поверхности оплавляются. Методом оплавления сваривают, как правило, листы, трубы и профильные заготовки.

Контактная тепловая сварка, при которой теплота поступает к свариваемым поверхностям за счет теплопроводности свариваемого материала от инструмента, прикладываемого к их внешней поверхности, называется методом сварки проплавлением. Примером применения метода сварки проплавлением является соединение пленок внахлестку на прессе, когда теплота подводится от нагревателей, прикладываемых к нахлестке снаружи, а сварка производится внутри.

#### **6.2. Контактно-тепловая сварка проплавлением.**

По режиму нагрева деталей при сварке проплавлением различают сварку при длительном нагреве по заранее заданному термическому режиму – контактно – тепловую сварку прессованием и термоимпульсную сварку, при которой нагрев свариваемых деталей осуществляется за счет кратковременного теплового импульса, а скорость охлаждения определяется теплоотводом в основание и подложку нагревателя и изделия.

1) При контактно – тепловой сварки прессованием нагреватель представляет собой массивный нагревательный инструмент, который одновременно и спрессовывает детали.

Контактно – тепловую сварку производят с односторонним или двухсторонним нагревом изделия. Чтобы избежать прилипания свариваемого материала к нагревателю сварку ведут через разделительные прокладки из фторопласта или целлофана.

Поскольку толщина материала значительно меньше ширины шва, тепловой поток от нагревателя можно считать направленным в одну сторону вдоль оси  $Y$ . Тогда все плоскости, параллельные плоскости  $XZ$ , будут изотермическими поверхностями. Температура таких поверхностей является функцией от их координаты  $Y$ .

При исследовании тепловых полей задача состоит в определении температур изотермических поверхностей в любой момент времени. Решение должно удовлетворять основному уравнению теплопроводности Фурье для одномерного теплового потока:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2},$$

где  $T$  – температура, °К,  $t$  – время, сек,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{сек}$ ,  $y$  – расстояние по толщине пленки от верхней поверхности, находящейся в контакте с нагревателем.

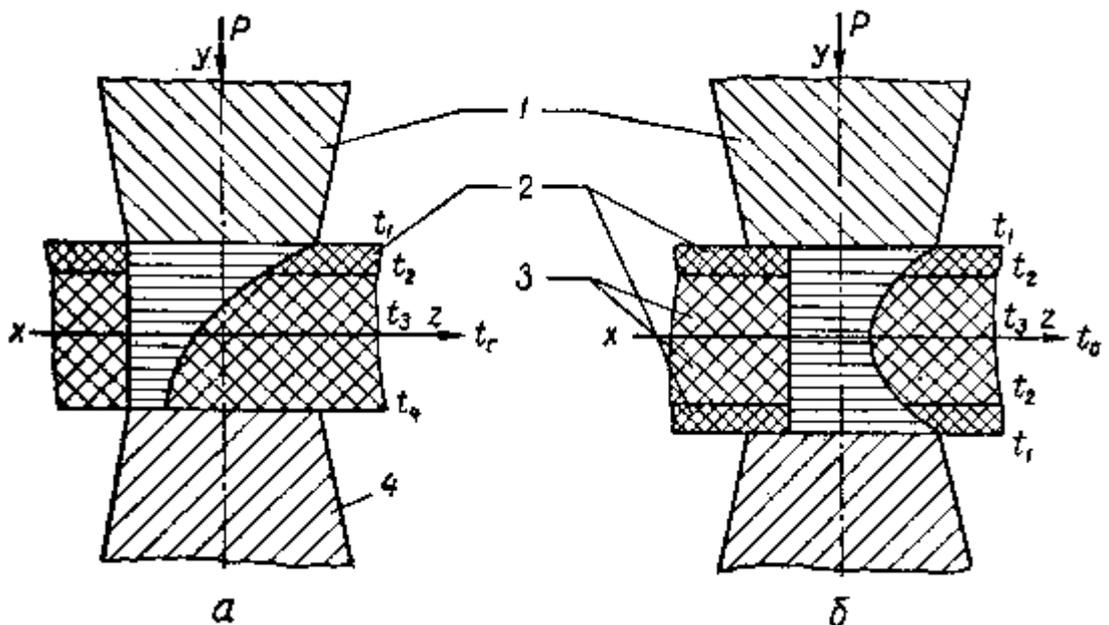


Рис 6.1. Схема контактно-тепловой сварки прессованием и распределение температуры по сечению свариваемых материалов и прокладок:

а - с односторонним нагревом; б - с двухсторонним нагревом; 1 - нагретый инструмент; 2 - прокладки; 3 - свариваемые материалы; 4 - холодный инструмент.

Из графика распределения температуры по поперечному сечению шва видно, что самая низкая температура устанавливается в месте сварки, а самая высокая - на поверхности материала. Поэтому, чтобы материал в месте соединения достаточно разогрелся, температура нагревательных элементов должна быть выше температуры сварки.

Давление, оказываемое при сварке на шов, в определенной степени зависит от вязкости расплава и геометрических параметров соединения:

$$P_{св} = (2\eta \cdot l/t) \left[ 1/(h_0 - \Delta)^2 - 1/h_0^2 \right],$$

где  $\eta$  - вязкость расплава;  $l$  - половина ширины нахлестки;  $t$  - продолжительность сварки;  $\Delta$  - величина осадки;  $h_0$  - толщина свариваемого пакета пленок.

Двухсторонний нагрев позволяет скорее разогреть материал до требуемой температуры.

При непрерывной контактно - тепловой сварке перемещение материала относительно инструмента накладывает дополнительные условия на характер распределения температуры по сечению шва. Главной особенностью нагрева материала является неравномерное распределение температуры по длине нагревателя. Наиболее низкую температуру будет иметь передняя часть нагревателя, постоянно вступающая в контакт с холодным материалом. Попытки ускорить контактно - тепловую сварку путем повышения температуры инструмента увеличивают опасность термодеструкции термопласта.

Чтобы избежать прилипания свариваемого материала к нагревателю сварку ведут через разделительные прокладки из фторопласта или целлофана.

2) Термоимпульсная сварка отличается от сварки прессованием тем, что для ее осуществления в качестве нагревательного инструмента используются металлические ленты с большим электрическим сопротивлением (вместо массивных нагревательных приборов большой теплоемкости), которые, нагреваясь импульсом электрического тока, разогревают свариваемый материал за доли секунды. Давление, необходимое для соединения, создается на лентах при помощи дополнительного приспособления.

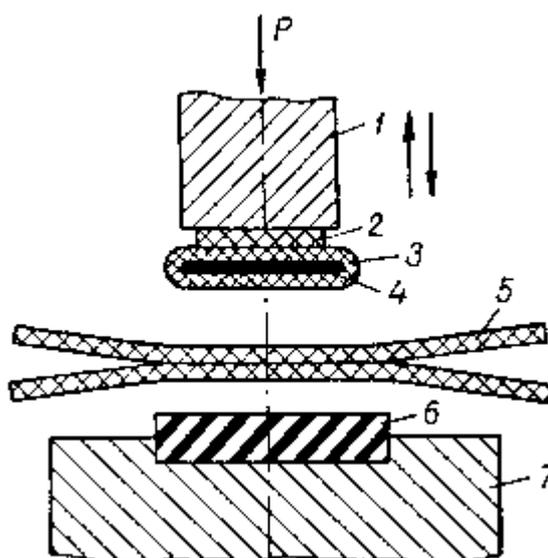


Рис. 6.2. Схема термоимпульсной сварки:

1, 7 – прижимные губки; 2 – теплоизоляция; 3, 6 – разделительные пленки; 4 – нагревательные ленты; 5 – свариваемые детали.

Свариваемые детали укладываются на неподвижную губку прессы, покрытую термоизоляцией, и прижимаются к нему в месте шва подвижным прижимом. Импульсы тока нагревают металлическую ленту. В зависимости от материала и толщины пленки продолжительность импульса колеблется в пределах 0,1 – 1 сек.

Соединяемые поверхности быстро нагреваются до температуры сварки, а затем быстро охлаждаются прижимом, рассчитанным на создание необходимого сварочного давления. Охлаждение под давлением – основное преимущество термоимпульсной сварки.

### 6.3. Контактно-тепловая сварка оплавлением.

Процесс контактной сварки оплавлением деталей состоит в том, что свариваемые поверхности нагревают до заданной температуры, после чего источник тепла удаляют, а нагретые поверхности быстро соединяют под давлением. Нагрев соединяемых поверхностей осуществляется за счет теплоотдачи. Этим способом выполняют стыковые и нахлесточные соединения.

1) При сварке встык свариваемые кромки деталей по всей длине шва прижимают к нагретому инструменту, геометрическая форма которого соответствует форме стыкуемых поверхностей, и прогревают до вязкотекучего состояния. Затем нагреватель удаляют, а размягченные кромки, легко прижимая, соединяют друг с другом и, не снимая давления, охлаждают. Сваркой встык соединяют детали толщиной 2 – 20 мм.

При сварке большинства пластмасс давление в процессе сплавления размягченного термопласта колеблется в пределах 0,2 – 0,5 МПа. При этом сохраняется необходимая прочность соединения без чрезмерного выплеска материала.

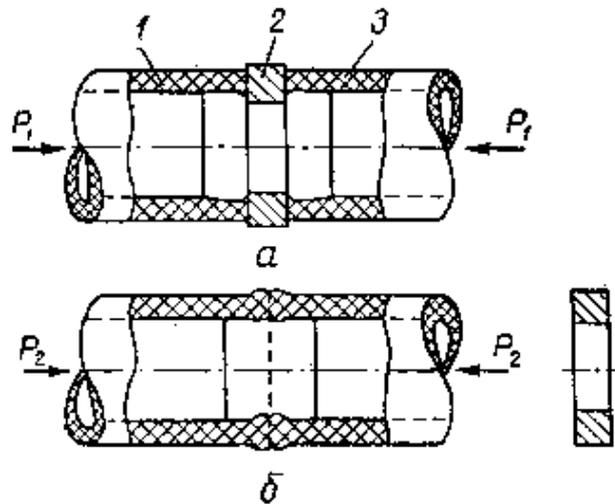


Рис. 6.3. Схема сварки труб встык при нагреве соединяемых поверхностей нагретым инструментом:

а – нагрев; б – соединение и охлаждение; 1, 3 – соединяемые элементы; 2 – инструмент.

2) Сварка внахлестку применяется преимущественно для соединения тонкостенных изделий или пленок термопластов. Соединяемые поверхности нагревают инструментом, образуя шов одновременно по всей длине непрерывным способом.

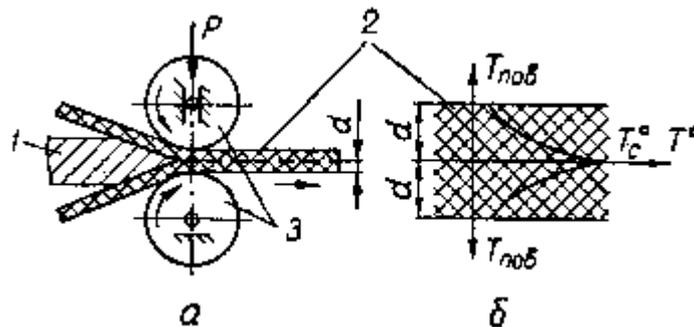


Рис. 6.4. Непрерывная сварка пленок внахлестку:

а – процесс сварки; б – распределение температуры по толщине пленок; 1 – нагревательный инструмент; 2 – свариваемые пленки; 3 – ролики.

Наибольшее распространение получил способ сварки с механизированной подачей свариваемого материала и неподвижным нагревательным инструментом. Таким способом сваривают пленки толщиной свыше 150 мкм.

#### 6.4. Оборудование для контактной тепловой сварки.

Сварочное оборудование для контактной тепловой сварки различают по назначению (например, для сварки пленок, для сварки труб, для сварки листов); по уровню механизации (автоматы, полуавтоматы, устройства для ручной сварки); по мобильности, что чаще всего определяется массой установок для сварки в стационарных, цеховых условиях, для сварки в полевых и монтажных условиях.

Установки и устройства могут быть для непрерывной и циклической (шаговой) сварки, для одностороннего и двустороннего нагрева.

Стационарные установки снабжают следящими устройствами и программным управлением.

Процесс сварки может осуществляться различными нагревательными элементами – стальными пластинами, лентами, роликами, электропаяльниками, дисками, кольцами и электроутюгами особой конструкции, которые встраиваются в специальные устройства и установки.

Для сварки армированных пленок в монтажных условиях получили распространение полуавтоматические установки для односторонней (ПСП-11, ПСП-16АТ) и двусторонней (ПСП-15, ПСП-16) сварки.

Для сварки в стационарных условиях полимерных пленок разработана серия установок МСП-16, МСП-5М, УСПП-3М, МСП-17М.

Для сварки труб диаметром от 25 до 1200 мм выпускаются устройства типа УСКПТ-12, СА-59, УСП-5, УСКП-6.

## **Лекция № 7**

### **Сварка в электрическом поле высокой частоты.**

7.1. Сущность сварки пластмасс токами высокой частоты.

7.2. Физические основы нагрева пластмасс в электрическом поле высокой частоты.

7.3. Способы сварки пластмасс токами высокой частоты.

#### **7.1. Сущность сварки пластмасс токами высокой частоты.**

Сварка пластмасс токами высокой частоты основана на нагреве в результате преобразования электрической энергии в тепловую непосредственно внутри самого материала. При этом пластмассы нагреваются несколько выше температуры размягчения, однако свариваемый материал не достигает жидкотекучего состояния и сварка происходит в вязкотекучем состоянии с приложением давления.

Свариваемое изделие помещают в переменное электрическое поле высокой частоты. Поскольку пластмассы являются несовершенными диэлектриками, элементарные заряды при внесении диэлектрика в высокочастотное электрическое поле несколько смещаются, небольшое количество имеющихся в диэлектрике свободных зарядов образуют ток проводимости. На смещение заряженных частиц затрачивается работа, которая превращается в тепло благодаря наличию молекулярного трения между материальными частицами. Каждое изменение направления электрического поля влечет за собой выделение некоторого количества тепла. Для сварки пластмасс применяются токи высокой частоты в пределах 12 – 80 Гц.

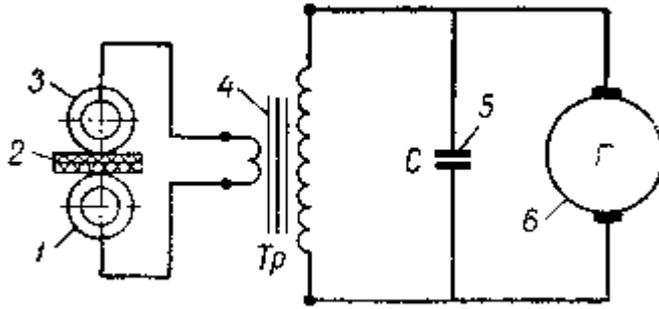


Рис 7.1. Схема сварки пластмасс токами высокой частоты:

1 – нижний электрод; 2 – свариваемые детали; 3 – верхний электрод; 4 – понижающий трансформатор; 5 – конденсаторная батарея; 6 – генератор высокой частоты.

Области применения сварки пластмасс токами высокой частоты:

В настоящее время токами высокой частоты в основном сваривают изделия из винипласта и полихлорвинилового пластика толщиной до 5 мм. Этот метод обеспечивает герметичность и высокую прочность сварных швов, отличается высокой производительностью, экономичностью и хорошим качеством соединения.

## 7.2. Физические основы нагрева пластмасс в электрическом поле высокой частоты.

При сварке токами высокой частоты материал находится между металлическими электродами. Электроды и помещенный между ними материал образуют конденсатор, подключенный к источнику высокочастотной электрической энергии. Под действием электрического поля материал диэлектрик поляризуется. В случае переменного электрического поля в диэлектрике происходит переменная поляризация, сопровождающаяся смещением заряженных частиц, входящих в атомы и молекулы вещества.

Движение частиц в диэлектрике происходит с некоторым трением и электрическое поле затрачивает свою энергию на его преодоление. В диэлектриках, обладающих дипольной поляризацией, перемещение частиц происходит с большим трением, что вызывает нагрев диэлектрика. При малой частоте изменения электрического поля диполи диэлектрика ориентируются без запаздывания, а с возрастанием частоты поля увеличивается скорость поворота диполей и, следовательно, растет трение частиц.

Удельную мощность, выделяемую в единице объема диэлектрика, помещенного в переменное электрическое поле, определяют по формуле:

$$P_{уд} = 0,555 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f E^2 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2,$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;

$f$  – частота изменения направления поля, Гц;

$E$  – напряженность поля в материале,  $\text{Вт/см}^2$ .

Коэффициенты  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  у различных материалов различны; чем больше их значение, тем лучше нагревается материал. В связи с этим ТВЧ свариваются только те пластмассы, у которых при температуре  $+20^\circ\text{C}$   $\text{tg}\delta$  составляет не менее 0,01.

Согласно ГОСТ 21139 – 82 для сварки ТВЧ полимерных материалов можно использовать следующие частоты: 13,56 МГц  $\pm 0,05\%$ ; 27,12 МГц  $\pm 0,6\%$ ; 40,68 МГц  $\pm 0,05\%$ ; 81,36 МГц  $\pm 1\%$ .

Из формулы видно, что  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  для данного материала при определенных условиях постоянны, частота электрического поля имеет фиксированное значение, следовательно, единственной возможностью управлять интенсивностью нагрева материала при сварке остается изменение напряжения на электродах. Однако напряжение можно увеличивать до определенных пределов, выше которых происходит электрический пробой материала.

Допустимая величина напряжения, подводимого к электродам при сварке различных материалов:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{проб}} / (1,5 \div 2),$$

где  $U_{\text{проб}}$  – пробивное напряжение материала, В.

С повышением температуры материала его пробивное напряжение уменьшается. Скорость нагрева материала при сварке ТВЧ мало зависит от теплопроводности полимера. Теплопроводность определяет лишь потери теплоты в околошовную зону материала и металл электродов. При сварке тонких пленок максимальная температура сосредоточена на соединяемых поверхностях, а минимальная – на внешних поверхностях, контактирующих с электродами.

Удельная тепловая мощность ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), потребляемая от источника нагрева с учетом тепловых потерь:

$$P = 9,9 \cdot 10^7 (\rho c / \eta_T) (\Delta T / \Delta t),$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$\Delta T / \Delta t$  – скорость нагрева материала;

$\eta_T$  – термический КПД процесса нагрева, учитывающий потери теплоты в окружающую среду.

### 7.3. Способы сварки пластмасс токами высокой частоты.

В промышленности применяют прессовую, роликовую и точечную сварку. Выбор того или иного способа сварки зависит от конструктивных особенностей изделия.

1) При прессовой сварке материал помещают между обкладками рабочего конденсатора и нагрев места соединения осуществляется с помощью инструмента (электродов), повторяющего внешнюю форму шва.

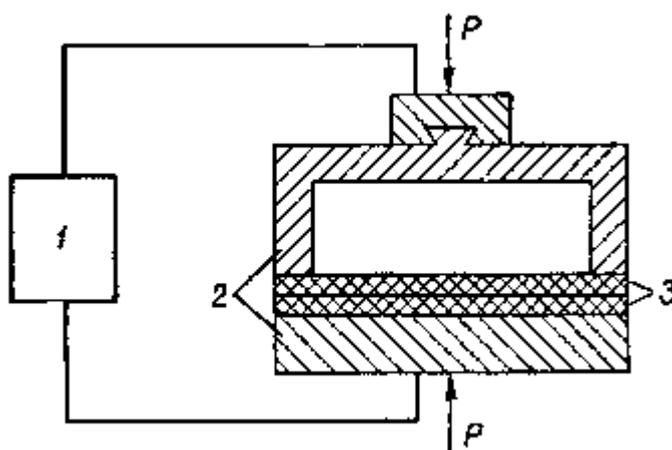


Рис. 7.2. Схема прессовой сварки:

1 – высокочастотный генератор; 2 – электроды; 3 – свариваемые детали.

Сварка изделия производится в прессе, контактные поверхности которого являются электродами, подключенными к высокочастотному генератору. Электроды, кроме подвода энергии к месту сварки, выполняют роль элементов, передающих на материал необходимое давление, и охлаждают его поверхность.

При этом способе сварки нагревается либо одновременно весь шов, либо последовательно отдельные его участки.

Преимуществом прессовой сварки пластмасс по сравнению с другими способами сварки токами высокой частоты является то, что свариваемый материал в месте соединения нагревается одновременно, равномерно и по всей длине шва.

2) Роликовая сварка, так же как и прессовая шаговая, служит для получения протяженных непрерывных швов. В отличие от прессовой, при роликовой сварке соединение материалов производится двумя вращающимися роликами, выполненными в виде дисков, из которых нижний, ведущий, изолирован от корпуса сварочной машины, а верхний, ведомый, заземлен. Обычно рабочая ширина нижнего электрода берется в 5 – 10 раз больше верхнего, что обеспечивает лучшую подачу свариваемых деталей. Сварка пластмасс происходит по линии, расположенной непосредственно под электродами.

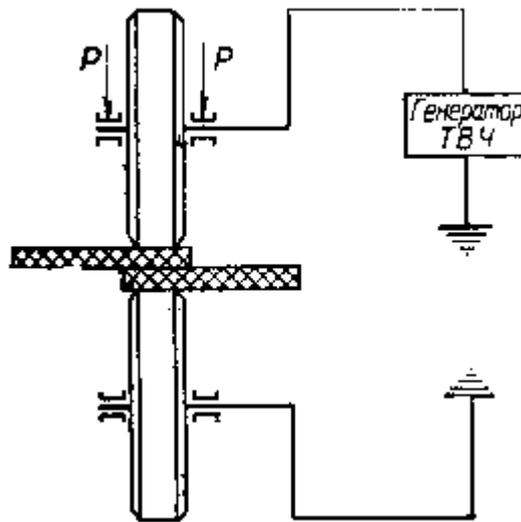


Рис. 7.3. Схема роликовой сварки пластмасс токами высокой частоты.

Под воздействием тока высокой частоты пластмассы нагреваются до температуры вязкотекучего состояния, а давление, приложенное к электродам, создает тесный контакт между свариваемыми поверхностями. Несмотря на свою простоту, способ роликовой сварки токами высокой частоты имеет ряд существенных недостатков. Шов не успевает охладиться под давлением, выходит из-под электродов нагретым, и при охлаждении может произойти его деформация.

## Лекция № 8

### Ультразвуковая сварка.

8.1. Сущность ультразвуковой сварки.

8.2. Классификация способов ультразвуковой сварки.

#### 8.1. Сущность ультразвуковой сварки.

Способ ультразвуковой сварки пластмасс заключается в том, что электрические колебания ультразвуковой частоты (20-50 кГц), вырабатываемые генератором, преобразуются в механические продольные колебания магнитострикционного преобразователя и вводятся в свариваемый материал с помощью продольно-колеблющегося инструмента – волновода, расположенного перпендикулярно к свариваемым поверхностям. Подвод механической энергии ультразвуковых колебаний осуществляется за счет контакта излучающей поверхности сварочного инструмента – волновода с одной или несколькими свариваемыми деталями. Такой контакт обеспечивается статическим давлением  $P_{ст}$  рабочего торца волновода на свариваемые детали. Это давление способствует также концентрации энергии в зоне соединения.

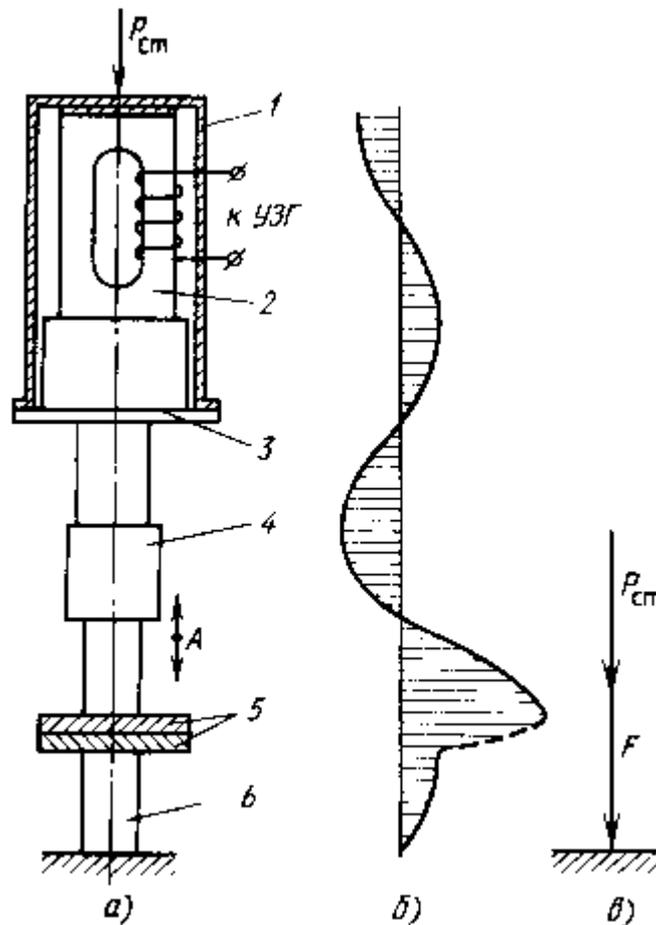


Рис 8.1. Схема ультразвуковой сварки:

а – схема установки: 1 – корпус преобразователя; 2 – преобразователь с обмоткой; 3 – трансформатор упругих колебаний; 4 – волновод; 5 – свариваемые детали; 6 – опора;

б – эпюра амплитуды смещения колебательной системы; в – расположение векторов статического давления  $P_{ст}$  и динамического усилия  $F$ .

Динамическое усилие  $F$ , возникающее в результате воздействия колеблющегося волновода, приводит к нагреву свариваемого материала, а действие статического давления  $P_{ст}$  обеспечивает получение прочного сварного соединения. Силы  $P_{ст}$  и  $F$  воздействуют на дополнительный присадочный материал (пруток, уложенный в V – образный зазор между свариваемыми деталями). Воздействие ультразвуковых колебаний на пруток приводит к его пластификации, а под действием статического давления пластифицированный материал заполняет зазор, образуя прочное соединение.

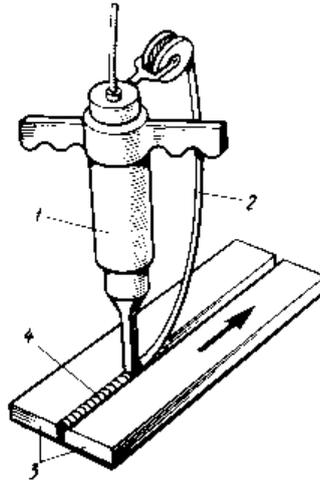


Рис. 8.2. Схема сварки с дополнительной присадкой:

1 – преобразователь с волноводом-инструментом; 2 – присадочный материал; 3 – свариваемые детали; 4 – шов.

Отличительная особенность сварки пластмасс ультразвуком состоит в том, что механические колебания вводятся преимущественно перпендикулярно к свариваемым поверхностям и совпадают с направлением действия давления. Такая схема ввода механических колебаний в материал называется «пластмассовой» в отличие от «металлической» схемы, когда механические колебания действуют в плоскости соединяемых поверхностей, а давление прикладывается перпендикулярно к ним.

Исследование тепловых процессов, протекающих при ультразвуковой сварки полимерных материалов, показало, что введение механических колебаний ультразвуковой частоты в контактируемые материалы приводит к быстрому их нагреву с преимущественным ростом температуры на контактируемых поверхностях. Нагрев обусловлен поглощением энергии механических колебаний в объеме материала, находящегося под волноводом, а также поглощением энергии в свариваемом контакте и в контакте полимерный материал – волновод. Поглощенная в полимере механическая энергия переходит в теплоту, за счет чего происходит так называемый гистерезисный разогрев полимеров. Выделение теплоты в объеме полимера обусловлено потерями на внутреннее трение. Наиболее интенсивное поглощение энергии и превращение ее в теплоту происходит в отдельных несплошностях материала и на границе раздела.

Возникающие при сварке поперечные ультразвуковые колебания могут вызвать поверхностное трение на границе раздела, что также способствует быстрому разогреву материала в этой зоне и переходу его в размягченное состояние. Образовавшаяся мягкая прослойка снижает коэффициент механического трения, однако сама является средой, интенсивно поглощающей механические колебания.

Роль механических ультразвуковых колебаний состоит также в том, что под действием мощных импульсов ультразвуковой частоты происходит

выравнивание микронеровностей, разрушение и удаление различных поверхностных пленок и загрязнений.

В значительной степени ультразвуковая сварка отличается от других способов также и в отношении физико-химических процессов, протекающих на границе раздела. Во-первых, воздействие механических колебаний на расплав полимера значительно ускоряет процесс диффузии макромолекул. Во-вторых, при ультразвуковой сварке происходит интенсивное перемешивание расплава, вызванное «насосным» действием поверхности движущегося волновода, при движении вперед волновод отталкивает полимер, а при движении назад не полностью увлекает его за собой, благодаря этому в область разряджения, образующуюся на границе раздела деталей, притекают новые частицы полимера. Это ускоряет процесс образования сварных соединений и обеспечивает возможность качественной сварки при температурах более низких, чем в случае других известных способов сварки.

## **8.2. Классификация способов ультразвуковой сварки.**

Классификация процессов ультразвуковой сварки приведена с учетом следующих основных признаков:

- 1) ввод энергии механических колебаний в свариваемое изделие;
- 2) передача колебаний к зоне сварки;
- 3) концентрация энергии в зоне сварки;
- 4) дозирование вводимой энергии;
- 5) взаимное перемещение сварочного инструмента и свариваемых деталей для получения швов необходимой конфигурации и протяженности.

Ввод механической энергии ультразвуковых колебаний осуществляется за счет контакта рабочего торца волновода с одной или несколькими свариваемыми деталями. Для интенсификации процесса сварки можно применять двусторонний (от двух преобразователей) подвод энергии к свариваемым поверхностям, что позволяет увеличить выделяющуюся на границе раздела деталей энергию почти в 4 раза.

Характер передачи энергии к границе раздела и распределение ее относительно свариваемых поверхностей при ультразвуковой сварке может быть различным и в зависимости от этого сварка разделена на контактную и передаточную – дистанционную.

При контактной ультразвуковой сварке для равномерного распределения энергии по всей площади контакта свариваемых деталей необходимо, чтобы рабочий торец волновода, соприкасающийся с верхней деталью, имел форму и площадь, идентичную площади и форме плоскости контакта свариваемых поверхностей. Такую схему применяют для сварки полимерных материалов, обладающих низким модулем упругости и большим коэффициентом затухания, как полиэтилен, полипропилен, пленок и синтетических тканей небольшой толщины (0,002-5мм).

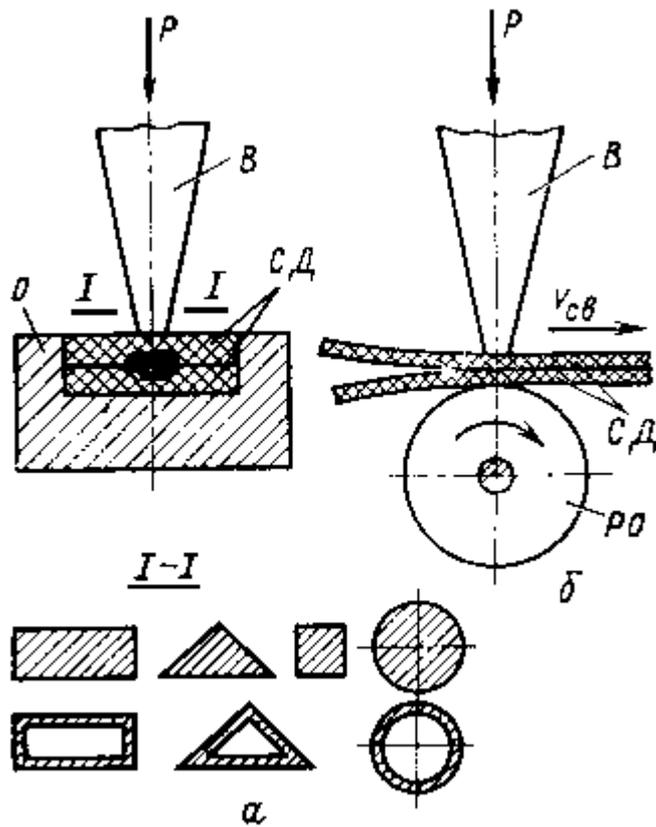


Рис. 8.3. Схема контактной ультразвуковой сварки:  
 а – прессовая; б – шовная; В – волновод; СД – свариваемые детали; РО – ролик опора.

При передаточной ультразвуковой сварке, применяемой при сварке полимерных материалов, обладающих большим модулем упругости и малым коэффициентом затухания, ввод механических колебаний возможен в отдельной точке или на небольшом участке поверхности верхней детали. Благодаря хорошим акустическим свойствам материала изделия энергия ультразвуковой волны незначительно ослабляется при прохождении через деталь, контактирующую с волноводом, и почти полностью транспортируется к границе раздела свариваемых деталей. Передаточную сварку рекомендуют для соединения объемных деталей из жестких пластмасс, как полистирол, полиметилметакрилат и др.

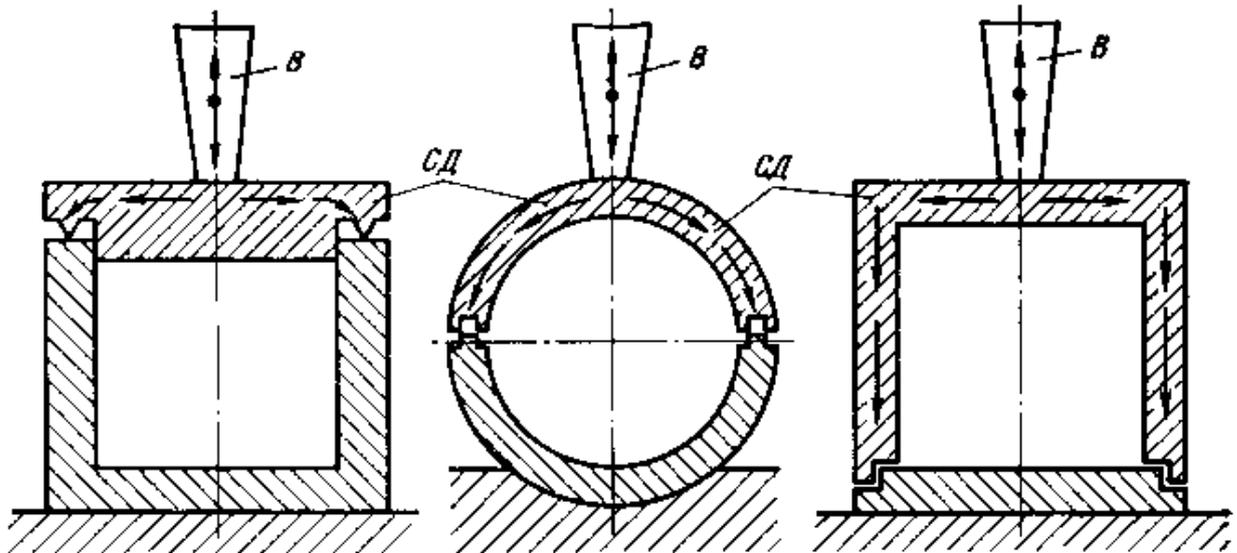


Рис 8.4. Схема передаточной ультразвуковой сварки:

В – волновод; СД – свариваемые детали.

По принципу дозирования вводимой механической энергии ультразвуковую сварку подразделяют на сварку:

а) с фиксированным временем протекания ультразвукового импульса. Продолжительность сварки задается с помощью реле времени, а статическое усилие действует до окончания сварочного цикла.

б) с фиксированной осадкой. Задается осадка  $\delta$ , т.е. глубина вдавливания волновода в свариваемую деталь под воздействием статического усилия и ультразвука.

в) с фиксированным зазором. Сущность процесса состоит в том, что сварка происходит только в результате динамических усилий, возникающих при воздействии волновода на свариваемый материал. При этой схеме сварки зазор между рабочим торцом волновода и опорой устанавливается таким, чтобы свариваемый материал деформировался только за счет смещения рабочего торца волновода. В результате воздействия волновода материал утоньшается, а так как сварочная головка зафиксирована и не имеет возможности перемещаться в вертикальном направлении, то контакт волновода с материалом после деформации последнего нарушается и воздействие ультразвука на материал прекращается. Деформация свариваемого материала не превышает удвоенной амплитуды смещения волновода и зависит от исходной толщины материала.

По взаимному перемещению волновода относительно изделия ультразвуковая сварка разделяется на прессовую и непрерывную. Прессовая сварка выполняется за одно рабочее движение волновода. С помощью прессовой сварки получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы различного контура, например, в виде окружности, квадрата, прямоугольника, треугольника, эллипса и т.п. (рис. 8.3.) в зависимости от формы рабочего торца волновода.

Непрерывная сварка позволяет получать непрерывные протяженные швы путем относительного перемещения волновода и свариваемого изделия.

## **Лекция № 9**

### **Сварка пластмасс трением.**

- 9.1. Сущность сварки пластмасс трением.
- 9.2. Способы сварки трением.
- 9.3. Оборудование для сварки пластмасс трением.

#### **9.1. Сущность сварки пластмасс трением.**

Сварка пластмасс трением основана на нагреве соединяемых поверхностей за счет превращения механической энергии трения в теплоту. Поскольку пластмассы обладают низкой теплопроводностью от зоны контакта деталей, подвергающихся трению, отводится незначительное количество теплоты и поэтому нагрев происходит быстро. За счет выделяющейся при трении теплоты термопластичный материал переходит в вязкотекучее состояние (плавится) и под воздействием прикладываемого при этом усилия часть расплава вытекает в процессе трения (оплавления) свариваемых деталей. При накоплении в стыке необходимого количества расплава процесс трения прекращается и детали сжимаются (осаждаются) – получается неразъемное соединение.

Для осуществления соединения термопластов при сварке необходимо:

- 1) повышение активности макромолекул сопрягаемых слоев деталей с целью увеличения вероятности их взаимной ориентации, взаимодействия и последующего ассоциирования в надмолекулярные структуры;
- 2) удаление с поверхности абсорбированных веществ, загрязнений и оксидных пленок с целью образования ювенильных поверхностей;
- 3) создание физического контакта сопрягаемых поверхностей в пределе до номинальной величины, т.е. до полного контакта по всей поверхности.

При сварке пластмасс трением первое условие выполняется за счет регенерации механической работы трения в тепловую энергию. Второе условие реализуется при износе поверхностей в процессе трения и удалении из зоны контакта свариваемых деталей загрязнений радиальными силами. Третье условие выполняется путем сжатия сопрягаемых деталей внешними силами как в процессе нагрева, так и при осадке.

Преимущество способа сварки трением состоит в том, что при трении в месте контакта разрушаются все поверхностные ингредиенты, образовавшиеся до начала процесса сварки. В процессе сварки расплав защищен от влияния атмосферы, чем в значительной степени исключены процессы окисления макромолекул, находящихся в активированном состоянии.

К преимуществам сварки трением относятся также высокая производительность процесса, малое потребление энергии и мощности, высокое качество сварного соединения, стабильность качества сварных

соединений, возможности сварки разнородных пластмасс, гигиеничность процесса.

## 9.2. Способы сварки трением.

В зависимости от условий нагрева свариваемых поверхностей сварку трением можно производить по двум схемам:

- а) вращением свариваемых деталей или промежуточного элемента – сварка вращением;
- б) вибрацией свариваемых деталей или промежуточного элемента – сварка вибротрением.

Сварку трением вращением применяют при соединении деталей, имеющих форму тел вращения. Вибротрением можно сваривать несимметричные детали практически любой конфигурации.

Кинематически сварка вращением может производиться при непосредственном контакте стыкуемых деталей вращением одной из них, либо вращением обеих, а также вращением специальной вставки.

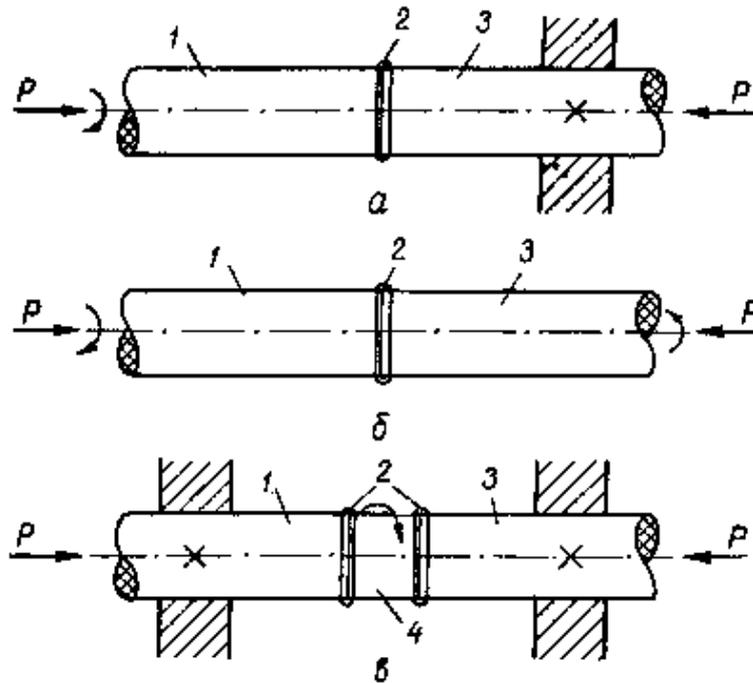


Рис 9.1. Принципиальная схема сварки трением:

а – с использованием вращения одной детали; б – двух деталей; в – вставки; 1, 3 – свариваемые детали; 2 –шов; 4 – вставка.

Наибольшее практическое применение имеет схема сварки вращением, при которой одна из свариваемых деталей неподвижна. В этом случае выделяющаяся тепловая мощность ( $\text{Вт/см}^2$ ) может быть определена по формуле:

$$N \approx 2/3 \pi P f n R 10^{-2},$$

где  $P$  – давление, МПа;  $f$  – коэффициент трения;  $n$  – относительная скорость вращения, об/мин;  $R$  – радиус поверхности трения, см.

Таким способом сваривают между собой стержни, трубы и другие тела вращения сравнительно небольшой длины.

Во втором случае трение в свариваемых поверхностях создается вращением обеих деталей, но в противоположные стороны. Такой способ целесообразно применять, когда необходимы высокие относительные скорости вращения.

Длинные детали, вращение и торможение которых затруднено, можно сваривать при помощи третьей, промежуточной детали – вставки. Вставка может быть остающейся после осадки и представлять собой элемент сварной конструкции. В этом случае вставка должна быть из того же материала, что и свариваемые детали, а конструкция будет иметь два сварных шва. Возможно применение вращающегося элемента, который после оплавления контактирующих с ним деталей удаляется, а детали соединяют путем осадки. Недостатком последнего метода является то, что после удаления вставки расплавленные поверхности контактируют с атмосферой.

При сварке вибротрением детали нагреваются вследствие вибрационных перемещений низкой частоты с амплитудой конечной величины. Свариваемым деталям, прижатым одна к другой усилием  $P$ , сообщается относительное возвратно-поступательное движение, приводящее к разогреву соприкасающихся поверхностей и их соединению после прекращения вибрации. При частоте колебаний 50 Гц и амплитуде 1,5 мм продолжительность сварки термопластов практически не зависит от толщины и размеров свариваемых деталей и не превышает 10 сек. Удельное давление для разных материалов лежит в пределах 2-15 МН/м<sup>2</sup>.

### **9.3. Оборудование для сварки пластмасс трением.**

Сварку пластмасс трением осуществляют на различных металлообрабатывающих станках – токарных, сверлильных, фрезерных и на специальных сварочных машинах.

Машины для сварки трением МСП-1 и МСП-2 имеют следующие основные узлы:

- 1) механизм для создания осевого давления;
- 2) зажимные механизмы;
- 3) систему, воспринимающую осевые усилия;
- 4) аппаратуру управления.

Очень часто устанавливается электромеханический привод вращения, содержащий асинхронный электродвигатель, клиноременную передачу и шпиндель. На большинстве машин для прекращения вращения деталей применяют фрикционно-тормозные механизмы. Они обеспечивают быструю остановку шпинделя, высокую производительность процесса. Остановку вращения шпинделя можно также осуществлять за счет реверсирования электродвигателя противотоком. Однако это приводит к перегреву электродвигателя и вынужденному перерыву в работе и тем самым снижает производительность процесса.

Для сварки трением применяют зажимные механизмы нескольких типов. Станки, предназначенные для сварки в условиях индивидуального или мелкосерийного производства, снабжены кулачковыми патронами с ручным

зажимом деталей, которые позволяют быстро переналадить станок на другой диаметр деталей. В качестве зажимных механизмов для закрепления вращающихся деталей можно использовать самозажимные цанги.

Механизм для создания осевого давления выполняется пневматическим или гидравлическим. Осевое усилие в передней бабке воспринимается, как правило, упорными подшипниками.

## **Лекция № 10. Сварка излучением.**

- 10.1. Сущность сварки излучением.
- 10.2. Сварка инфракрасным излучением.
- 10.3. Оборудование для сварки ИК-излучением.
- 10.4. Сварка лучом лазера.

### **10.1. Сущность сварки излучением.**

Сварка пластмасс излучением основана на способности пластмасс поглощать лучистую (фотонную) энергию и за счет этого нагреваться. В результате поверхностные слои деталей из термопластов переходят в вязкотекучее состояние и с приложением необходимого давления свариваются.

Соответственно виду источника и характеру генерируемого им излучения различают следующие разновидности сварки:

- 1) инфракрасным излучением (ИК);
- 2) светом видимого диапазона (СВД);
- 3) лазером (оптическим квантовым генератором).

Особенностью сварки излучением является отсутствие непосредственного контакта нагревательного инструмента (излучателя) с нагреваемой поверхностью, что исключает необходимость применения мер по предупреждению адгезии расплава к нагревателям. При нагреве не происходит принудительного вытеснения расплава в первичный грат. При сварке пленки не образуется так называемый подрез по границе шва, возникающий при контактной сварке нагретым инструментом.

Процесс нагрева излучением легко регулируется в широком диапазоне путем изменения мощности лучистого потока (температуры нагрева излучателя) и расстояния до облучаемых объектов.

### **10.2. Сварка инфракрасным излучением.**

Сварка с помощью ИК-излучения основана на превращении лучистой энергии в тепловую внутри соединяемого материала. ИК-излучение имеет электромагнитную природу. Считается, что ИК-спектр занимает область длин волн от 0,72 до 1000 мкм, т.е. от красной границы видимого спектра до коротковолновой части миллиметрового диапазона. ИК-лучи ведут себя как и любые другие лучи: отражаются, преломляются, поглощаются.

Поглощаемость ИК-лучей телами использована для сварки. Механизм преобразования ИК-лучей в тепло внутри материала состоит в следующем: известно, что элементарные частицы тел имеют собственную частоту колебаний, а для пластмасс эти частоты колебаний определяются структурой молекул, размерами атомов, внутри- и межмолекулярными связями. И если частота ИК-лучей совпадает с собственной частотой колебаний элементарных частиц облучаемого тела, то происходит так называемое резонансное поглощение, т.е. превращение электромагнитной энергии в тепловую.

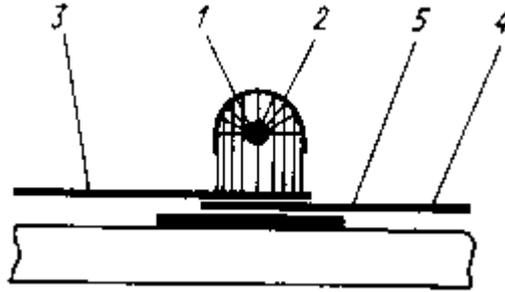


Рис. 10.1. Схема сварки ИК-излучением:

1 – источник света, 2 – рефлектор; 3, 4 – свариваемые детали, 5 – подложка.

Важной характеристикой нагрева ИК-лучами служит степень поглощения пластмассами лучистой энергии. Наибольшей способностью обладает пентопласт, наименьшей – фторопласт. Большинство пленок относительно прозрачны для ИК-лучей, поэтому часть лучистой энергии, проходя через них, попадает на подложку, поглощается ею и нагревает ее. Нагретая подложка передает часть теплоты свариваемой пленке. Наиболее эффективна в отношении скорости нарастания температуры ламповая сажа, затем черная бумага, черная пористая резина, черная прорезиненная ткань и др. Плохо нагревается материал при сварке на пассивных подложках, например, из фторопласта. С увеличением толщины свариваемых пленок роль подложки заметно уменьшается в результате ослабления интенсивности лучевого потока. При сварке ИК-излучением нагреватель не оказывает давления на свариваемые детали. Поэтому нагреваемые детали сдавливаются путем натяжения свариваемых пленок, либо на упругих подложках. Предельная толщина свариваемых пленок - 1,5 – 2 мм.

К термическим параметрам при сварке ИК-излучением можно отнести температуру сварки  $T_{св}$ , которая зависит от природы нагреваемого термопласта и размеров детали. Температура сварки фактически измеряется на поверхности нагреваемой детали, т.е.  $T_{св} = T_{п}$ .

При условии адиабатических границ нагреваемых поверхностей распространение теплоты может быть представлено одномерной схемой, когда температура поверхности  $T_{п}$  нагреваемой детали:

$$T_n = \frac{\varphi \rho q_u}{k \lambda},$$

где  $\phi$  – коэффициент теплопроводности;  $\rho$  – коэффициент поглощения ИК-излучения облучаемым материалом;  $q_u$  – мощность излучения, Вт/см<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент, представляющий собой функцию времени;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/см<sup>2</sup>·К.

Глубина проплавления:

$$h_{np} = (1/k) \ln(\phi \rho q_u / (k \lambda T_{пл})),$$

где  $T_{пл}$  – температура текучести данного термопласта.

Интенсивность ИК-излучения пропорционально четвертой степени температуры излучающего инструмента:

$$q_u = \sigma \epsilon F T^4,$$

где  $q_u$  – мощность излучения,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $F$  – площадь поверхности излучателя;  $\epsilon$  – степень черноты поверхности;  $T$  – абсолютная температура излучателя.

Мощность излучения  $q_u$  тем больше, чем выше температура излучающей поверхности инструмента. Поглощенное нагреваемой поверхностью излучение составляет лишь часть потока  $q_u$ , что учитывается коэффициентом теплопередачи, зависящим от формы и размеров излучающей и поглощающей поверхностей, а также от взаимного расположения.

Возможна сварка ИК-излучением листового материала, стержней, труб и других профилей как с присадочным прутком с разделкой кромок, так и без присадочного материала, где ИК-излучатели выполнены с прямоугольными и фигурными нагревательными элементами.

### 10.3. Оборудование для сварки ИК-излучением.

Источник ИК-излучения – самый важный элемент сварочных устройств и установок, которые состоят из кварцевых излучателей, силитовых стержней и никельхромовых сплавов.

Кварцевые излучатели выпускаются в виде трубок, внутри которых находится токопроводящая спираль. В разборных нагревателях нихромовая спираль намотана на кварцевый стержень и вставлена в кварцевую трубку толщиной 2 мм, которая нагревается до 1273-1473К.

В газонаполненных кварцевых лампах источником излучения является вольфрамовая спираль. Температура нагрева нити таких ламп 2373К.

Чаще используются силитовые излучатели. Силит – это керамический материал на основе карбида кремния и глины. Он обладает повышенным электросопротивлением в сочетании с термостойкостью. Силитовые стержни располагаются на расстоянии до 10 мм от свариваемых изделий. Рабочие температуры у них 1573 К, диаметр 6 мм, длина 60 мм,  $U = 24$  В, мощность 260 Вт. Наибольший диаметр нагревателей – 25 мм, мощность 7,5 кВт. Для непрерывной сварки термопластичных пленок толщиной до 2мм ИК-излучением выпускаются универсальные сварочные машины МСП-5М и СПК-М со сменными сварочными головками. Для автоматической сварки пластиковых труб с наружным диаметром до 140 мм применяется установка

УСПТ-ИК-1С, до 320мм – УСПТ-ИК-2С. Для непрерывной стыковой сварки линолеума из ПВХ применяются сварочные устройства типа «Пилад-220».

#### 10.4. Сварка лучом лазера.

При сварке термопласта лучом лазера нагрев соединяемых поверхностей достигается в результате превращения лучевой энергии лазера в тепловую в месте фокусировки луча.

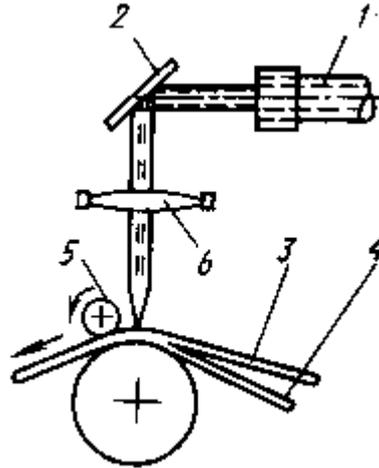


Рис. 10.2. Схема сварки пленки лучом лазера:

1 – лазер; 2 – отклоняющее зеркало; 3,4 - свариваемые пленки, 5 – прижимной ролик; 6 – фокусирующая линза.

Особенность лазерного излучения состоит в его способности создавать в фокусе мощность значительной плотности. Для этого когерентный луч при помощи специальных линз собирается в узкий пучок, достигающий десятых долей миллиметра.

Непрерывно действующий  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью 1 кВт позволяет в фокальном пятне диаметром 0,1 мм получить плотность тепловой мощности около  $3 \text{ мВт/см}^2$ . Применение лазеров для сварки с появлением относительно дешевых молекулярных газовых лазеров, работающих на СО или  $\text{CO}_2$ , имеющих КПД 15-20%. Лазерная сварка наиболее эффективна при соединении тонких полимерных пленок.

Скорость  $v_c$  сварки пленок лучом лазера определяется необходимостью повышения температуры  $\Delta T$  до температуры плавления:

$$v_c = \frac{Q}{\Delta T \rho c_p b \delta},$$

где  $Q$  - поглощаемая пленками лучистая энергия;  $\rho$  – плотность материала,  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $b$  – ширина шва;  $\delta$  – суммарная толщина свариваемых пленок.

$\text{CO}_2$ -лазер широко применяется для резки термопластов, а также для раскроя синтетических тканей и искусственных кож. При этом средняя скорость раскроя составляет 1 м/с и зависит от количества слоев материала, его свойств и мощности луча.

Для сварки полимерных материалов могут быть использованы не только газовые лазеры, генерирующие лучи с длиной волны 10,6 мкм, но и лазеры на рубином кристалле с длиной волн 1,06 мкм.

## Лекция № 11 Качество сварных соединений.

11.1. Дефекты сварных соединений.

11.2. Контроль качества сварных соединений из пластмасс.

### 11.1. Дефекты сварных соединений.

Дефектами сварных соединений называют структурные микро- и макронеоднородности, возникающие в сварном шве вследствие нарушений технологии подготовки свариваемых конструкций, их сборки и сварки.

Основные признаки, характеризующие влияние на прочностные свойства сварного соединения – геометрические размеры дефектов, их форма, положение в сечении сварного шва и массовость.

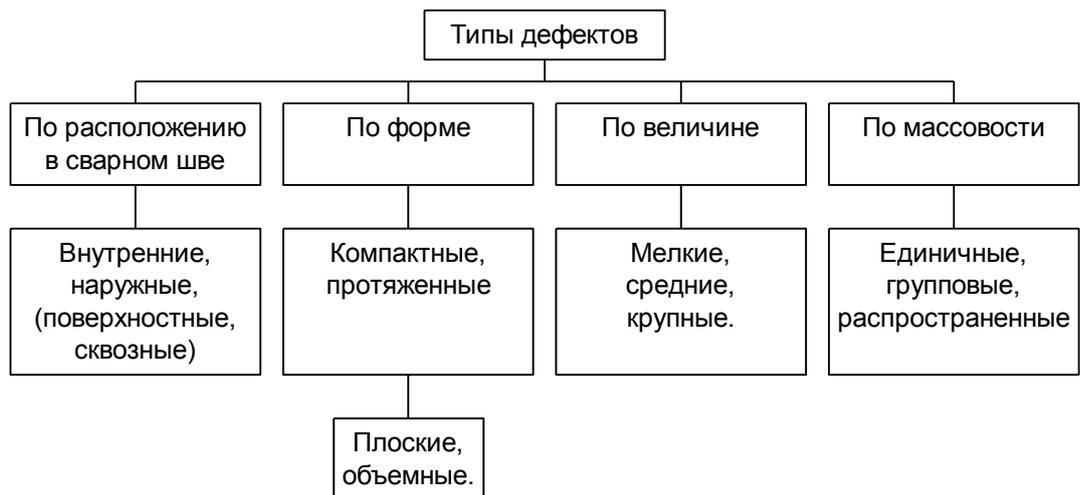


Рис. 11.1. Общая классификация типов сварочных дефектов при сварке пластмасс.

Дефекты, встречающиеся в процессе сварки, можно разделить на следующие группы:

- 1) дефекты заготовок, подготовки и сборки под сварку;
- 2) дефекты формы и отклонения в размерах сварных швов;
- 3) наружные и внутренние дефекты сварных швов и соединений;
- 4) низкие механические свойства сварных соединений;
- 5) деформации и коробление сварных конструкций.

1) Дефекты заготовок, подготовки и сборки под сварку. Для их предотвращения заготовки должны быть сделаны в точном соответствии с чертежом. Характерными дефектами заготовок под сварку являются: 1) неправильный угол скоса кромок; 2) непостоянство угла скоса кромок; 3) вырывы и зарезы кромок; 4) загрязнение кромок.

Характерные дефекты сборки под сварку: 1) слишком большой или слишком малый зазор между кромками собранных под сварку элементов; 2) непостоянство зазора между кромками по длине; 3) несовпадение плоскостей кромок; 4) не предусмотрены обратные деформации собранных элементов.

2) дефекты формы и отклонения в размерах сварных швов образуются вследствие неправильной подготовки под сварку, нарушения установленного температурного режима сварки, несоответствия скорости подачи присадочного материала и скорости сварки, непостоянства давления.

3) При сварке пластмасс наиболее распространены такие наружные и внутренние дефекты сварных швов и соединений, как поры, несплавления, непровары и трещины.

Основная причина образования пор – длительный контакт с воздухом оплавленных поверхностей перед их осадкой. Образование пор возможно и при деструкции полимерного материала в случае резкого превышения оптимальной температуры сварки в сочетании с недостаточным давлением осадки.

Несплавления возникают вследствие неплотного контакта оплавливаемых поверхностей, превышения допустимых зазоров, чрезмерных технологических пауз, недостаточного давления осадки.

Основные причины возникновения непроваров – низкое давление и недостаточная длительность осадки.

Образование трещин связано с неравномерностью и повышенной скоростью охлаждения шва, вызывающих повышенный уровень усадочных напряжений.

4) Ухудшение механических свойств сварного соединения с изменением в структуре полимера при нагреве их на воздухе. Поэтому при сварке применяют газы-теплоносители, которые инертны по отношению к пластмассам, например, азот, углекислый газ, аргон и др.

5) Деформация и коробление сварных конструкций из пластмасс происходят за счет внутренних напряжений в швах и околошовной зоне, возникающих вследствие усадки шва, неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения. В значительной мере способствует этому и тот факт, что для пластмасс характерна относительная малая теплопроводность, большая усадка и значительное расширение при нагреве.

## **11.2. Контроль качества сварных соединений из пластмасс.**

Качество сварных соединений пластмасс определяется степенью соответствия соединений установленным нормативным требованиям, которые характерны для заданных условий их эксплуатации и включают требования к качеству основных и вспомогательных полимерных материалов; к качеству подготовки элементов конструкций для сборки под сварку; к сборке свариваемых элементов конструкций; к качеству сварки элементов конструкции.

В соответствии с этими требованиями различают три стадии контроля:

1) предварительную, включающую контроль основных и вспомогательных материалов, контроль подготовки элементов конструкций для сборки и контроль технологии сборки свариваемых элементов конструкций;

2) текущую, включающую контроль технологических режимов сварки элементов конструкций;

3) заключительную, включающую контроль сварных соединений с применением разрушающих и неразрушающих методов.

Разрушающие методы контроля включают определение механических свойств сварных соединений посредством испытания сварного соединения на одноосное статическое растяжение – ГОСТ 16971-71, ГОСТ 11262-80; сварного соединения на статический изгиб – ГОСТ 4684-71; сварного соединения на ударную вязкость – ГОСТ 4647-80; сварного соединения на морозостойкость – ГОСТ 22346 –77; сварного соединения на хрупкость при изгибе – ГОСТ 16782-83; сварного соединения на ползучесть – ГОСТ 18197-82; сварного соединения на старение под воздействием естественных климатических условий – ГОСТ 17170-71.

Неразрушающие методы контроля сварных соединений пластмасс включают: визуально-оптический, радиационный, ультразвуковой, электроискровой, капиллярный, на герметичность, тепловой, голографический.

Визуальное выявление дефектов заключается во внешнем осмотре и измерениях. Как правило, внешнему осмотру подвергают 100% сварных соединений пластмасс.

Типовые дефекты сварки, выявляемые внешним осмотром и измерением: выходящая за рамки регламентируемых значений высота сварочных валиков; превышение регламентируемого несоответствия свариваемых кромок и деталей; превышение регламентируемого зазора по границе свариваемых поверхностей перед сваркой.

Контроль сварных соединений на герметичность осуществляется одним из следующих способов:

1) Испытание сжатым воздухом с погружением в воду применяется для изделий небольших размеров, имеющих форму замкнутых сосудов и резервуаров. Заключается он в том, что изделие погружают в воду и наполняют сжатым воздухом. В местах нарушения герметичности воздух выходит из изделия и образуются пузырьки.

2) Испытание сжатым воздухом и обмазкой мыльной водой состоит в том, что сварная конструкция заполняется сжатым воздухом, а с внешней стороны сварные швы обмазывают мыльной водой. Дефектные участки выявляются по появлению мыльных пузырьков.

3) Испытание керосином состоит в том, что проверяемый на непроницаемость шов с одной стороны обмазывается водным меловым раствором, после высыхания которого другая сторона шва обильно смачивается керосином. Керосин, обладающий весьма низкой вязкостью и высокой проникающей способностью, проходит через дефектные участки,

выступает на окрашенной мелом поверхности в виде ржавых пятен и полос. Недостатком этого метода испытаний является то, что некоторые материалы набухают в керосине.

4) Испытание сжатым воздухом и аммиаком состоит в том, что на сварные швы испытуемого материала накладывают бумажную ленту, пропитанную 5%-ным водным раствором фенолфталеина. Затем в изделие подается аммиак в количестве 1% от объема воздуха. При наличии сквозных дефектов аммиак проходит через них и вызывает изменение цвета бумаги с белого на фиолетовый.

5) Люминесцентный метод заключается в том, что на одну из сторон наносят слой люминесцентной жидкости (дефектоль, нориоль и др.). По истечению времени, необходимого для проникновения жидкости, обратную сторону посыпают порошком (окиси магния, талька). В местах нарушения герметичности жидкость проходит через дефект и смачивает порошок. После 30-50-минутной выдержки удаляется лишний порошок и поверхность подвергается облучению ультрафиолетовыми лучами в затемненном помещении. В местах нарушения непроницаемости наблюдается свечение порошка, смоченного люминесцирующей жидкостью.

Ультразвуковая дефектоскопия применяется для выявления внутренних дефектов в сварных швах и основном материале. В основу ультразвуковой дефектоскопии положена способность ультразвука отражаться от поверхности раздела двух сред с различной акустической плотностью. Ультразвуковые колебания для целей дефектоскопии получают при помощи пьезоэлектрического эффекта. Для передачи ультразвуковых колебаний используют специальные устройства – щупы или искательные головки.

Ультразвуковой метод контроля сварных соединений пластмасс имеет специфические особенности по сравнению с контролем сварных соединений металлических изделий, определяемые акустическими свойствами полимерных материалов – небольшая скорость распространения ультразвуковых волн, высокий коэффициент затухания. Для ультразвукового контроля сварных соединений в зависимости от вида сваренной конструкции можно использовать следующие методы: теневой (при двустороннем доступе к сварному шву), зеркально-теневой и импульсный эхо-метод (при одностороннем доступе к сварному шву).

Радиографический метод контроля подразделяется на гаммографический и рентгенографический. Гаммографический метод контроля сварных соединений пластмасс не нашел широкого применения. При рентгенографическом методе с целью достижения наибольшей чувствительности следует использовать рентгеновскую аппаратуру, обеспечивающую низкоэнергетическое (мягкое) излучение.

## Лекция № 12

### Склеивание пластмасс и металлов.

- 12.1. Механизм процесса склеивания.
- 12.2. Классификация и основные компоненты клеев.
- 12.3. Подготовка поверхностей к склеиванию.
- 12.4. Технологический процесс склеивания.
- 12.5. Контроль качества клеевых соединений.

#### **12.1. Механизм процесса склеивания.**

В последние годы все более широкое распространение получают клеевые неразъемные соединения элементов конструкций из пластмасс и металлов. В ряде случаев склеивание является единственно возможным способом соединения материалов с точки зрения технологии и требуемой прочности.

Прочность клеевого соединения характеризуется силами адгезии и когезии. Адгезия представляет собой сцепление между частицами самого клея. В зависимости от соотношения сил когезии и адгезии разрыв клеевого соединения может происходить по массе клеящего вещества или по поверхности раздела клей-подложка. Разрыв по поверхности раздела указывает на неудачный выбор клея для данной подложки или же на плохую подготовку ее поверхности. Разрыв по массе клеящего вещества объясняется значительной толщиной клеевого слоя и его недостаточной механической прочностью. Кроме того, на клеящие свойства полимера значительное влияние оказывают величина молекулярного веса, структура молекулы, плотность упаковки и др. факторы.

Адгезию чаще всего определяют эмпирической величиной работы, затрачиваемой для разъединения склеенных поверхностей. Известны следующие теории адгезии клеящего состава: адсорбционная, электрическая, диффузионная и химическая.

Электрическая теория адгезии предполагает наличие двойного электрического слоя, образующегося при контакте двух различных субстратов. Согласно этой теории соединение является конденсатором, различно заряженные пластины которого притягиваются. Если их разделить, то конденсатор заряжается, причем должна наблюдаться электронная эмиссия.

Согласно диффузионной теории, адгезия полимеров происходит вследствие диффузии линейных молекул в склеиваемый материал и образования тем самым прочной связи между клеем и материалом. Отправная точка диффузионной теории - линейное строение высокополимеров и гибкость их молекул, позволяющая им микробрауновское движение. Способность к диффузии характерна только для адгезивов (клеев). Однако в случае нанесения клеящих материалов из растворов сами склеиваемые материалы могут набухать или растворяться под действием растворителя, вследствие чего молекулы основного

материала приобретают значительную подвижность, а отсюда возможна диффузия молекул свариваемого материала в клей.

Адсорбционная теория адгезии рассматривает адгезию как поверхностный процесс воздействия на поверхности раздела клей - склеиваемый материал межмолекулярных сил Ван-дер-Ваальса. Адсорбционные силы отличаются от других видов молекулярного взаимодействия тем, что они происходят на поверхности раздела фаз между разными молекулами. Основой адсорбционной теории адгезии является представление о молекулярном взаимодействии субстрата и клея при условии, что они имеют функциональные группы, способные к взаимодействию. Процесс возникновения адгезионных связей происходит в два этапа: транспортировка молекул клея к поверхности субстрата и межмолекулярные взаимодействия после сближения молекул клея и субстрата на расстояние меньше 0,5 нм.

В соответствии с химической теорией адгезии для получения прочного соединения необходимо, чтобы соединяемые материалы взаимодействовали между собой с образованием химических связей через границу раздела фаз.

## **12.2. Классификация и основные компоненты клеев**

Склеивание производится специальными веществами - клеями, представляющими собой вещества или смеси веществ органического происхождения, которые благодаря сочетанию в них таких свойств как хорошее прилипание, механическая прочность в требуемом интервале температур, отсутствие хрупкости и т.д. пригодны для прочного соединения пластмасс и др. материалов.

К основным компонентам клеев относятся связующие, носитель, катализаторы и отвердители, ингибиторы и замедлители, модифицирующие добавки.

Связующие - это основа клея, свойства которой обуславливают свойства клеевого соединения. Прочность, долговечность, химическая стойкость клеевого соединения зависят от химической структуры, молекулярной массы, степени кристалличности, растворимости клея.

Носителями клея могут быть растворитель, пленка, бумага, различные ткани. В случае жидких клеев растворитель обеспечивает требуемую вязкость, возможность нанесения равномерного слоя.

Катализаторы и отвердители - компоненты, обеспечивающие протекание реакций отверждения, при которой катализаторы остаются без изменения, а отвердители вступают во взаимодействие со связующими и способствуют образованию сетчатой структуры.

Ускорители, ингибиторы и замедлители - вещества, которые контролируют процесс отверждения клея. Ускоритель убыстряет реакцию отверждения под действием катализатора, ингибитор ее тормозит и прекращает, а замедлитель замедляет, тем самым, обеспечивая сохранение готового клея вплоть до момента его использования.

К модифицирующим добавкам относятся наполнители, разбавители, пластификаторы, пигменты, красители, стабилизаторы. Одни модификаторы добавляются для снижения стоимости клеев (разбавители), другие - для повышения стойкости к действию окружающей среды (стабилизаторы), для изменения внешнего вида клея (красители), для снижения хрупкости клеевого соединения (пластификаторы).

Широкое распространение клеевых соединений в различных отраслях техники привело к созданию большого количества марок клея и необходимости их классификации:

а) по химической природе основных компонентов клеев их можно разделить на природные и синтетические.

Синтетические клеи подразделяются в основном на две группы:

- 1) клеи, изготовленные из термопластических полимеров;
- 2) клеи, изготовленные из термореактивных полимеров, при изготовлении или перед употреблением которых вводят отвердитель.

Основа клея	Природные клеи	Синтетические клеи	
		Термопластичные	Термореактивные
Клеи	Органические: кровяной альбумин, коллаген из кожи и костей, казеин, крахмал, декстрин, асфальт, канифоль, каучук. Неорганические: жидкое стекло, гипс, цемент.	На основе ПВА и его дисперсии, акрилатов, поливи- нилбутираля, производных нитрата целлюлозы, полистирола, полисульфонов, цианокрилатов	Фенольные, карбамидные, резорциновые, эпоксидные, меламиновые, алкидные, полиэфирные, изоцианатные, полиамидные
Физическое состояние и вид	Жидкости, пасты, порошки	Жидкости, пленки, гранулят	Жидкости, порошки, пленки
Основная характеристика	Широкий интервал прочности, относительно хорошая теплостойкость, ограниченная водостойкость	Хорошая прочность, склонность к ползучести, низкая химическая стойкость, хорошая водостойкость, теплостойкость до 85 °С	Высокая прочность, отличная водостой- кость и химическая стойкость, хорошая теплостойкость, часто образуется хрупкий шов
Применение	Бумажная промышленность, делопроизводство, использование в быту	Игрушки, тара, приборы, автомобильная промышленность, машиностроение	Сложные строительные и химически стойкие конструкции, самолетостроение.
Типичные субстраты	Древесина, бумага, пробка, кожа, керамика	Пластики, металлы, древесина, стекло и их комбинации	Металлы, древесина, стекло, пластики, кожа

б) в зависимости от способности выдерживать тепловые нагрузки:

- клеи, выдерживающие длительное воздействие температур порядка 60-80<sup>0</sup>С

- теплостойкие клеи, выдерживающие длительное или кратковременное воздействие температур порядка 160-350<sup>0</sup>С

- высокотеплостойкие клеи, выдерживающие кратковременное воздействие температур до 1000<sup>0</sup>С

в) в зависимости от температуры склеивания клеи можно разделить на 2 группы:

- клеи, склеивание которыми можно производить без подогрева, т.к. при введении специальных отвердителей и катализаторов, химические реакции протекают быстро.

- клеи, которыми можно склеивать, подогревая соединения до 150-250<sup>0</sup>С

г) в зависимости от агрегатного состояния клеев в процессе их нанесения на материал клеи можно разбить на 4 группы:

- жидкие;

- пастообразные;

- пленочные;

- твердые и порошкообразные, наносимые только на предварительно подогретые поверхности соединяемых деталей.

Жидкие и пастообразные клеи делятся на:

- 1) клеи, остающиеся жидкими и хорошо текучими в начале прессования;

- 2) клеи, подвергающиеся с целью удаления растворителя при предварительной сушке до получения твердого клеевого слоя и размягчающиеся при подогреве в процессе склеивания до состояния большей или меньшей текучести.

### **12.3. Подготовка поверхностей к склеиванию.**

Прочность клеевого соединения, помимо правильного выбора типа клея, зависит от соответствующей подготовки поверхности. Подготовка поверхности к склеиванию предусматривает тщательную подгонку склеиваемых деталей друг к другу, очистку от масла, жиров и других загрязнений. Это необходимо для получения тонкой равномерной по толщине клеевой прослойки без разрывов. Адгезия клеев с пластмассами, металлами и др. материалами есть результат сложных физико-химических процессов, происходящих при взаимодействии клея со склеиваемыми поверхностями, что может быть только при хорошем контакте между ними, т.е., когда поверхности совершенно чистые. При склеивании материалов рекомендуемая чистота поверхности должна соответствовать шестому или восьмому классу.

В основном применяются три способа подготовки поверхности изделий:

- 1) химический;

- 2) физический;

### 3) механический.

Химический способ заключается в обработке поверхностей пластмасс или металлов растворами специального состава или растворителями. Для обезжиривания рекомендуется применять бензин или ацетон. Очень эффективно омывание металлических заготовок горячими парами растворителей.

В ряде случаев для получения прочных клеевых соединений обезжиривание металлов недостаточно. Помимо обезжиривания, поверхности подвергаются травлению в водных растворах серной кислоты при температуре 60-70<sup>0</sup>С, в растворе хромового ангидрида при той же температуре, в водном растворе фосфорной кислоты, а также в смесях минеральных кислот и их солей.

Физический способ подготовки поверхности предусматривает создание спец. промежуточных слоев на деталях, подлежащих склеиванию, которые имеют повышенное сцепление с поверхностью материала и к которым клеи имеют более высокую адгезию. Такие слои, как анодное, оксидное покрытие увеличивают коррозионную стойкость металла.

При механическом способе подготовки увеличивается площадь склеивания, способность материалов к адгезии. Это достигается пескоструйной, дробеструйной или механической обработкой, а также протиранием наждачной бумагой или шкуркой.

## 12.4. Технологический процесс склеивания.

Технологический процесс склеивания состоит из следующих операций:

- 1) выбор клеевого соединения, зависящий от назначения детали, условий ее работы, вида нагрузки на шов и т.д.
- 2) подготовка поверхности под склеивание;
- 3) тщательная подгонка обработанных поверхностей друг к другу;
- 4) нанесение тонкого равномерного слоя клея на обе склеиваемые поверхности, производимое с помощью кисти, шпателя или пульверизатора;
- 5) открытая выдержка на воздухе поверхностей с нанесенным клеем, чтобы удалить растворители из нанесенного слоя клея, т.к. при прессовании с подогревом они вызывают вспенивание клея и образование клеевой прослойки с пористой структурой;
- 6) сборка склеиваемых деталей и выдержка под прессом;
- 7) выдержка после соединения склеиваемых поверхностей в течение определенного времени в зависимости от вида клея;
- 8) термообработка клеевых соединений с целью полного отверждения клеевого слоя;
- 9) испытание клеевого соединения.

## 12.5. Контроль качества клеевых соединений.

Все дефекты клеевых соединений получаются в результате несоблюдения технологического процесса склеивания. Различают следующие дефекты клеевых соединений:

1) Слабое сцепление. Этот дефект является скрытым и поэтому наиболее опасным, т.к. снижает прочность соединения. Он получается в результате:

а) склеивания замасленных или загрязненных поверхностей, снижающих адгезию;

б) применения некачественного клея;

в) несоблюдения технологических режимов склеивания;

2) Местные непрочности. Эти дефекты встречаются при склеивании изделий сложной конфигурации и возникают вследствие:

а) плохой пригонки склеиваемых поверхностей;

б) недостаточного давления при склеивании;

в) высокой вязкости клея;

г) нанесения слишком толстого слоя клея.

3) Пористая клеевая прослойка. Этот вид дефекта дает значительное снижение прочности при сдвиге. Он возникает в результате:

а) большого количества растворителя в клеевой прослойке, вызывающего вспенивание клея;

б) недостаточного давления при склеивании;

в) плохой пригонки соединяемых поверхностей.

4) Расслаивание и трещины. Эти дефекты чаще всего наблюдаются в клеевых соединениях, как в результате больших внутренних напряжений, возникающих вследствие высокого давления, так и при слабом сцеплении.

5) Голодное клеевое соединение получается при чрезмерно высоком давлении или нанесении слишком тонкого слоя клея.

## ЛИТЕРАТУРА

по дисциплине «ПАЙКА МЕТАЛЛОВ»

1. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

2. Петрунин И.Е., Лоцманов С.И., Николаев Г.А. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.

по дисциплине «СВАРКА ПЛАСТМАСС И СКЛЕИВАНИЕ»

1. Гальчинский Л. В., Осмак М.И. Сварка, склеивание и напыление пластмасс. Львов: Издательство Львовского Университета, 1968. 284с.

2. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. Сварка пластмасс. М.:Машиностроение, 1978. 224с.

3. Сварка полимерных материалов: Справочник/ К.И. Зайцев, Л.Н. Мацюк, А.В. Богдашевский и др.; Под общ. ред. К.И. Зайцева, Л.Н. Мацюк. М.: Машиностроение, 1988. 312с.

## Оглавление

«Пайка металлов»	3
Введение.....	4
Лекция 1. Пайка металлов.....	6
Лекция 2. Способы пайки.....	10
Лекция 3. Процессы удаления окисной пленки при пайке.....	15
Лекция 4. Процессы образования паяного шва.....	19
Лекция 5. Физико-химические процессы образования паяного шва....	24
Лекция 6. Конструирование и расчет паяных соединений.....	27
Лекция 7. Технология пайки различных материалов.....	32
Лекция 8. Контроль паяных соединений.....	37
Лекция 9. Организация паяльных работ.....	41
Лекция 10. Техника безопасности при производстве паянных работ....	45
«Сварка пластмасс и склеивание»	47
Введение.....	48
Лекция 1. Общие сведения о пластмассах.....	50
Лекция 2. Общие сведения о пластмассах.....	55
Лекция 3. Общие сведения о сварке пластмасс.....	60
Лекция 4. Сварка газовым теплоносителем.....	65
Лекция 5. Сварка экструдированной присадкой (расплавом).....	69
Лекция 6. Контактная тепловая сварка.....	73
Лекция 7. Сварка в электрическом поле высокой частоты.....	78
Лекция 8. Ультразвуковая сварка.....	82
Лекция 9. Сварка трением.....	87
Лекция 10. Сварка излучением.....	91
Лекция 11. Качество сварных соединений.....	95
Лекция 12. Склеивание пластмасс и металлов.....	99
Литература.....	106