

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения

И.В. Краснопевцева

# ПАЙКА МАТЕРИАЛОВ

Электронное учебное пособие



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2022

ISBN 978-5-8259-1052-9

УДК 621.791.3(075.8)

ББК 34.643я73

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Сервис технических и технологических систем» Поволжского государственного университета сервиса *Б.М. Горшков*;

д-р техн. наук, доцент, профессор, зав. кафедрой «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета *В.В. Ельцов*.

Краснопевцева, И.В. Пайка материалов : электронное учебное пособие / И.В. Краснопевцева. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2022. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1052-9.

В пособии изложены основные вопросы пайки различных металлов и их сплавов, металлов с неметаллическими материалами и неметаллических материалов между собой.

Рассмотрены возможности применения различных способов нагрева при пайке металлических и неметаллических материалов, даны рекомендации по подбору технологических и вспомогательных материалов, режимов пайки и необходимого оборудования для изготовления паяных изделий.

Пособие может быть использовано как для проведения аудиторных занятий, так и для самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение» очной и заочной форм обучения. Пособие также может быть полезно для обучающихся в магистратуре по направлениям 15.04.01 «Машиностроение» и 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2022



Редактор *Е.А. Держаева*  
Технический редактор *Н.П. Крюкова*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *Г.В. Карасева*

Дата подписания к использованию 01.02.2022.

Объем издания 1,2 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-33-21.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,  
тел. 8 (8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Раздел 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАЙКИ МАТЕРИАЛОВ .....	9
1.1. Физико-химические особенности технологического процесса пайки .....	9
1.2. Классификация способов пайки .....	15
1.3. Технологические и вспомогательные материалы для пайки .....	21
1.4. Подготовка поверхности деталей к пайке .....	28
1.5. Сборка деталей под пайку .....	34
Выводы .....	41
Раздел 2. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	43
2.1. Пайка сталей и чугуна .....	43
2.2. Пайка меди и ее сплавов .....	52
2.3. Пайка никеля и его сплавов .....	60
2.4. Пайка алюминия и его сплавов .....	64
2.5. Пайка титана и его сплавов .....	72
2.6. Пайка драгоценных металлов .....	77
Выводы .....	89
Раздел 3. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ .....	90
3.1. Пайка металлов с керамикой .....	90
3.2. Пайка металлов со стеклом и кварцем .....	101
3.3. Пайка металлов с графитом .....	107
Выводы .....	115
Раздел 4. ПАЙКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....	117
4.1. Пайка графита .....	117
4.2. Пайка керамики .....	120
4.3. Пайка полупроводников .....	123
Выводы .....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	129
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	132
ГЛОССАРИЙ .....	136

## ВВЕДЕНИЕ

Пайка является одним из наиболее древних и надежных методов соединения металлических и неметаллических материалов. Известно, что еще около пяти тысяч лет назад человек уже владел приемами пайки. На территории многих стран археологами найдены паяные изделия (трубопроводы, оружие, предметы домашнего обихода, ювелирные изделия), относящиеся к древним культурам.

Многовековая история развития пайки демонстрирует ее высокую значимость в решении многих проблем соединения материалов при производстве различных изделий. В настоящее время пайка интенсивно развивается как наука, поэтому ее технические возможности имеют весьма широкие границы.

Технологии пайки находят широкое применение в различных отраслях промышленности как для соединения мельчайших деталей, например, в электронных приборах, так и для создания узлов крупногабаритной техники в самолето- и ракетостроении, энергетике и других отраслях. Уникальность пайки заключается в том, что она позволяет соединять между собой разнообразные металлы и сплавы, металлы с неметаллами и неметаллы между собой.

Пайка является единственным методом получения надежного соединения между материалами, которые обладают малой пластичностью или не могут быть нагреты до высокой температуры. К таким материалам относятся полупроводниковые кристаллы, керамика, стекло, сочетания металлов, образующих при нагреве интерметаллические соединения.

Преимущества пайки как технологического процесса обусловлены тем, что формирование неразъемного соединения осуществляется при температурах ниже температуры автономного плавления соединяемых материалов. Поэтому общий нагрев паяемого узла или всего изделия производится до температуры пайки (температуры плавления припоя), что позволяет:

- получать качественные соединения в скрытых и малодоступных местах конструкций;
- изготавливать сложные по конфигурации конструкции за один производственный цикл;

- сокращать металлоемкость паяных конструкций;
- повышать коэффициент использования материала;
- наиболее полно использовать физико-химические и механические свойства соединяемых материалов.

Данные преимущества приобретают особое значение в условиях постоянного роста цен на конструкционные и технологические материалы.

Большим преимуществом процесса пайки является отсутствие или существенно более низкий уровень, чем при сварке плавлением, термических деформаций в соединяемых деталях, что позволяет получать изделия без нарушения их форм и габаритных размеров. Кроме того, процесс пайки изделий можно механизировать и автоматизировать. Механизация и автоматизация процесса позволяет соединять в единое целое множество заготовок, составляющих изделие, за один производственный цикл. Поэтому пайка как технологический процесс полностью отвечает условиям массового производства.

Также технология пайки позволяет соединять детали не по контуру, а одновременно по всей поверхности, что обеспечивает как высокую прочность соединения, так и высокую производительность труда.

Еще одним преимуществом пайки является возможность разъединения узлов путем их распайки ниже температуры автономного плавления паяемого материала в целях проведения ремонта изделия или его утилизации по частям.

Повышение в нашей стране интереса к пайке как к промышленной технологии произошло в годы освоения массового производства различных изделий, ответственные узлы которых соединялись механизированными способами пайки.

Дальнейшее развитие промышленного производства привело к необходимости применения в конструкциях различных машин и приборов новых металлов и сплавов:

- высокоактивных, таких как титан и цирконий;
- легких, таких как алюминий, бериллий, магний;
- тугоплавких (вольфрам, молибден, ниобий);

- жаропрочных, к которым относятся никелевые, кобальтовые, железные сплавы;
- драгоценных металлов (золото, серебро, платина);
- композиционных материалов;
- неметаллических материалов – керамик, графита, полупроводников, стекла.

Соединение методом пайки таких материалов в самых различных сочетаниях обеспечивает прочностные, коррозионные, электрические и другие характеристики, гарантирующие надежность, долговечность и ремонтпригодность паяного изделия в условиях эксплуатации.

С развитием в стране ракетостроения, атомной техники и радиоэлектроники технологии пайки получили особенно широкое применение, в результате чего многие современные конструкции удалось сделать более технологичными и значительно улучшить их эксплуатационные характеристики.

В настоящее время невозможно представить себе какую-либо отрасль производства, где в той или иной степени не применялись бы технологии пайки.

Пайка является перспективным технологическим процессом, значение которого со временем будет всё более и более возрастать в связи с применением в народном хозяйстве для производства различных конструкций легированных сталей, специальных сплавов, неметаллических и композиционных материалов.

Дальнейшее развитие пайки предполагается как по линии разработки новых технологических процессов, новых припоев, флюсов, газовых сред, способов нагрева, средств механизации и автоматизации, так и по линии выявления еще не известных возможностей этого уникального технологического процесса.

Целью данного учебного пособия является формирование у студентов теоретических знаний, необходимых для решения производственных вопросов в области реализации технологий пайки при изготовлении продукции на промышленных предприятиях различных сфер деятельности.

Поставленная цель может быть достигнута решением следующих задач:

- ознакомление студентов с основными аспектами теоретических основ пайки материалов;
- изучение технологий пайки различных металлов и их сплавов;
- изучение особенностей пайки металлов с неметаллическими материалами;
- ознакомление с возможностями выполнения пайки неметаллических материалов.

Наличие в учебном пособии контрольных вопросов по каждой изученной теме позволит студентам закрепить пройденный материал для его успешного использования при подготовке к практическим занятиям, для сдачи зачетов и экзаменов.

Материал, изложенный в учебном пособии, поможет будущим руководителям структурных подразделений промышленных предприятий организовывать производство паяных конструкций в цехах и на производственных участках, грамотно использовать на практике полученные теоретические знания в различных производственных ситуациях.



# Раздел 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАЙКИ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1. Физико-химические особенности технологического процесса пайки

Пайкой называется технологический процесс соединения материалов в твердом состоянии путем введения в зазор легкоплавкого металла (припоя), взаимодействующего с основными материалами и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию монолитного (паяного) соединения.

ГОСТ 17325–79 дает следующее определение данному технологическому процессу: «пайкой называется образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации».

Из данного определения следует, что:

- 1) процесс пайки осуществляется при более низких температурах, чем температуры плавления соединяемых материалов. При этом уменьшается вероятность их перегрева;
- 2) пайкой возможно соединение как металлических, так и неметаллических материалов;
- 3) в зоне контакта образуется промежуточный слой, который состоит из припоя и продуктов его взаимодействия с паяемыми материалами.

Ни один технологический процесс, кроме пайки, не содержит в себе такого количества физико-химических явлений, которые могут протекать в твердой, жидкой и газообразной фазе. Это:

- процессы восстановления и диссоциации;
- испарения;
- смачивания и капиллярного течения;
- диффузии и растворения;
- пластифицирования и адсорбционного понижения прочности.

Наибольшее влияние на протекание физико-химических процессов при пайке оказывает режим пайки, который представляет

собой совокупность параметров и условий пайки. К параметрам пайки относятся такие показатели, как:

- температура пайки;
- время выдержки при температуре пайки;
- скорость нагрева;
- скорость охлаждения.

К условиям пайки относятся:

- применяемые припой и флюсы;
- используемая газовая среда;
- необходимость приложения давления и др.

Для получения спая, то есть связи на границе «основной металл – припой», наряду с нагревом необходимо обеспечить еще два основных условия:

- 1) удалить с поверхности металлов окисную пленку;
- 2) обеспечить условия взаимодействия твердого и жидкого металлов.

Возможность образования спая между паяемым материалом и припоем называется *паяемостью*, то есть способностью основного материала вступать в физико-химическое взаимодействие с расплавленным припоем и образовывать паяное соединение.

Для того чтобы образовалось качественное паяное соединение, необходимо:

- 1) обеспечить подготовку поверхностей соединяемых деталей;
- 2) активировать припой и паяемые материалы;
- 3) удалить окисные пленки в зоне контакта;
- 4) обеспечить взаимодействие припоя и паяемых материалов на межфазной границе раздела;
- 5) создать условия для кристаллизации жидкой металлической прослойки.

Технологический процесс пайки состоит из ряда операций, выполняемых в определенном порядке:

- 1) подготовка поверхности паяемого материала и припоя;
- 2) сборка;
- 3) собственно пайка;
- 4) обработка паяного изделия после пайки;
- 5) контроль качества паяного шва.

Определяющей при этом является операция пайки. Технологические операции, осуществляемые до и после пайки, определяются выбранной технологией и конструкцией паяемого изделия, зависят от состава и свойств применяемых материалов.

Подготовительные операции обеспечивают успешность проведения технологического процесса пайки. Заключительные операции направлены на обеспечение требуемых геометрических, механических и коррозионных характеристик паяного соединения.

Однако в некоторых случаях пайка может являться заключительной операцией, не требующей никаких последующих, кроме контроля качества и испытаний паяного шва.

Пайка выполняется при температурах, превышающих температуру плавления припоя на 50–100 °С.

В зависимости от температуры плавления применяемых припоев пайка делится на низкотемпературную и высокотемпературную.

При низкотемпературной пайке нагрев в месте контакта паяемых материалов и припоя не должен превышать 450 °С.

При высокотемпературной пайке – должен быть выше 450 °С.

Целесообразность такого деления обусловлена тем, что технологические, вспомогательные материалы и оснащение для низкотемпературной и высокотемпературной пайки существенно отличаются друг от друга.

Качество изделия, выполненного пайкой, зависит не только от свойств основного (конструкционного) материала и применяемых технологических и вспомогательных материалов (припоя, флюса, газовой среды), но и от того, как будут меняться свойства паяемого материала под действием нагрева. Ухудшение при пайке механических и коррозионных свойств конструкционных материалов связано прежде всего с происходящими при нагреве структурными изменениями. К ним относятся:

- снятие эффекта термической обработки металла;
- рост зерна;
- изменение состояния сплава по границам зерен;
- старение или отпуск;
- пережог.

Однако пайку можно совместить с термической или химико-термической обработкой и тем самым улучшить эксплуатационные свойства соединения.

Для получения прочных и бездефектных паяных соединений, работоспособных в условиях продолжительной эксплуатации, следует учитывать физико-химические, технологические, конструкционные и эксплуатационные факторы, имеющие место при пайке.

К *физико-химическим* факторам относятся:

- физико-химические характеристики паяемого металла и припоя;
- характер физико-химического взаимодействия припоя и паяемого металла на границе раздела фаз;
- влияние флюсов и атмосферы пайки на припой и паяемые материалы;
- условия и характер кристаллизации при пайке.

К *конструкционным* факторам относятся:

- типы и параметры паяного соединения;
- расположение паяных соединений в изделии.

Основными *технологическими* факторами являются:

- качество подготовки поверхности деталей к пайке;
- способ и режим нагрева;
- обработка паяного шва после пайки.

К *эксплуатационным* факторам относятся условия эксплуатации изделий и характер нагрузок, которые испытывают паяные соединения.

Разъем паяного соединения без изменения внешнего вида и механических свойств основного материала, аналогичный разьему болтовых и других видов разъемных соединений (к примеру, развинчиванию), невозможен. Однако в отличие от других видов неразъемных соединений, при пайке возможна распайка изделия, то есть разъединение по шву в результате нагрева выше температуры его солидуса. После распайки возможна повторная пайка в целях замены изношенных деталей. Поэтому температура распайки относится к числу важных характеристик паяного соединения. Следует помнить, что температура распайки обычно выше температуры пайки.

Большое значение при пайке имеет совместимость припоя с паяемым металлом, определяемая прежде всего характером физи-

ко-химического взаимодействия между ними. Степень такого взаимодействия можно оценить по диаграммам состояния между основной паяемого материала и основной припоя.

Характер физико-химического взаимодействия между паяемым металлом и припоем зависит от их химической связи. *Отсутствие химической связи между паяемым металлом и припоем не позволяет образовывать между ними сплавы ни в твердом, ни в жидком состоянии.*

Основными характеристиками совместимости паяемого металла и припоя при пайке являются:

- смачиваемость паяемого металла припоем;
- растекаемость припоя по поверхности паяемого металла;
- заполняемость зазора припоем;
- химическая эрозия паяемого металла;
- образование прослоек химических соединений на границе «металл – припой»;
- развитие пористости в паяном шве;
- охрупчивающее действие жидкого припоя на паяемый металл;
- температура распайки шва.

При отсутствии физико-химического взаимодействия между паяемым металлом и припоем процессы смачивания, растекания и затекания припоя в зазор имеют *адгезионный* характер (то есть характер прилипания). В таком случае металл припоя является по отношению к паяемому металлу не припоем, а металлическим клеем, при этом механические свойства паяного шва определяются только механическими свойствами припоя и сцеплением его с паяемым металлом по контактной границе. Во всех других случаях происходит переход атомов основного металла в припой, а атомов припоя – в основной металл, за счет чего прочность соединения существенно возрастает.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой технологический процесс соединения материалов называется пайкой?
2. Какое определение дает ГОСТ 17325–79 технологическому процессу пайки?

3. В чем заключаются особенности нагрева паяемых деталей при пайке?
4. Какие материалы могут соединяться посредством технологического процесса пайки?
5. Какие физико-химические явления протекают при пайке (в твердой, жидкой и газовой фазах)?
6. Что оказывает наибольшее влияние на протекание физико-химических процессов при пайке?
7. Какие показатели относятся к параметрам пайки?
8. Какие показатели относятся к условиям пайки?
9. Какие два основных условия наряду с нагревом необходимо обеспечить на границе «основной металл – припой» для получения качественного соединения?
10. Что означает термин «паяемость»?
11. Какова последовательность операций технологического процесса пайки изделия?
12. Чем определяются технологические операции, осуществляемые до и после пайки?
13. Какие факторы, имеющие место при пайке, относятся к физико-химическим факторам?
14. Какие факторы, имеющие место при пайке, относятся к конструкционным факторам?
15. Какие факторы, имеющие место при пайке, относятся к технологическим факторам?
16. Возможен ли разъем паяного соединения без изменения внешнего вида и механических свойств основного материала?
17. Что такое распайка изделия?
18. Какой должна быть температура распайки?
19. Что происходит при отсутствии химической связи между паяемым металлом и припоем?
20. Что относится к основным характеристикам совместимости паяемого металла и припоя при пайке?

## 1.2. Классификация способов пайки

Согласно ГОСТ 17349–79 все способы пайки объединяют в группы по следующим классификационным признакам:

- 1) удалению окисной пленки;
- 2) получению припоя;
- 3) заполнению зазора припоем;
- 4) кристаллизации паяного шва;
- 5) источнику нагрева;
- 6) наличию давления на паяемые детали;
- 7) одновременности выполнения паяных соединений.

**1. Способы пайки по удалению окисной пленки.** Для создания физического контакта между основным металлом и жидким припоем необходимо удаление с поверхности металла окисных пленок.

Удаление окисных пленок может осуществляться с использованием паяльных флюсов, ультразвука, применением газовой среды или вакуума (рис. 1). В связи с этим все способы пайки подразделяется на флюсовую пайку и бесфлюсовую пайку.

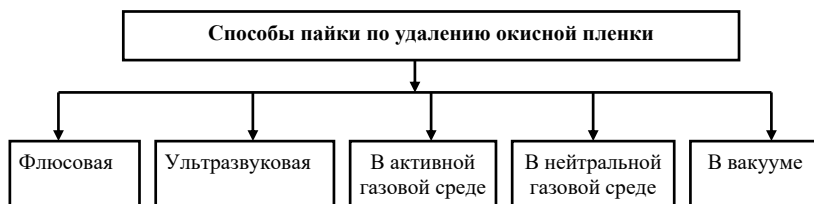


Рис. 1. Классификация способов пайки по удалению окисной пленки

Флюсы для выполнения *флюсовой пайки* могут быть твердыми (порошкообразные смеси различных солей), жидкими (водные растворы хлористых солей или спиртовые растворы органических соединений), а также газообразными.

Для удаления окисных пленок с поверхности некоторых металлов (например, алюминия) используется их *ультразвуковое разрушение*. Природа данного процесса состоит в том, что упругие механические колебания ультразвука при прохождении через расплавленный припой вызывают *кавитацию* — образование пузырьков газа в жидкости, при схлопывании которых возникает большое

давление. Процесс кавитации и приводит к разрушению окисных пленок на поверхности металла.

При пайке в *активной газовой среде* в качестве восстановительной газовой среды применяется водород или его заменители: оксид углерода, азотно-водородная смесь.

При пайке в *нейтральной газовой среде* в качестве нейтральных газовых сред используются аргон, гелий, азот. Инертные газы предохраняют паяемый металл и припой от окисления в процессе пайки.

При пайке в *вакууме* используется разреженный газ при давлении ниже  $10^5$  Па. В вакууме обычно паяют медь, никель, вольфрам, титановые сплавы, высоколегированные и жаропрочные стали.

**2. Способы пайки по получению припоя.** Осуществление пайки невозможно без наличия припоя, его физического контакта с паяемым металлом и физико-химического взаимодействия между ними при заполнении зазора. Способы пайки по получению припоя показаны на рис. 2.



Рис. 2. Классификация способов пайки по получению припоя

При пайке *готовым полностью расплавляемым припоем* используется заранее изготовленный припой. Этот способ пайки очень распространен в промышленности. Заранее изготовленный припой поставляется централизованно или выплавляется в условиях производства по мере надобности. Припой изготавливается в виде прутков, проволоки, ленты, пасты, трубок, наполненных флюсом, и т. д.

При пайке *композиционным припоем* используется припой, содержащий в своем объеме наполнитель. В качестве наполнителя применяется материал, образующий в паяльном зазоре систему капилляров, или материал, необходимый для обеспечения специальных свойств паяного соединения.



*Контактно-реактивная* пайка основана на способности некоторых металлов образовывать в месте контакта сплавы (эвтектики или твердые растворы), температура плавления которых ниже температуры плавления любого из соединяемых металлов. Если соединяемые металлы не образуют между собой сплавы подобного типа, применяется промежуточная прослойка или покрытие, которое наносят на соединяемые поверхности напылением, гальваническим или каким-либо другим способом.

При контактно-реактивной пайке детали сдавливаются, что создает лучший физический контакт между ними и способствует выдавливанию из места спая избытка жидкой фазы с частицами окислов, что повышает прочность паяного соединения.

При *реактивно-флюсовой* пайке припой образуется в результате разложения компонентов флюса. Типичным примером такой пайки является пайка алюминия флюсом, содержащим хлорид цинка, основанная на способности алюминия вытеснить цинк из расплавленной соли при 400 °С.

Образовавшийся при этом цинк и является припоем, соединяющим детали из алюминия. Однако в ряде случаев металл, являющийся продуктом взаимодействия основного металла с флюсом, не является припоем. Он только покрывает поверхность в месте пайки и улучшает ее смачиваемость дополнительным припоем, вводимым в зазор. Так, например, с помощью флюса AgCl можно осуществить реактивно-флюсовое лужение (покрытие) титана серебром.

**3. Способы пайки по заполнению зазора припоем** делятся на капиллярную и некапиллярную пайку.

При капиллярной пайке ширина зазора должна быть меньше, чем 0,5 мм, при некапиллярной пайке – больше, чем 0,5 мм.

Пайка, при которой расплавленный припой заполняет паяльный зазор и удерживается в нем преимущественно поверхностным натяжением, называется *капиллярной* пайкой. Капиллярные явления присущи почти всем способам пайки. Однако они наиболее выражены тогда, когда между паяемыми деталями имеется перекрытие – нахлестка и при сборке обеспечивается паяльный зазор.

*Некапиллярная пайка* – это пайка, при которой расплавленный припой заполняет зазор преимущественно под действием своей массы или прилагаемой извне силы.

К некапиллярной пайке относятся:

1) *пайкосварка*, при которой соединяемым кромкам заготовок придается форма, подобная разделке кромок при сварке плавлением. Соединение деталей осуществляется приемами, характерными для сварки, только в качестве присадочного металла используется припой;

2) *сваркопайка* – это пайка разнородных материалов, при которой более легкоплавкий материал, нагреваясь до температуры, превышающей температуру его плавления, выполняет роль припоя. Примером сваркопайки может служить соединение стального наколенника с медным проводом в результате оплавления последнего.

**4. Способы пайки по кристаллизации паяного шва** делятся на пайку с кристаллизацией при охлаждении и пайку с кристаллизацией при выдержке, так называемую диффузионную пайку. В случае диффузионной пайки образование паяного соединения происходит одновременно с изотермической обработкой, которая обеспечивает процесс диффузии. Это позволяет целенаправленно изменять свойства паяного соединения посредством кристаллизации металла шва при температуре пайки.

Медленное охлаждение шва способствует образованию более равновесной структуры металла, что повышает прочность и пластичность паяного соединения. Поэтому диффузионная пайка имеет определенные преимущества перед пайкой с кристаллизацией при охлаждении: она обеспечивает более однородный состав паяного шва, позволяет повышать его прочность и пластичность благодаря предотвращению образования интерметаллидных прослоек или растворению их в основном металле.

**5. Способы пайки по источнику нагрева.** Источник нагрева при пайке выбирается исходя из габаритов изделия, его конструктивных особенностей, материала, а также условий производства и объемов выпускаемой продукции.

ГОСТ 17349–79 дает следующую классификацию способов пайки с использованием различных *источников нагрева* (рис. 3).

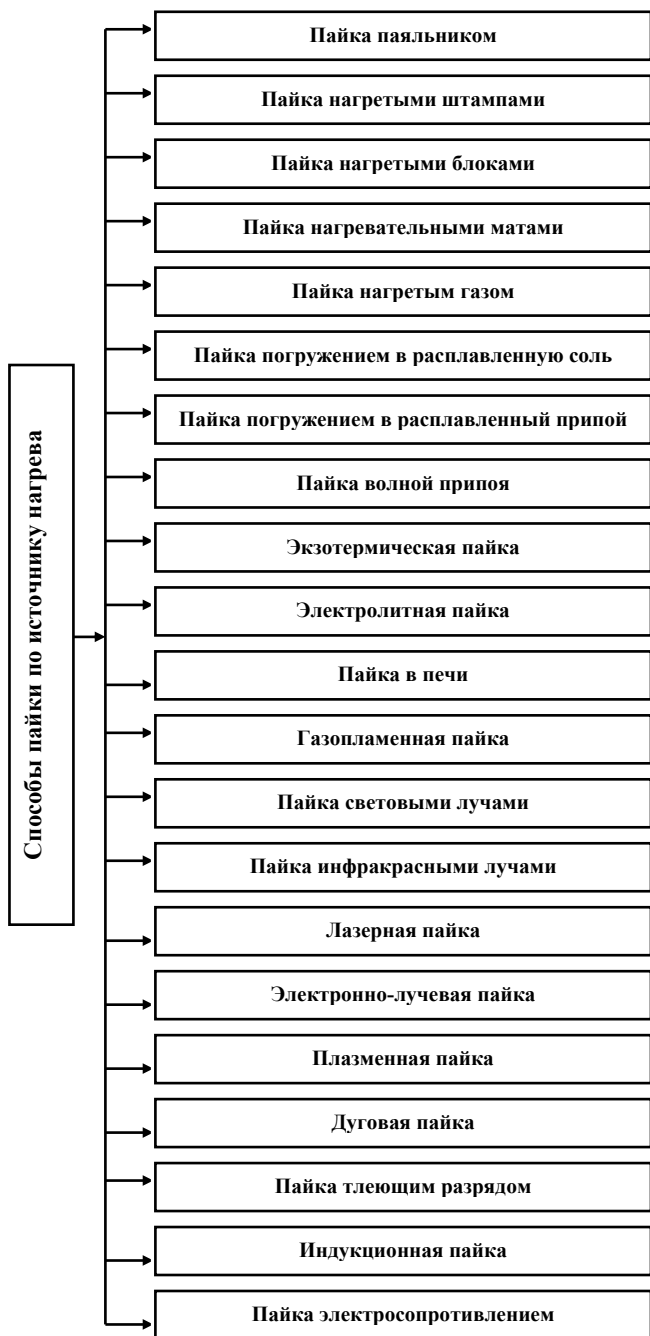


Рис. 3. Классификация способов пайки по источнику нагрева

В настоящее время наиболее широко в промышленном производстве применяются такие способы пайки, как пайка паяльником, пайка в печи, газопламенная и индукционная пайка, пайка электросопротивлением. Но всё реже используются различные виды пайки погружением ввиду их большой энергоёмкости и токсичности.

С дальнейшим развитием производственных технологий развиваются и всё больше внедряются в производство дуговая, плазменная и лазерная пайка, особенно в автомобилестроении.

В условиях мелкосерийного производства при низкотемпературной пайке используются широко электронно-лучевая пайка, пайка инфракрасными и световыми лучами.

**6. Способы пайки по наличию давления на паяемые детали** подразделяются на пайку без давления на паяемые детали и пайку под давлением (прессовую пайку). Создание давления на паяемые детали необходимо для обеспечения заданной величины паяльного зазора.

**7. Способы пайки по одновременности выполнения паяных соединений** делятся на пайку одновременную и неодновременную (ступенчатую). В первом случае одновременно может выполняться пайка нескольких изделий, например при контейнерной пайке в печи. Во втором случае изделия паяются по одному последовательно.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие две группы делятся все способы пайки по удалению окисной пленки?
2. Какими по агрегатному состоянию могут быть флюсы для выполнения флюсовой пайки?
3. Перечислите существующие способы пайки по удалению окисной пленки.
4. Для удаления окисных пленок с поверхностей каких металлов используется ультразвук?
5. Что такое кавитация?
6. Какие газы применяются для пайки в активной газовой среде?
7. Какие газы применяются для пайки в нейтральной газовой среде?
8. Какие существуют способы пайки по получению припоя?
9. Что такое композиционный припой?

10. На какой способности некоторых металлов основана контактно-реактивная пайка?
11. В результате чего образуется припой при реактивно-флюсовой пайке?
12. Как делятся способы пайки по заполнению зазора припоем?
13. Какая ширина зазора должна быть при капиллярной и некапиллярной пайке?
14. В чем состоит особенность капиллярной пайки?
15. В чем состоит особенность некапиллярной пайки?
16. Что такое пайкосварка?
17. Что такое сваркопайка?
18. Какие существуют способы пайки по кристаллизации паяного шва?
19. В чем заключаются преимущества диффузионной пайки?
20. Какие способы пайки по источнику нагрева наиболее широко применяются в промышленном производстве?
21. Какие способы пайки по источнику нагрева наиболее широко используются в условиях мелкосерийного производства при низкотемпературной пайке?
22. Какие способы пайки по источнику нагрева в последнее время всё больше внедряются в производство, особенно в автомобилестроении?
23. Какие существуют способы пайки по наличию давления на паяемые детали?
24. Какие существуют способы пайки по одновременности выполнения паяных соединений?

### **1.3. Технологические и вспомогательные материалы для пайки**

Технологические материалы для пайки — это материалы, компоненты которых входят в состав образующегося паяного соединения. К ним относятся припои, технологические и барьерные покрытия.

К вспомогательным материалам относятся паяльные флюсы, активные и инертные газовые среды, вещества, ограничивающие растекание припоя. Вспомогательные материалы только прини-

мают участие в образовании паяного соединения, их компоненты не входят в состав полученного паяного соединения.

*Припой* — это материал, соединяющий заготовки. Согласно ГОСТ 17325–79 припоем называют материал для пайки и лужения с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов.

Все припои по температуре плавления делятся на припои для низкотемпературной пайки (температура их плавления ниже 450 °С) и припои для высокотемпературной пайки (температура их плавления выше 450 °С).

К припоям для низкотемпературной пайки относятся оловянно-свинцовые, припои на основе галлия, индия, висмута, кадмия, цинка, олова, свинца. В свою очередь, припои для низкотемпературной пайки делятся на особо легкоплавкие (температура плавления меньше 145 °С) и легкоплавкие (температура плавления от 145 до 450 °С).

Припои для низкотемпературной пайки наиболее широко применяются во всех отраслях промышленности и в быту, особенно оловянно-свинцовые припои, отличающиеся хорошей смачивающей способностью, высокой электропроводностью и сопротивлением к коррозии.

К припоям для высокотемпературной пайки относятся алюминиевые, магниевые, серебряные, медные, золотые, платиновые, циркониевые и др.

Припои для высокотемпературной пайки делятся на среднеплавкие (температура плавления от 450 до 1100 °С), высокоплавкие (температура плавления от 1100 до 1850 °С) и тугоплавкие (температура плавления более 1850 °С).

Из припоев для высокотемпературной пайки наиболее широко применяют медно-цинковые и серебряные припои с добавками олова, марганца, алюминия, железа и других металлов. Прочность этих припоев значительно выше, чем прочность легкоплавких припоев. Соединения, паянные медью и припоями на ее основе, имеют высокую коррозионную стойкость и, как правило, высокие механические свойства.

Припой для пайки должны отвечать следующим требованиям:

- 1) температура их плавления должна быть ниже температуры плавления паяемых материалов;
- 2) припой должны хорошо смачивать паяемый материал и легко растекаться по его поверхности;
- 3) припой должны обеспечивать герметичность и прочность паяного соединения;
- 4) коэффициенты термического расширения припоя и паяемого материала не должны сильно различаться.

Припой подразделяют на две группы: готовые припой и припой, образующиеся при пайке.

Наиболее широко при пайке применяются *готовые припой*, которые классифицируют по следующим признакам:

- 1) по величине температурного интервала плавления (ограничен температурой начала и конца плавления припоя);
- 2) степени расплавления при пайке (полностью и частично расплавляемые припой);
- 3) основному или наиболее дефицитному компоненту;
- 4) способности к самофлюсованию;
- 5) способу изготовления и виду полуфабриката.

С уменьшением *температурного интервала плавления* улучшается способность припоев к растеканию и затеканию в паяльный зазор.

*Частично расплавляемые припой* состоят из легкоплавкой части и твердого наполнителя, не плавящегося при температуре пайки. Такие припой называются *композиционными*. Наполнителем в композиционном припое, как уже было отмечено, является материал, образующий в паяльном зазоре систему капилляров или обеспечивающий специальные свойства соединения.

В большинстве случаев припой называют по названию входящих в них *основных компонентов*, например оловянно-свинцовые, медно-никелево-марганцевые и др. При содержании в припое редких или драгоценных металлов припой называют по этим элементам, например, серебряный, золотой, хотя содержание их в припое может составлять всего несколько процентов.

Существуют припой, которые обладают свойствами *самофлюсования*. Они содержат легирующие элементы — раскислители

с сильным химическим сродством к кислороду. Эти элементы способствуют улучшению растекаемости припоя и смачиваемости им паяемого металла. К элементам-раскислителям относятся литий, калий, натрий, фосфор, цезий, бор и др. Припой, легированные этими элементами, называют самофлюсующими.

*По способу изготовления и виду полуфабриката* припой выпускаются в виде листов, лент, фольги, проволоки, фасонных отливок, сеток, колец, пластин различной формы, порошков и паст.

К припоям, *образующимся в процессе пайки*, относятся припой, которые получаются в результате:

- 1) контактно-реактивного плавления;
- 2) контактного твердо-газового плавления;
- 3) взаимодействия паяемого материала с флюсом;
- 4) взаимодействия заготовки припоя с компонентами газовой среды;
- 5) сочетания вышеуказанных процессов.

*Технологические и барьерные покрытия*, относящиеся также к технологическим материалам для пайки, наносятся на соединяемые (паяемые) поверхности деталей либо с целью защиты паяемых поверхностей от окисления при нагреве, либо для получения желаемых свойств и/или размеров поверхностей паяемых деталей. Технологическое покрытие участвует в контактном плавлении и растворяется в расплавленном припое.

Барьерные (ограничительные) покрытия наносятся для предотвращения контакта паяемого материала с припоем или растекания припоя на поверхности, не подлежащей пайке или лужению. Барьерное покрытие частично растворяется или совсем не растворяется в расплавленном припое.

Окисление соединяемых поверхностей в процессе нагрева предотвращается *флюсом*, который создает жидкую и газообразную защиту зоны пайки от окружающего воздуха. Флюс очищает поверхности паяемых деталей от окисных пленок и способствует лучшему затеканию расплавленного припоя в паяльный зазор.

Флюс — это неметаллическое вещество, предназначенное для удаления адсорбированного кислорода или водной пленки с поверхности паяемого металла и припоя и для предотвращения ее образования при пайке на воздухе, а также для изменения поверхностного натяжения жидкого припоя.



Флюсы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по температурному интервалу активности;
- 2) механизму действия на окисную пленку;
- 3) агрегатному состоянию при поставке.

Активность флюса, то есть его способность флюсовать, зависит не только от его химического состава, но и от температуры пайки. Поэтому важнейшей характеристикой паяльного флюса является его *температурный интервал активности*.

По мере нагрева химический состав флюса может изменяться, поскольку в нем могут происходить процессы испарения, разложения и окисления его компонентов и их химического взаимодействия между собой. На границе с паяемым металлом может происходить взаимодействие флюса с окисной пленкой и паяемым металлом или его компонентами, возможно также протекание процессов восстановления тяжелых металлов из компонентов флюса. Интенсивность и полнота протекания таких процессов зависит от температуры и времени пайки.

Наиболее универсальными для низкотемпературной пайки являются флюсы на основе хлористого цинка ( $ZnCl_2$ ), включающие в состав ортофосфорную кислоту, глицерин, вазелин, спирт, канифоль и др. Однако при выполнении монтажных соединений довольно часто в качестве флюса используют чистую канифоль без добавок. Расплавленная канифоль растворяет окислы, очищает паяемую поверхность, защищает паяный шов от коррозии.

Наиболее универсальными для высокотемпературной пайки являются флюсы на основе тетраборнокислого натрия (обезвоженная бура  $Na_2B_4O_7$ ) и флюсы на основе борной кислоты  $H_3BO_3$ . Флюсы представляют собой замес порошка или пасты на воде или спирте.

Удаление окисной пленки с соединяемых поверхностей происходит в результате проникновения флюса через имеющиеся в ней микропоры и микротрещины и развития под ее поверхностью химических реакций.

По агрегатному состоянию при поставке флюсы могут быть твердые, пастообразные, жидкие и газообразные.

Флюс (кроме технологии реактивно-флюсовой пайки) не должен химически взаимодействовать с припоем. Температура плав-

ления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюс не должен растворяться в припое и образовывать с ним химических соединений.

Газообразные флюсы вводятся в атмосферу печи в микродозах. Эти вещества применяют как самостоятельные газовые атмосферы или добавляют в нейтральные и восстановительные газовые среды для повышения активности удаления окисной пленки. Газообразные флюсы используют тогда, когда применение обычных флюсов (порошковых, жидких, пастообразных) затруднено из-за невозможности удаления их остатков после пайки.

Однако флюсы не всегда используются в процессах пайки. При пайке в защитных газовых атмосферах или вакууме они не нужны, поскольку отсутствует контакт припоя и паяемых материалов с атмосферным воздухом.

Защитные газовые атмосферы разделяются в свою очередь на активные и нейтральные. Активные газовые атмосферы защищают металл от окисления и оказывают содействие удалению окисной пленки. К активным газовым средам относятся газообразные флюсы и восстановительные газовые атмосферы.

К нейтральным газовым средам, которые выступают в роли защитной атмосферы, относятся аргон, гелий, азот. Нейтральная газовая среда используется при пайке нержавеющей и жаропрочных сталей, вольфрама и титана.

К вспомогательным материалам для пайки относятся также вещества, называемые «стоп-материалы». Они используются при подготовке поверхности паяемого материала к пайке и наносятся на него в те места, где нежелательно смачивание паяемого металла жидким припоем. Такие вещества подразделяют на стоп-пасты и покрытия, наносимые, например, гальваническим методом, путем распыления или пульверизацией.

### **Контрольные вопросы**

1. Что относится к технологическим материалам для пайки и в чем заключается их основная особенность?
2. Что относится к вспомогательным материалам для пайки и какую роль они выполняют в образовании паяного соединения?

3. Какой материал называют припоем для пайки и лужения согласно ГОСТ 17325–79?
4. Каково основное отличие между припоями для низкотемпературной и высокотемпературной пайки?
5. Как делятся припои для низкотемпературной пайки?
6. Как делятся припои для высокотемпературной пайки?
7. Каким требованиям должны отвечать припои для пайки?
8. По каким признакам классифицируют готовые припои?
9. Какие способности припоев улучшаются с уменьшением температурного интервала плавления?
10. Что такое композиционные припои?
11. Как в большинстве случаев называют припои?
12. Какие припои называются самофлюсующими?
13. В результате каких процессов, происходящих при пайке, образуются припои?
14. Какие бывают припои по способу изготовления и виду полуфабриката?
15. Что такое технологические покрытия и для чего они служат?
16. Что такое барьерные покрытия, в чем заключается их назначение?
17. Что такое флюс и для чего он служит?
18. От чего зависит активность флюса?
19. Какие флюсы являются наиболее универсальными для низкотемпературной пайки?
20. Какие флюсы являются наиболее универсальными для высокотемпературной пайки?
21. Каким требованиям должны отвечать флюсы?
22. По каким признакам классифицируют флюсы?
23. В результате какого процесса происходит удаление окисной пленки с поверхности металла при его взаимодействии с флюсом?
24. Как применяют газообразные флюсы?
25. Какие существуют защитные газовые атмосферы?

## 1.4. Подготовка поверхности деталей к пайке

Для получения качественного паяного соединения необходимо выполнить подготовку соединяемых поверхностей под пайку, что предусматривает удаление с них жиров, масел, грязи, окислы и неметаллических, в том числе окисных пленок, которые не могут быть удалены в процессе пайки с помощью флюсов или активных газовых сред.

Существуют следующие основные способы подготовки поверхности деталей под пайку:

- 1) *механический* (обработка режущим инструментом или абразивом, гидropескоструйная или дробеструйная обработка);
- 2) *химический* (обезжиривание, химическое травление, электрохимическое травление, травление с ультразвуковой обработкой, обезжиривание с травлением);
- 3) *термический* (пламенем горелки, отжигом в восстановительной атмосфере или вакууме).

*Механическая очистка* паяемых поверхностей производится с целью удаления с них продуктов коррозии и химически трудноудаляемых окисных пленок при помощи напильника, шлифовального круга, наждачной бумаги, проволочной сетки. После ручной механической очистки обработанные поверхности обезжириваются в бензине, ацетоне или спирте. Однако ручная механическая очистка является малопродуктивным процессом, поэтому применяется только в единичном производстве.

При очистке протяженных поверхностей или сложнопрофилированных изделий в целях повышения производительности труда применяют *гидроабразивную очистку* с помощью струи жидкости или вращающихся щеток из синтетического материала с добавлением в моющий состав абразивных частиц. Получение шероховатой поверхности после механической обработки способствует улучшению растекания припоя, так как риски, образовавшиеся на поверхности, представляют собой мельчайшие капилляры.

Механическую очистку мелких деталей со свободным доступом к паяемым поверхностям производят *металлическими щетками* или выполняют *жидкостно-абразивную обработку*, при которой окис-

ные пленки и заусенцы удаляются в результате трения поверхностей обрабатываемых деталей с кусками абразива при их перемешивании в специальном барабане. Эти способы широко применяют для подготовки поверхностей паяемых деталей из алюминия, магния и сплавов на их основе.

Наиболее эффективным и экономичным методом является *гидропескоструйная очистка* поверхностей, применяемая для удаления окалины, окислов, других загрязнений, появившихся после термообработки,ковки, штамповки, а также в случаях, когда нельзя применять травление или когда возникают трудности в удалении травильного шлама.

*Металлопескоструйная и дробеструйная* обработка осуществляется металлическим порошком из стали или чугуна, а также литой и колотой чугунной и стальной дробью или стальной дробью, рубленной из проволоки. Наилучший вариант очистки достигается применением металлического песка, изготовленного из того же материала, что и обрабатываемая деталь. Для удаления остатков металлического песка обработанные детали обдувают сжатым воздухом. Однако такой метод непригоден для обработки поверхности деталей из алюминия, магния и их сплавов.

*Химическое обезжиривание* применяют для удаления остатков различных смазок и других жировых загрязнений. Проводят его в пятипроцентном растворе щелочи или в органических растворителях, таких как ацетон, бензин, спирт, четыреххлористый углерод, путем протирки, погружения, распыления, обработки в паровой фазе или ультразвуковой ванне. Химическому обезжириванию обычно подвергают детали сложной конфигурации, с внутренними полостями и глубокими отверстиями.

Для ускорения процесса обработки в щелочных растворах применяют *электрохимическое обезжиривание*. Процесс ведут при постоянном токе и различают по способу электродного подключения обрабатываемого изделия анодное и катодное обезжиривание.

Очистку паяемых поверхностей от эмульсий, минеральных масел и консервационных смазочных материалов осуществляют органическими растворителями: дихлорэтаном, трихлорэтаном, трихлорэтиленом, трифтортрихлорэтаном, которые хорошо раство-

ряют жировые загрязнения. Эти растворители не воспламеняются на воздухе, поэтому обезжиривание можно вести при повышенных температурах, что ускоряет и улучшает очистку поверхности. Но поскольку указанные растворители ядовиты, обработку ведут на специальном оборудовании при соблюдении правил техники безопасности. Обезжиривание возможно также этиловым спиртом, ацетоном, бензином, уайт-спиритом.

В зависимости от конфигурации и габаритов обрабатываемых изделий обезжиривание осуществляется:

- струйным методом,
- дождеванием,
- окунанием,
- заливкой,
- в парах растворителя,
- протиркой,
- ультразвуком.

Детали сложной конфигурации лучше обезжиривать *струйным методом* в закрытых установках, исключающих выход паров в помещение. Моющее средство подают под давлением через сопловое устройство. Разновидность струйного метода с малым напором моющего средства называется *дождеванием*. Дождевание применяют для обработки наружных поверхностей деталей.

*Окувание* удобно для мелких деталей. Детали, закрепленные в специальных приспособлениях или помещенные в сетчатый контейнер, обезжиривают прополаскиванием в ваннах с моющим средством. При этом должно быть не менее двух ванн. Одна ванна служит для предварительного обезжиривания деталей, другая – для окончательного обезжиривания.

Внутренние полости деталей целесообразно обезжиривать путем заливки моющего средства. Обезжиривание осуществляют либо путем заливки всего объема внутренней полости моющим средством с последующей выдержкой, либо путем частичного заполнения внутренней полости с последующим вращением, барботажем, кантованием или прополаскиванием.

Детали большого объема и с отверстиями рекомендуется обезжиривать методом прокачки *моющего средства*. В этом случае моющее средство подается под давлением.

Обезжиривание *в парах растворителя* проводят в специальной камере путем подачи горячего моющего раствора с некоторым количеством пара или путем заполнения камеры насыщенным паром.

При комбинированном методе обезжиривания детали очищают окунанием, а затем помещают в камеру с парообразным растворителем. Данным методом обрабатывают детали, к качеству поверхностей которых предъявляют очень высокие требования.

*Протирку* применяют при локальном обезжиривании. Локальное обезжиривание производят бязевыми салфетками, смоченными в растворителе и отжатыми от его избытка, а также щетками или кистями.

Очистка поверхностей мелких деталей сложной формы с ограниченным доступом к местам скопления загрязнений (узкие щели, выточки, замкнутые каналы, глубокие отверстия, изгибы и др.) возможна лишь ультразвуковым методом.

Толстые слои окисных пленок удаляют *травлением* в растворах кислот или щелочей. Состав раствора определяется видом металла, толщиной окисной пленки и требуемой скоростью травления.

Метод *химического травления* высокопроизводителен и эффективен в условиях массового и крупносерийного производства. Однако *химическое травление* непригодно для деталей сложной конфигурации, имеющих острые кромки, щелевые зазоры и замкнутые полости, из которых трудно удалить остатки травильных растворов, а также деталей, имеющих отдельные участки поверхности из неметаллических материалов или с защитными покрытиями. Перед операцией травления поверхности деталей следует очищать от смазочных материалов и жировых загрязнений.

*Ультразвуковое травление* является особенно эффективным для очистки поверхностей мелких и тонкостенных деталей, а также деталей сложной конфигурации с ограниченным доступом к паяемой поверхности.

После обезжиривания, травления и снятия травильного шлака производится промывка паяемых поверхностей. Для промывки можно применять техническую, артезианскую и речную воду. Следует помнить, что вода, которая уже была использована для других целей, для промывки поверхностей деталей *под пайку непригодна*.

Очищенные детали должны быть быстро направлены на сборку и пайку, так как их паяемость после очистки сохраняется *очень недолго*, например, для деталей из меди паяемость после очистки сохраняется 3–5 суток, а для деталей из серебра – 10–15 суток. Поэтому для обеспечения межоперационного хранения деталей и компонентов электронной аппаратуры на их поверхности наносят металлические покрытия, которые улучшают процесс смачивания припоем и сохраняют паяемость в течение длительного времени.

В качестве таких покрытий используют легкоплавкие припои (ПОС 61, ПОСВ 33 и др.), сплавы олова с висмутом или никелем, золото, серебро, палладий и другие металлы, которые наносят погружением в расплав, гальваническим или термовакуумным осаждением, а также плакированием. После выполнения подготовительных операций или межоперационного хранения необходимо контролировать пригодность деталей к пайке путем *оценки их паяемости*.

Заключительной операцией процесса подготовки паяемых поверхностей является сушка. Перед пайкой детали сушат в сушильных шкафах или чистым сжатым воздухом, нагретым до 50–60 °С.

При подготовке поверхностей под пайку необходимо обеспечить требуемую степень шероховатости участков паяемого металла и оптимальное направление образующихся при этом рисков, поскольку шероховатость паяемой поверхности оказывает существенное влияние на растекание и затекание припоя в зазор. При укладке припоя в зазор шероховатость паяемой поверхности имеет несколько меньшее значение.

Подготовка поверхностей соединяемых деталей под пайку включает также нанесение специальных *технологических* или *барьерных* (защитных) покрытий. Их наносят гальваническим или химическим способом, горячим лужением (погружением в расплавленный припой), с помощью ультразвука, плакированием или термовакуумным напылением. Целью нанесения технологических покрытий является:

- а) улучшение смачиваемости поверхностей паяемых деталей расплавленным припоем;
- б) защита основного металла от испарения отдельных его компонентов в процессе пайки;



- в) предотвращение вредного взаимодействия припоя с основным металлом, приводящего к образованию хрупких структур;
- г) использование технологических покрытий в качестве припоя при контактно-реактивной пайке.

После пайки необходимо выполнить:

- удаление остатков флюса,
- зачистку соединения от наплывов припоя,
- механическую обработку изделия,
- термообработку изделия при необходимости.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют основные способы подготовки поверхности деталей под пайку?
2. Какие виды обработки включает в себя механический способ подготовки поверхности деталей под пайку?
3. Какие виды обработки включает в себя химический способ подготовки поверхности деталей под пайку?
4. Какие виды обработки включает в себя термический способ подготовки поверхности деталей под пайку?
5. С какой целью производится механическая очистка паяемых поверхностей?
6. Какой метод очистки применяют для повышения производительности труда при подготовке поверхностей протяженных или сложнопрофилированных изделий?
7. Какие методы механической очистки рекомендуется применять для мелких деталей со свободным доступом к паяемым поверхностям?
8. В каких случаях применяется метод гидропескоструйной очистки поверхностей под пайку?
9. Почему образование шероховатой поверхности после механической обработки способствует увеличению растекания припоя?
10. Для чего и какими способами проводят химическое обезжиривание паяемых поверхностей?
11. Какие детали обычно подвергают химическому обезжириванию?
12. Какой вид обезжиривания применяют для ускорения процесса обработки в щелочных растворах?

13. Какими растворителями можно проводить обезжиривание паяемых поверхностей?
14. Для каких деталей применяют обезжиривание методом окуна-ния и как это происходит?
15. Как обезжириваются внутренние полости деталей?
16. Каким методом рекомендуется обезжиривать детали большого объема и с отверстиями?
17. Как производят обезжиривание в парах растворителя?
18. Как обрабатывают детали, к качеству поверхностей которых предъявляют очень высокие требования?
19. Каким методом возможна очистка поверхностей мелких деталей сложной формы с ограниченным доступом к местам скопления загрязнений?
20. В условиях каких типов промышленного производства метод химического травления является высокопроизводительным и эффективным?
21. Для каких деталей химическое травление является непригодным?
22. Какую воду нужно применять для промывки паяемых поверхно-стей после химической очистки?
23. Как защищают очищенные под пайку детали для межопераци-онного хранения?
24. Какая операция является заключительной при подготовке к пай-ке соединяемых поверхностей?
25. Для чего производится нанесение на паяемые поверхности специальных технологических или барьерных (защитных) покрытий?
26. Какие технологические операции необходимо выполнять после пайки?








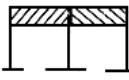

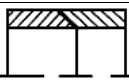


### **1.5. Сборка деталей под пайку**


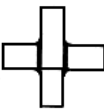







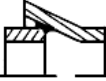
Способ сборки деталей, предназначенных для пайки, зависит от формы изделия, его материала, выбранного способа пайки, а так-же от типа соединения (табл. 1), поэтому способы сборки и фикса-ции деталей следует выбирать в процессе проектирования изделия. Желательно применять наиболее простые способы сборки и фикс-

сацией деталей, надежно гарантирующие правильное и устойчивое их положение во время нагрева и охлаждения.

Таблица 1

Основные типы паяных соединений (ГОСТ 19249–73, [3])

Тип паяного соединения	Характерное сечение паяного соединения	Условное обозначение соединения
Нахлесточный		ПН-1
		ПН-21
		ПН-31
		ПН-4
Телескопический		ПН-5
		ПН-6
Стыковой		ПВ-1
		ПВ-2
Косостыковой		ПВ-3
		ПВ-4
Тавровый		ПТ-1
		ПТ-2

Тип паяного соединения	Характерное сечение паяного соединения	Условное обозначение соединения
		ПТ-3
		ПТ-4
Угловой		ПУ-1
		ПУ-2
		ПУ-3
Соприкасающийся		ПС-1
		ПС-2
		ПС-3
		ПС-4
		ПС-5

Для сборки изделий простой формы с одинаковыми и сравнительно толстыми стенками можно ограничиться самыми простыми способами сборки и фиксации, такими как прихватка точечной сваркой, клепкой, местной тугой посадкой, свинчиванием паяемых элементов и т. п.

Фиксирование деталей при пайке производится в целях исключения их смещения (плотной посадкой, обжатием, развальцовкой, прихваткой сваркой и пр.).

Детали собирают и фиксируют (скрепляют друг с другом) после подготовки их поверхностей под пайку. Способ крепления зависит от конструкции изделия и часто подбирается экспериментальным путем.

Но если фиксация деталей перед пайкой не обеспечивается их конструкцией или изделие имеет сложную форму, резкие переходы сечений отверстия и т. д., а нагрев при выбранном способе пайки приводит к их короблению, то в таких случаях для сборки и фиксации деталей следует применять специальные приспособления.

Применение приспособлений для сборки деталей под пайку требует учета следующих факторов:

- масса приспособления должна быть минимальной;
- приспособление должно иметь простую форму и позволять равномерно прогреваться и охлаждаться паяемому изделию, одновременно фиксируя заданное взаимоположение паяемых элементов;
- приспособление должно обеспечивать свободное расширение деталей при нагреве;
- приспособление должно обеспечивать минимальный теплоотвод от паяемого стыка;
- приспособление не должно создавать препятствий для растекания припоя;
- приспособление должно быть выполнено из материалов, не сплавляющихся с изделием в месте контакта, и не смачиваться расплавленным припоем.

Применение приспособлений при пайке способствует улучшению качества сборки и качества паяного шва, увеличению производительности труда паяльщиков, что особенно актуально в условиях массового и крупносерийного производства.

Смещение паяемых деталей относительно друг друга приводит к браку. Поэтому при сборке в первую очередь должны быть обеспечены правильные зазоры под пайку. ГОСТ 19249–73 рекомендует следующие величины зазоров между сопрягаемыми поверхностями при пайке различными припоями (табл. 2).

Увеличение зазоров относительно рекомендуемых приводит к снижению прочности паяного соединения и увеличению расхода припоя.

Таблица 2

Величины сборочных зазоров для наиболее распространенных сочетаний «паяемый материал – припой» [3]

Наименование припоя	Наименование паяемого материала				
	Медь	Медные сплавы	Сталь углеродистая и низколегированная	Сталь нержавеющая	Алюминий и алюминиевые сплавы
Оловянно-свинцовый	0,07–0,20	0,07–0,20	0,05–0,50	0,20–0,75	0,05–0,15
Медный	–	0,04–0,20	0,001–0,05	0,01–0,10	–
Медно-цинковый	0,04–0,20	0,04–0,20	0,05–0,25	0,02–0,12	–
Медно-фосфористый	0,04–0,20	0,04–0,20	–	–	–
Серебряно-медно-фосфористый	0,02–0,15	0,02–0,15	–	–	–
Серебряный	0,04–0,25	0,04–0,25	0,02–0,15	0,05–0,10	–
Алюминиевый	–	–	–	–	0,12–0,25
Цинковый	–	–	–	–	0,10–0,25

В зазоре, имеющем размеры больше рекомендуемой величины, припой капиллярным силами не удерживается и вытекает наружу.

Поэтому необходимо уменьшение зазора, которое можно производить за счет:

- использования прокладок из фольги;
- порошка, изготовленного из железа, никеля, паяемого металла или других нержавеющих сталей и жаропрочных сплавов;

- пасты, приготовленной на порошке и скрепленной глицерином, акриловой смолой или канифолью, растворенной в этиловом спирте;
- напыления металла в зазор между деталями.

Чтобы гарантировать соблюдение установленного соединительного зазора при температуре пайки, рекомендуется учитывать величину расширения и сжатия приспособления относительно паяемых деталей.

Поэтому необходимо сравнивать коэффициенты термического расширения паяемого материала и материала, из которого выполнено приспособление.

Применение жестких приспособлений без учета коэффициентов линейного расширения часто приводит к образованию растягивающих напряжений и, как следствие, к возникновению трещин по месту пайки.

Материал применяемых приспособлений должен иметь высокую температуру плавления, не претерпевать структурных превращений при температуре пайки и обладать достаточным запасом прочности при этой температуре.

В определенных случаях сборка под пайку включает в себя нанесение припоя, укладку его в виде дозированных заготовок из проволоки или фольги.

При размещении припоя необходимо учитывать расположение изделия в печи или другом нагревательном устройстве, режимы нагрева и охлаждения.

Если для получения качественного соединения необходима операция покрытия паяемых поверхностей припоем (медь, серебро, серебряные и другие припой) электролитическим, химическим способом или напылением, то она производится до сборки узла.

Во всех остальных случаях припой в виде фольги, проволоки, прутков, порошка или пасты укладывается в зазор соединяемых деталей в процессе сборки под пайку.

Качество паяного соединения в значительной мере зависит от правильного дозирования припоя: при недостаточном его количестве зазоры не заполняются и соединение получается ненадеж-

ным, при избытке же припоя имеют место натеки, наплывы, повышается расход припоя.

Поэтому правильное фиксирование деталей в приспособлениях и корректная дозировка припоя могут позволить исключить дополнительную механическую обработку паяных швов.

### **Контрольные вопросы**

1. От чего зависит способ сборки деталей, предназначенных для соединения пайкой?
2. Какие существуют типы паяных соединений, согласно определению ГОСТ 19249–73?
3. При сборке каких изделий можно ограничиться самыми простыми способами сборки и фиксации?
4. В каких случаях для сборки и фиксации деталей следует применять специальные приспособления?
5. Учета каких факторов требует применение приспособлений для сборки деталей под пайку?
6. Что должны обеспечивать сборочные приспособления, применяемые для пайки?
7. Какие преимущества дает применение приспособлений при пайке в условиях массового и крупносерийного производства?
8. На какие показатели паяного шва влияет качество сборки деталей под пайку?
9. Какова цель фиксирования деталей при пайке?
10. Какими способами сборки и фиксации можно ограничиться для сборки изделий простой формы с одинаковыми и сравнительно толстыми стенками?
11. Детали собирают и фиксируют (скрепляют друг с другом) до подготовки их поверхностей под пайку или после?
12. Какая сборка под пайку является наиболее экономичной?
13. К какому дефекту приводит смещение паяемых деталей относительно друг друга?
14. К чему приводит увеличение зазоров относительно рекомендуемых ГОСТом?
15. Что рекомендуется использовать для уменьшения паяльного зазора между соединяемыми деталями?



16. Что нужно сравнивать для соблюдения гарантированного соединительного зазора при температуре пайки?
17. К чему может привести применение жестких приспособлений без учета коэффициентов линейного расширения паяемых материалов?
18. После выполнения какой операции детали собирают и фиксируют, то есть скрепляют друг с другом?
19. Какие условия необходимо учитывать при размещении припоя в процессе сборки изделий?
20. Какой дефект формируется на изделии при недостаточном количестве припоя в зазоре?
21. Какой дефект формируется на изделии при избыточном количестве припоя в зазоре?
22. Что позволяет исключить операции по дополнительной механической обработке паяных швов?

## **Выводы**

Сведения, изложенные в данном разделе учебного пособия, позволяют студентам получить первоначальные представления о теоретических основах пайки материалов.

В разделе описаны особенности протекания физико-химических процессов при пайке. Показано отличие технологии пайки от других технологических процессов соединения деталей. Определены параметры и условия, характеризующие режимы пайки. Даны основные понятия, термины и определения, применяемые в данной области производства.

Большой объем материала данного раздела посвящен рассмотрению классификации существующих способов пайки, которые могут быть применены для изготовления паяных конструкций на предприятиях, имеющих различные типы организации производства.

Подробный анализ применяемых для пайки технологических и вспомогательных материалов, их свойств и технологических возможностей позволяет читателю осуществить их правильный выбор при выполнении технологических процессов низкотемпературной и высокотемпературной пайки материалов.

В разделе рассмотрены методы подготовки поверхности деталей к пайке, необходимые для получения качественного паяного соединения. Определены наиболее эффективные и экономичные методы, отмечены критерии выбора того или иного метода подготовки поверхности.

Показаны основные типы паяных соединений, подробно разобраны способы сборки деталей, предназначенных для пайки, в зависимости от формы изделия, его материала и выбранного способа пайки.

Таким образом, сведения, представленные в данном разделе, могут являться полезными для формирования комплекса знаний, позволяющих обеспечивать грамотный подход к созданию производственных технологий пайки, ведению технологических процессов и управлению качественными характеристиками изготавливаемых паяных изделий.

## Раздел 2. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 2.1. Пайка сталей и чугуна

Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором массовая доля углерода составляет не более 2,14 %. Кроме углерода в стали находятся постоянные примеси, такие как кремний, марганец, сера, фосфор и другие химические элементы.

По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные.

*Углеродистые* стали в своем составе содержат железо, углерод и постоянные примеси, присущие железоуглеродистым сплавам. Другие химические элементы в углеродистых сталях отсутствуют. Углеродистые стали делятся:

- на низкоуглеродистые (содержание углерода до 0,3 %);
- среднеуглеродистые (содержание углерода от 0,3 до 0,6 %);
- высокоуглеродистые (содержание углерода более 0,6 %).

*Легированной* называется сталь, в которой кроме углерода и обычных примесей содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.).

По содержанию легирующих элементов стали делятся:

- на низколегированные (содержание легирующих элементов до 2,5 %);
- среднелегированные (содержание легирующих элементов 2,5–10 %);
- высоколегированные (содержание легирующих элементов свыше 10 %).

Пайка сталей, содержащих в своем составе различное количество углерода и легирующих элементов, выполняется с применением разных источников нагрева, припоев и флюсов, на различных температурных режимах.

## Пайка углеродистых и низколегированных сталей

Стали данного класса являются сталями общего назначения и широко применяются в различных областях техники и строительства.

Углеродистые и низколегированные стали паяют без особых затруднений любым из известных способов пайки. Объясняется это тем, что окисная пленка, образующаяся на поверхности этих сталей, химически неустойчива. Она легко восстанавливается в газовых средах и растворяется под воздействием флюсов. Особенно легко паяются низкоуглеродистые стали, содержащие 0,25–0,30 % углерода. Их физико-химические и механические свойства от нагрева во время пайки практически не изменяются.

Качество паяного шва зависит от количества углерода, содержащегося в стали. Чем меньше в стали углерода, тем ее легче паять. С повышением содержания углерода пайка стали затрудняется, ухудшается смачиваемость поверхности деталей припоем. В связи с этим требуется более тщательная подготовка паяемых поверхностей. Кроме того, с повышением содержания углерода в стали паяные соединения становятся более склонными к образованию трещин в зоне нагрева.

Для пайки углеродистых и низколегированных сталей используют оловянно-свинцовые, медные, медно-цинковые, никелевые и серебряные припои. Соединения, паянные этими припоями, имеют прочные и герметичные швы.

Для соединения тонкостенных деталей из углеродистых и низколегированных сталей применяют *низкотемпературную* пайку оловянно-свинцовыми припоями (ПОС 40, ПОС 61) или чистым оловом. Пайка происходит при температурах, не превышающих 450 °С.

В качестве флюса при низкотемпературной пайке углеродистых и низколегированных сталей используют раствор хлористого цинка или комплексные флюсы на его основе.

*Высокотемпературная* пайка углеродистых и низколегированных сталей производится в основном припоями на основе меди. Это позволяет получить соединения, обладающие высокой твердостью и механической прочностью. Такая пайка осуществляется в диапазоне температур 800–1150 °С, в зависимости от химического состава применяемого припоя, определяющего температуру его плавления.

В качестве флюсов при высокотемпературной пайке углеродистых и низколегированных сталей припоями на основе меди используют буру или ее смесь с борной кислотой. Используются также активные борфторатные флюсы ПВ200, ПВ201 и ПВ209.

Серебряные припои, хотя и образуют высокопрочные швы, но из-за своей дороговизны и дефицитности используются гораздо реже. Пайку углеродистых и легированных сталей серебряными припоями производят при температурах 700–750 °С, применяют флюсы ПВ209 и ПВ284.

Иногда для пайки углеродистых и низколегированных сталей в качестве припоя используют высокопрочные и пластичные модифицированные чугуны, температура плавления которых значительно ниже, чем у стали.

Припои, содержащие фосфор, применять для пайки сталей не рекомендуется из-за возникающей при этом хрупкости паяного шва. Однако при пайке ответственных деталей, которые не подвергаются ударным и вибрационным нагрузкам, иногда могут быть использованы медно-фосфористые припои.

После пайки с изделий из углеродистых и низколегированных сталей необходимо тщательно удалять остатки флюса в целях предотвращения коррозии паяного шва.

Высокотемпературная печная пайка углеродистых и низколегированных сталей в контролируемых средах наиболее часто выполняется чистой медью и латунию в газовой среде или вакууме без применения флюсов.

### **Пайка высоколегированных конструкционных сталей**

Эти стали также можно паять любым из известных способов с применением рекомендованных выше припоев и флюсов. Затруднения состоят в том, что на поверхности этих сталей образуются окислы, химически более стойкие из-за растворенного в них хрома. Удаление окисной пленки с поверхности нержавеющей и жаропрочных сталей производится в газовых восстановительных атмосферах при температуре, близкой к 1200 °С.

Поэтому при пайке высоколегированных сталей используются газовые среды и более активные флюсы, чем при пайке углеродистых и низколегированных сталей.

В качестве газовых сред чаще всего применяют трехфтористый бор в смеси с инертными газами, который активно восстанавливает окислы при более низких температурах.

При пайке хромистых и хромоникелевых нержавеющей сталей оловянно-свинцовыми припоями наиболее эффективным является флюс № 3, состоящий из насыщенного раствора соляной кислоты и 30–40%-го водного раствора хлористого цинка. В качестве флюса при пайке данных сталей пригоден также раствор ортофосфорной кислоты. Травление нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов перед пайкой обычно не производят.

Растекание по поверхности высоколегированных сталей легкоплавких припоев типа ПОС и их затекание в зазор можно улучшить предварительным лужением паяемых поверхностей оловом или оловянными припоями, содержащими свинец и цинк. При пайке припоями типа ПОС используются канифольно-спиртовые флюсы, обеспечивающие высокую коррозионную стойкость паяного соединения. Однако легкоплавкими припоями нержавеющей стали паяют довольно редко.

Высокотемпературную пайку коррозионно-стойкой стали производят серебряными, медными, никелевыми припоями. Чистую медь в качестве припоя для нержавеющей сталей применяют крайне редко из-за ее сильной диффузии в сталь и плохой растекаемости по паяемым поверхностям. Изделия, не подвергаемые в процессе эксплуатации серьезным нагрузкам, можно паять латунями марок Л63 и Л68.

Широкое применение для пайки коррозионно-стойких, жаро-стойких и жаропрочных сталей находят припои на основе систем марганец – хром – никель ( $Mn - Cr - Ni$ ) и медь – никель – кремний – бор ( $Cu - Ni - Si - B$ ), а также серебряные припои, в состав которых входят цинк, медь, никель, фосфор, кадмий и палладий.

Из серебряных припоев широкое распространение получили припои систем  $Ag - Cu$  (ПСр 72) и  $Ag - Cu - Cd - Zn$  (ПСр 40, ПСр 45, ПСр 25).

Пайку нержавеющей сталей припоями на основе серебра, меди и никеля производят с использованием флюсов, содержащих буру, борный ангидрид, а также фториды металлов или смесь буры, борного ангидрида с фтороборатами.

Остатки флюса после пайки нержавеющей сталей необходимо тщательно удалять, даже если его количество было небольшим и пайка производилась в среде проточного аргона. Если конструктивные особенности изделия препятствуют удалению остатков флюса, то необходимо вести пайку в газовых средах или вакууме без присутствия флюса.

### **Пайка инструментальных сталей**

Инструментальная углеродистая сталь — это сталь с содержанием 0,6–1,2 % углерода. Эта сталь отличается высокой твердостью и прочностью и применяется для изготовления инструмента.

Для повышения теплостойкости инструментальных сталей их легируют вольфрамом (до 18 %), хромом (до 5 %), ванадием (до 4 %).

При ремонте инструмента, изготовленного из высокоуглеродистых инструментальных сталей, и при изготовлении биметаллического составного инструмента (резцов, сверл, фрез и долбяков) применяют пайку тугоплавкими припоями на основе никеля или ферросплавов. При этом используются флюсы, содержащие бор и фтор. Пайкой соединяют рабочую часть инструмента из быстрорежущих сталей с державкой из среднеуглеродистых легированных сталей типа 40Х или инструментальных сталей типа У7.

Пайку деталей из высокоуглеродистых инструментальных сталей как между собой, так и с деталями из других металлов (кроме алюминиевых, магниевых и жароупорных сплавов) осуществляют чаще всего медью, медно-цинковыми и серебряными припоями, в качестве флюса используя буру или ее смесь с борной кислотой и ферромарганцем.

Пайку инструментальных сталей осуществляют:

- в соляных ваннах,
- в печах,
- нагревом токами высокой частоты (ТВЧ),
- газопламенными горелками.

Пайку в *соляной ванне* производят при температуре 1150–1200 °С. После пайки инструмент охлаждают на воздухе до температуры 900–1000 °С. Дальнейшее охлаждение до 500–560 °С производят в ванне, содержащей хлориды бария, натрия и кальция. Затем изделие охлаждают на воздухе до комнатной температуры. После остывания инструмент тщательно промывают водой до полного удаления солей с его поверхности.

При *печной пайке* используют двухкамерные печи, имеющие камеры предварительного подогрева и пайки.

Нагрев *токамаи высокой частоты* (ТВЧ) чаще всего применяют для удлинения инструмента или его ремонта, для пайки сверл, зенкеров, разверток, метчиков и т. п.

Пайка с применением *газопламенного нагрева* рекомендуется только для термически обработанных стержневых инструментов диаметром менее 10 мм.

### **Пайка чугуна**

Чугуном называется сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода. Кроме углерода в чугуне содержатся кремний, марганец, сера и фосфор. Чугун в своей структуре содержит графит, наличие которого и вызывает определенные трудности при пайке, так как места залегания графита представляют собой внутренние концентраторы напряжений.

Наличие в структуре чугуна графита затрудняет его смачивание расплавленным припоем. Поэтому при подготовке деталей к пайке графит с их поверхности следует удалять. Для удаления графита рекомендуются следующие методы:

- пескоструйная обработка паяемых поверхностей;
- выжигание графита с поверхностей деталей окислительным пламенем газовой горелки;
- электрохимическая обработка деталей перед пайкой в соляной ванне при 450–510 °С.

При *низкотемпературной* пайке чугуна оловянно-свинцовыми или другими легкоплавкими припоями паяемые поверхности подготавливаются обработкой флюсом ПВ209 или ПВ284 при темпера-



туре 600–700 °С или электрохимическим методом в солевой ванне, а затем обезжириваются бензином, ацетоном или раствором щелочи.

Низкотемпературную пайку чугуна можно выполнять паяльником или газовой горелкой с использованием флюсов на основе хлористого цинка с добавками хлористых солей меди и олова. Для облегчения пайки легкоплавкими припоями применяют гальваническое лужение или контактное омеднение паяемых поверхностей в растворе медного купороса.

При *высокотемпературной* пайке чугуна в качестве припоя используется медь или припой на ее основе (например, латуни) и серебряные припои, содержащие никель. Но пайка чугуна чистой медью при высоких температурах (1150 °С) приводит к перегреву чугуна и изменениям в его структуре. Структурные изменения проявляются в образовании в процессе охлаждения чугуна хрупкого цементита. Поэтому применение меди для пайки чугуна следует ограничивать.

Качественные швы без перегрева паяемого металла можно получить при использовании серебряных припоев, содержащих никель. Преимуществом использования серебряных припоев является более низкая температура пайки (меньше 900 °С). Это позволяет предотвращать образование хрупкого цементита в структуре чугуна при его охлаждении.

При пайке чугуна серебряными припоями, содержащими никель, рекомендуется применение борфторатных активных флюсов ПВ200 и ПВ284, которые растворяют в процессе пайки графит на поверхности чугуна, обеспечивая надежное смачивание паяемых поверхностей припоем.

Следует отметить, что припои, содержащие фосфор, при пайке чугуна применять не рекомендуется из-за образования в швах хрупких железо-фосфорных соединений.

При пайке чугуна *газовой горелкой* или паяльником температура пайки не должна превышать 900 °С и пайка должна производиться только нейтральным пламенем горелки.

Пайка чугуна *в печах с контролируемой атмосферой* производится с активным флюсом, улучшающим смачивание основного металла и затекание припоя в зазор. Для снятия внутренних напряжений и получения прочного шва чугунные изделия сразу же после пайки подвергаются отжигу при температуре 700–750 °С в течение 20 минут.

*Пайка дефектных участков* (усадочных раковин, пор и трещин) чугунных литых деталей производится с применением оловянно-свинцовых припоев. Чаще всего для этих целей применяют припой ПОС 30 с использованием в качестве флюса водного раствора хлористого цинка с добавками хлористых солей меди и олова.

*Ремонт чугунных изделий* производят для ликвидации трещин и сколов в массивных деталях, когда их замена технологически или экономически неоправданна. Пайку при проведении ремонта осуществляют только после механической зачистки и лужения паяемых поверхностей. Предварительное лужение позволяет повысить качество и надежность выполняемых ремонтных работ. После пайки изделие тщательно промывают горячей и холодной водой для удаления остатков флюса.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой сплав называется сталью и как стали делятся по химическому составу?
2. Как подразделяются углеродистые стали по содержанию углерода?
3. Как подразделяются легированные стали по содержанию легирующих элементов?
4. Почему углеродистые и низколегированные стали паяются без особых затруднений?
5. Почему затрудняется пайка при повышении содержания в стали углерода?
6. Какие припои используют для низкотемпературной пайки углеродистых и низколегированных сталей и какие для высокотемпературной?
7. Как выполняется пайка тонкостенных деталей из углеродистых и низколегированных сталей?
8. Что используется в качестве флюсов при низкотемпературной и высокотемпературной пайке углеродистых и низколегированных сталей?
9. Какие припои не рекомендуется применять для пайки сталей из-за возникающей хрупкости паяного шва?

10. Почему после пайки изделий из углеродистых и низколегированных сталей необходимо тщательно удалять остатки флюса?
11. Какие источники нагрева применяют для пайки углеродистых и низколегированных сталей без применения флюса?
12. В чем состоят трудности пайки высоколегированных конструкционных сталей?
13. Что чаще всего применяют в качестве газовой среды при пайке высоколегированных конструкционных сталей?
14. Какие флюсы применяют при пайке хромистых и хромоникелевых нержавеющей сталей оловянно-свинцовыми припоями?
15. Как можно улучшить растекание по поверхности высоколегированных сталей легкоплавких припоев типа ПОС и их затекание в зазор?
16. Какими припоями производят высокотемпературную пайку коррозионно-стойкой стали?
17. С какими флюсами производят пайку нержавеющей сталей припоями на основе серебра, меди и никеля?
18. Какая сталь называется инструментальной и в чем ее основные особенности?
19. Какие припои и флюсы используются при ремонте инструмента из высокоуглеродистых инструментальных сталей, а также при изготовлении биметаллического составного инструмента?
20. Какие припои и флюсы используются при пайке высокоуглеродистых и инструментальных сталей как между собой, так и с другими металлами?
21. Какие источники нагрева используются при пайке инструментальных сталей?
22. Какой сплав железа с углеродом называется чугуном?
23. Что вызывает трудности при пайке чугуна?
24. Какие припои и флюсы используются при низкотемпературной и высокотемпературной пайке чугуна?
25. Что является преимуществом использования серебряных припоев при пайке чугуна?
26. Какие припои не рекомендуется применять при пайке чугуна?
27. Как осуществляют пайку дефектных участков (усадочных раковин, пор и трещин) чугунных литых деталей?

## 2.2. Пайка меди и ее сплавов

Чистая медь имеет высокие показатели теплопроводности, электропроводности и коррозионной стойкости. Однако в качестве конструкционного материала технически чистую медь применяют редко, так как она имеет низкие прочностные свойства. Для повышения прочности и придания меди высоких механических свойств ее легируют различными добавками.

Медь и ее сплавы (*латуни и бронзы*) широко применяются в различных отраслях техники для изготовления изделий, работающих в условиях повышенных температур. Пайка меди и ее сплавов выполняется практически всеми известными способами. Наиболее часто в промышленности применяют следующие методы пайки меди и ее сплавов:

- паяльником,
- газовыми горелками,
- погружением в расплавы солей и припоев (пайка в ваннах),
- печная пайка.

### Пайка меди

Пайка чистой технической меди может выполняться паяльником, газовой горелкой, в печах или ваннах (погружением в расплавы солей и припоев).

*Низкотемпературная* пайка меди обычно выполняется паяльником. Но паяльником паяются только мелкие и тонкостенные детали. Крупные детали из меди ввиду их повышенной теплопроводности паяются только газовыми горелками.

Низкотемпературная пайка выполняется стандартными оловянно-свинцовыми припоями (ПОС 40, ПОС 61, ПОССу 30–0,5) и свинцово-серебряными припоями (ПСр 1,5; ПСр 2,5; ПСр 3). Используются флюсы на основе хлористого цинка, хлористого аммония или канифольно-спиртовые флюсы.

Соединения из медных деталей, паянные стандартными оловянно-свинцовыми припоями, сохраняют свою теплостойкость только до температур 100–120 °С. При низких температурах они становятся хрупкими. Это объясняется аллотропическим превращением олова

и образованием в шве хрупких интерметаллидов, превращающихся при низких температурах в очаги развития трещин. Поэтому для изделий, работающих при низких температурах, нужно использовать припои на основе свинца, которые содержат олова не более 15 %. Однако такие припои плохо смачивают основной металл и плохо затекают в соединительные зазоры.

Теплостойкие и хладостойкие соединения получаются при использовании припоя на основе свинца, легированного серебром (припой ПСр 3). Введение в этот припой дополнительно 5 % олова (ПСр 2,5) еще более улучшает его технологические свойства. Однако паяные этими припоями медные узлы обладают невысокой прочностью даже при комнатной температуре.

Не рекомендуется применять для пайки медных изделий серебряные припои, легированные кадмием, потому что они имеют гораздо более низкие технологические свойства, чем оловянно-свинцовые припои. Медные узлы, паянные такими припоями (например, ПСр 5КЦН или ПСр 7КЦН), сохраняют свою теплостойкость только до температуры 350 °С. Они неустойчивы к холоду и имеют низкую прочность из-за образования в шве хрупких интерметаллидов.

Припои на основе цинка также редко применяют для пайки меди, так как она очень интенсивно растворяется в расплаве припоя. Цинковые припои, легированные медью и серебром, очень плохо растекаются по меди. Легирование этих припоев оловом и кадмием (припои ПЦА 8М, ПЦКд и др.) несколько улучшает их растекаемость, но швы, паянные этими припоями, получаются хрупкими.

Наиболее широко для пайки медных конструкций применяются серебряные припои ПСр 15, ПСр 40. Нагрев осуществляют ацетилено-кислородным пламенем или в печах с использованием коррозионно-активных флюсов ПВ209 и ПВ284. Эти флюсы качественно очищают поверхность меди от окисной пленки, что способствует хорошему растеканию припоя. После пайки остатки флюса тщательно удаляются промывкой горячей водой, так как они служат очагами коррозии.

Пайку медной теплообменной аппаратуры выполняют припоями ПСр 72 или ПСр 71 в вакууме без присутствия флюса.

Медные детали паяют также припоями на основе медно-фосфористой эвтектики с добавлением серебра. Швы получаются достаточно прочными и теплостойкими (до температуры 800 °С), но непластичными. При работе в условиях низких температур прочность медных соединений, паянных такими припоями, растет, а пластичность резко снижается.

*Высокотемпературная пайка* медных изделий выполняется припоями на основе меди или серебра. Припои на медной основе (например, Лб3, ЛОК 62–0,6–0,4, МПЦ 36) тугоплавки и вызывают растворение (эрозию) основного металла, поэтому для пайки меди их применяют реже, чем серебряные.

Применение припоев с низким содержанием олова и комплексных флюсов особенно рационально при пайке медных изделий методом погружения в расплавленный припой. В частности, трубчатые медные теплообменники паяются погружением в расплавы солей и припоев в соляных ваннах-печах. Соли являются не только источником тепла, они оказывают флюсующее действие, поэтому дополнительного флюсования при такой пайке не требуется.

При пайке методом погружения в расплавленный припой предварительно офлюсованные детали нагревают в ванне с расплавленным припоем, заполняющим соединительные зазоры. Зеркало припоя при этом защищается активированным углем или инертным газом. Основным недостатком пайки в расплавах солей и припоев является *невозможность* в ряде случаев удаления после пайки остатков солей и флюсов.

Бесфлюсовую пайку медных изделий припоями на основе серебра (например, ПСр 72, ПСр 71, ПСр 62) осуществляют в вакууме или в инертных газах методом печной пайки. Данный метод является экономичным и безопасным. Пайка изделий производится в вакуумных печах или контейнерах, загруженных в обычные печи. Печная пайка обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей, исключая деформации, даже при больших габаритах изделия. Паяные швы на изделии получаются исключительно чистыми, прочными и коррозионно-стойкими.

При пайке меди медно-фосфористыми припоями в печах с защитной атмосферой применение флюса не требуется, так как фос-

фор, входящий в припой, окисляясь в фосфорный ангидрид, сам становится флюсом.

### Пайка латуней

Латунь — это сплав меди с цинком (до 50 % Zn) с добавлением Al, Sn, Fe, Mn, Ni, Si, Pb — в сумме до 10 %. Сложность пайки латуней заключается в образовании на их поверхности окисной пленки, содержащей оксид цинка ZnO и испарения цинка при нагреве.

Канифольно-спиртовые флюсы при выполнении *низкотемпературной пайки* оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями не обеспечивают удаление с поверхности латуни оксида ZnO. Поэтому необходимо использовать более активные флюсы на основе хлористого цинка с добавками азотной кислоты. Но низкотемпературная пайка латуней оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями не может обеспечить высокую прочность соединения.

Низкая прочность паяных соединений из латуни связана с пористостью в швах, которая образуется в результате испарения цинка и попадания его паров в жидкий припой. Причем, данный процесс наблюдается как при низкотемпературной, так и при высокотемпературной пайке.

Пайку латунных изделий можно производить латунями, имеющими более низкую температуру плавления (то есть содержащими в своем составе большее количество цинка), серебряными припоями, а также медно-фосфористыми припоями. Следует только помнить, что медно-фосфористые припои для латуней самофлюсующими не являются.

При этом латуни, содержащие большое количество цинка, паять медно-фосфористыми припоями не рекомендуется, так как в результате такой пайки получаются малопластичные соединения, содержащие в паяном шве хрупкие фосфиды цинка.

Для пайки латунных изделий, не подвергающихся в процессе эксплуатации вибрационным и динамическим нагрузкам, можно применять припой типа ПМЦ 36 и ПМЦ 48.

Следует учитывать, что латуни интенсивно растворяются серебряными и медно-фосфористыми припоями. Поэтому при пайке долж-

ны быть соблюдены высокие скорости нагрева в целях сокращения контакта жидкого припоя и твердого металла. Например, латунь Л63 очень интенсивно растворяется в припоях ПСр 40, ПСр 45, ПСр 15, с меньшей интенсивностью – в припоях ПСр 37,5 и ПСр 50 КД 19.

Латуни можно паять всеми известными способами. Но высокотемпературная пайка латуни в печах с восстановительной или нейтральной атмосферой имеет ограниченное применение из-за интенсивного испарения цинка. Поэтому пайка латуней в газовых средах ведется только при условии предварительного офлюсовывания мест пайки. Латунь можно паять в печи и без флюса, но только в том случае, если она предварительно покрыта слоем меди или никеля, которые предохраняют ее от испарения цинка.

Латунные детали можно также паять в соляных ваннах при температурах от 850 до 870 °С. Для лучшего затекания припоя в зазор в соляной раствор добавляют 4–5 % флюса, содержащего фтороборат калия или буру.

Нагрев латунных деталей в пламени газовых горелок также сопровождается испарением и окислением цинка, что ухудшает растекание припоя. Несколько снизить интенсивность испарения и окисления цинка можно, используя восстановительное пламя, что также обеспечивает и уменьшение пористости в паяных швах.

Качество паяных соединений зависит также от содержания в латунях свинца. Латуни, содержащие менее 3 % свинца и кремния, хорошо паяются в газовых средах медно-фосфористыми и серебряными припоями с обязательным применением флюсов. Но содержание в латунях свинца свыше 3 % отрицательно сказывается на заполнении шва припоем, даже если пайку ведут с присутствием флюса.

### **Пайка бронз**

Бронза – это двойной или многокомпонентный сплав, состоящий из меди и легирующих элементов (кроме цинка) в разном процентном соотношении.

Механические и физические свойства бронз отличаются в зависимости от того, какие компоненты введены в сплав (олово, свинец, хром, алюминий, никель и др.).



В зависимости от содержания олова бронзы делятся на оловянистые и безоловянистые. Последние, в свою очередь, делятся на свинцовые, алюминиевые, кремниевые, марганцовистые, бериллиевые.

Пять *оловянистые бронзы* можно методами низкотемпературной и высокотемпературной пайки. Для *низкотемпературной пайки* применяются оловянно-свинцовые припой и флюсы на основе хлористого цинка с добавлением соляной кислоты.

При *высокотемпературной пайке* оловянистых бронз используют медно-цинковые и серебряные припой с применением флюсов на основе борной кислоты с добавками фтористых и хлористых солей металлов.

Паяются оловянистые бронзы любым из известных способов:

- паяльником,
- газопламенными горелками,
- контактным нагревом,
- токами высокой частоты,
- в соляных ваннах,
- в печах с контролируемой атмосферой.

При пайке оловянистых бронз нагрев изделия должен производиться медленно, поскольку быстрый нагрев может служить причиной появления краснотоккости основного металла при повышенных температурах.

*Свинцовые бронзы* паяются теми же припоями и флюсами, что и оловянистые бронзы. Для предотвращения окисления свинца в бронзе необходимо следить за тем, чтобы место пайки было обильно покрыто флюсом. В противном случае образующиеся окислы будут препятствовать затеканию припоя в зазор.

Пайка *алюминиевых и кремниевых бронз* затруднена тем, что алюминий и кремний вызывают на поверхности бронзы плотные пленки окислов, поэтому изделия из таких бронз перед пайкой необходимо обрабатывать во фтористоводородной кислоте или в царской водке. Пайку таких бронз следует производить с применением особо активных флюсов, имеющих в своем составе повышенное содержание соляной кислоты.

Пайка *марганцовистых бронз* производится при использовании флюсов, содержащих в своем составе фторобораты и фтори-

ды щелочных металлов. Ввиду краснотемпературности марганцовистых бронз при высокотемпературной пайке следует подбирать такую конструкцию фиксирующих приспособлений, которая не препятствовала бы расширению деталей при нагреве и, следовательно, не создавала напряжений, приводящих к растрескиванию металла в процессе пайки.

При пайке *алюминиевых, кремниевых и марганцовистых бронз* нагрев ведется по возможности быстро, чтобы не образовывалось хрупкое соединение. Для снижения хрупкости шва и повышения его пластичности и прочности производится добавка в припой небольшого количества никеля.

*Бериллиевые бронзы* паяются намного сложнее, чем другие медные сплавы. Пайка бериллиевых бронз производится немедленно после выполнения механической зачистки. Для пайки применяют серебряные припои и флюс, в состав которого входят фтористые соли.

Мельхиор (сплав меди с никелем) паяется любым известным способом и любым припоем, в том числе и чистой медью. Пайку мельхиора медью в печи с контролируемой атмосферой необходимо выполнять с большой скоростью, поскольку длительная пайка способствует растворению основного металла в припое, что снижает прочность соединения.

Самым распространенным флюсом для пайки изделий из меди и ее сплавов тугоплавкими припоями служит бура или ее смесь с борной кислотой.

Декоративные изделия, изготовленные из меди и ее сплавов, можно подвергать химической обработке, в результате которой они могут иметь различные оттенки.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему технически чистая медь редко применяется в качестве конструкционного материала?
2. Что необходимо сделать для придания меди высоких механических свойств?
3. Какими методами производится пайка меди и ее сплавов в промышленности?

4. Каковы особенности низкотемпературной пайки деталей из меди, какими припоями и флюсами она производится?
5. Какое содержание олова допускается в припое для пайки медных изделий, работающих при низких температурах?
6. Какие флюсы применяются для пайки меди серебряными припоями и почему эти флюсы нужно удалять после пайки?
7. Почему припой на основе цинка редко применяют для пайки меди?
8. Как происходит пайка медных изделий погружением в расплавы солей и припоев?
9. Какими припоями на основе серебра выполняется бесфлюсовая печная пайка медных изделий?
10. В чем состоят преимущества печной пайки меди в вакууме и инертных газовых средах?
11. Какой сплав называется латунью?
12. В чем заключается сложность низкотемпературной пайки латуней оловянно-свинцовыми и другими легкоплавкими припоями?
13. С чем связано снижение прочности паяных соединений из латуни?
14. Какими припоями можно производить пайку латунных изделий?
15. Почему пайку латуней серебряными и медно-фосфористыми припоями следует выполнять с высокими скоростями нагрева?
16. Какие существуют условия ведения пайки латуней в газовых средах?
17. Что происходит при нагреве латунных деталей в печах и в пламени газовых горелок?
18. Какое влияние оказывает на качество пайки содержание в латунях свинца?
19. Что такое бронза? В зависимости от чего различаются механические и физические свойства бронз?
20. Каковы особенности пайки оловянистых бронз?
21. Как паяют свинцовые бронзы?
22. Каковы особенности пайки алюминиевых, кремниевых и марганцовистых бронз?
23. Как паяют бериллиевые бронзы?

### 2.3. Пайка никеля и его сплавов

Никелевые сплавы характеризуются высокой прочностью и пластичностью, высоким электрическим сопротивлением и коррозионной стойкостью, а также повышенной жаропрочностью и жаростойкостью. Сплавы на основе никеля получили широкое применение для изготовления паяных изделий в электротехнической промышленности и в химическом аппаратостроении.

На поверхности чистого никеля при нагреве образуется только один окисел – NiO. Если никель легировать хромом, алюминием, титаном и другими металлами, образуется комплекс окислов соответствующих металлов.

Электрохимические никелевые сплавы, такие как монель (сплав никеля с медью) и константан (сплав никеля с железом), на своей поверхности имеют химически не стойкую окисную пленку. Эта окисная пленка легко восстанавливается в газовых средах и удаляется флюсованием. При высокотемпературной пайке в вакууме окисная пленка разлагается на кислород и чистый металл. Поэтому пайка монеля и константана не вызывает затруднений.

Для пайки никеля и его сплавов рекомендуется применять припой, флюсы и газовые среды такие же, как и для пайки сталей и меди. Однако выбор припоя, флюса и метода пайки напрямую зависит от состава окислов на поверхности изделия.

Пайка чистого никеля и его низколегированных сплавов выполняется без труда. Пайка средне- и высоколегированных никелевых сплавов требует применения специальных флюсов, которые состоят из фторидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Для удаления окислов с поверхности никелевых сплавов чаще всего применяют травление в специальных ваннах в растворах, содержащих смесь серной, азотной и соляной кислоты. Детали перед травлением выдерживают в горячей воде, затем на 5–10 секунд погружают в травильную ванну. После травления детали промывают в горячей воде. Для нейтрализации остатков кислот детали промывают в 1%-м растворе аммиака и просушивают в опилках.

Для *низкотемпературной* пайки никеля применяют оловянно-свинцовые припои, содержащие 40–60 % олова, и флюсы,

рекомендуемые для пайки сталей. Однако низкотемпературная пайка никеля и его сплавов легкоплавкими припоями производится довольно редко.

Конструкции из никелевых сплавов, работающие при температурах 350–500 °С, паяют серебряными припоями системы Ag – Cu – Zn.

Никелевые сплавы нихром и монель в контакте с жидкими припоями имеют склонность к охрупчиванию, и особенно с теми припоями, которые содержат в своем составе серебро, кадмий и цинк. Чтобы предотвратить хрупкое разрушение, пайку деталей из этих сплавов производят в отожженном состоянии, которое позволяет исключить внутренние и внешние растягивающие напряжения.

Изделия из никелевых сплавов, работающие при более высоких температурах, паяют серебряными припоями с палладием и марганцем (Ag – Pd – Mn), палладиевыми припоями с никелем и хромом (Pd – Ni – Cr) и палладиевыми припоями с никелем (Pd – Ni). Пайка *жаропрочных* никелевых сплавов палладиевыми припоями осуществляется в вакууме или в аргоне. Пайку припоями системы Ni – Mn – Cr ведут в атмосфере аргона с присутствием фтористого бора или фтористого водорода.

Пайка нихромов (жаропрочных сплавов на основе никеля) в *восстановительных газовых средах* должна производиться в тщательно очищенной от остатков кислорода газовой среде. Очистку следует производить с применением платинового или дунитового катализатора, а также с помощью дополнительного осушения газовой среды до точки росы (–70 °С).

При пайке нихромов в *вакууме* или *нейтральных газовых средах* (например, в аргоне) последние должны быть тщательно осушены с помощью цеолита, перекиси бария или фосфорного ангидрида. Необходимо помнить, что в применяемых для пайки газовых средах не должно быть соединений серы. При взаимодействии серы с никелем по границам зерен образуется легкоплавкая эвтектика, вызывающая охрупчивание металла.

Перед пайкой нихромы покрываются слоем никеля или меди толщиной до 15 мкм. Это обеспечивает хорошее смачивание паяемых поверхностей как в вакууме, так и в нейтральных средах без применения флюса.

Получение жаропрочных и кислотостойких паяных соединений возможно с использованием припоев на никельхромовой основе, легированных марганцем, бором, фосфором или кремнием в целях снижения температуры плавления. При этом припой, легированный марганцем, дает более пластичные соединения в сравнении с нихромовыми припоями типа «кольманой», легированными бором и кремнием.

Серебряные и медные припои для пайки жаропрочных никелевых сплавов применяют редко из-за их низкой жаропрочности. Кроме того, при пайке никеля медью паяемый металл значительно растворяется в припое. Поэтому необходима строгая дозировка припоя и контроль температуры пайки.

При пайке никелевых сплавов припоями, содержащими кремний, имеет место растворение основного металла в припое, особенно при температурах выше 1200 °С. Это приводит к снижению растекаемости припоя по паяемым поверхностям.

Пайка никелевых сплавов припоем, легированным бериллием и особенно бором, также сопровождается довольно активным растворением основного металла в припое, поэтому здесь процесс пайки следует вести с высокими скоростями и без перегревов.

Никель и его сплавы *не подвергаются* растворению припоями систем Ni – Mn – Cr; Pd – Ni; Ni – Pd – Ag; Pd – Ni – Cr, но только при пайке до температур 1150–1250 °С.

При высоком содержании никеля в сплавах их *не следует* паять припоями, содержащими в своем составе *фосфор, алюминий и магний*, которые образуют на границе раздела припоя и основного металла хрупкие интерметаллидные фазы.

При пайке нихромов жаропрочными припоями с местным нагревом рекомендуется применять флюсы ПВ200 и ПВ201, а при пайке серебряными припоями – флюсы ПВ209 и ПВ284.

Пайка нихрома, сплава инконель (Ni – Cr – Fe – Mn – Cu – Si), а также никелевых сплавов, содержащих алюминий и титан, требует флюсов высокой активности. Применение активных боридных флюсов при печной пайке приводит к образованию легкоплавкой боридной эвтектики Ni – В, которая приводит к эрозии основного металла. Поэтому пайку никеля и его сплавов в печах проводят

в атмосфере водорода с точкой росы (от  $-40$  до  $-70$  °С). Сплавы, легированные алюминием и титаном, паяют в вакууме или в смеси нейтральных газов с присутствием газообразного трехфтористого бора или хлористого аммония.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы основные характеристики никелевых сплавов и области их применения?
2. Какой окисел образуется на поверхности чистого никеля при нагреве?
3. Сплавы каких элементов представляют собой электрохимические никелевые сплавы монель и константан?
4. Почему пайка чистого никеля, монеля и константана не вызывает затруднений?
5. Какие припои, флюсы и газовые среды рекомендуется применять при пайке никелевых сплавов?
6. Применение каких специальных флюсов требуется для пайки легированных никелевых сплавов?
7. Какую технологию применяют чаще всего для удаления окислов с поверхности никелевых сплавов?
8. Какие припои и флюсы применяют для низкотемпературной пайки никеля?
9. Какими припоями паяют конструкции из никелевых сплавов, работающие при температурах  $350-500$  °С?
10. Как производят пайку сплавов типа нихром и монель в целях предотвращения их хрупкого разрушения в контакте с жидкими припоями, особенно содержащими серебро, кадмий и цинк?
11. В каких средах осуществляется пайка жаропрочных никелевых сплавов палладиевыми припоями?
12. В какой атмосфере ведут пайку жаропрочных никелевых сплавов припоями системы Ni – Mn – Cr?
13. Как осуществляется очистка восстановительных газовых сред от остатков кислорода при пайке нихромов?
14. Как производится осушение нейтральных газовых сред при пайке жаропрочных сплавов на основе никеля?

15. Почему при пайке никеля и его сплавов газовые среды не должны содержать соединений серы?
16. С какой целью перед пайкой нихромы покрываются слоем никеля или меди?
17. Какие припои используются для получения жаропрочных и кислотостойких паяных соединений из никелевых сплавов?
18. По каким причинам серебряные и медные припои редко применяются для пайки жаропрочных никелевых сплавов?
19. При пайке какими припоями никелевые сплавы подвергаются растворению, а в каких припоях они не растворяются?
20. Почему для пайки сплавов, имеющих высокое содержание никеля, не следует применять припои, содержащие в своем составе фосфор, алюминий и магний?
21. Какие флюсы рекомендуется применять при пайке нихромов жаропрочными припоями с местным нагревом?
22. Какие флюсы рекомендуется применять при пайке нихромов серебряными припоями?
23. Почему нельзя применять активные боридные флюсы при печной пайке нихрома и никелевых сплавов, содержащих алюминий и титан?
24. В каких атмосферах паяют сплавы никеля, легированные алюминием и титаном?

## 2.4. Пайка алюминия и его сплавов

Алюминиевые сплавы в зависимости от входящих в них легирующих элементов делятся:

- на сплавы системы Al – Si – *силумины*;
- системы Al – Mg – *магналины*;
- системы Al – Cu – Mg – *дуралюмины*;
- системы Al – Mg – Si – Cu – *авиали*.

Сплав АК носит название *супердуралюмин*.

Алюминий и его сплавы широко применяют для изготовления различных паяных изделий в авиационной, автомобильной, электротехнической и других отраслях промышленности. При помощи пайки можно также исправлять механические повреждения и различные дефекты в отливках из литейных алюминиевых сплавов.



Основными особенностями пайки алюминия и его сплавов являются:

- 1) высокая стойкость окисной пленки, находящейся на их поверхности;
- 2) низкая температура солидуса (начала плавления) большинства алюминиевых сплавов;
- 3) высокая теплоемкость алюминиевых сплавов.

Именно из-за наличия на поверхности алюминия и его сплавов химически стойкой окисной пленки, которая почти мгновенно образуется вновь после ее удаления, пайка его сложна и во многом отличается от технологий пайки других металлов.

Удаление окисной пленки с поверхности алюминиевых сплавов производится:

- специальными флюсами,
- трением,
- абразивным и ультразвуковым лужением.

Кроме того, разработаны способы пайки алюминия и его сплавов путем контактного плавления, а также способы пайки по защитным и барьерным покрытиям.

*Низкотемпературная пайка алюминия* и его сплавов успешно выполняется оловянно-свинцовыми припоями, однако такие соединения имеют низкую коррозионную стойкость. Данный недостаток устраняется при использовании технологических покрытий под пайку. В качестве таких покрытий используют медь, никель, серебро или цинк. Технологические покрытия могут быть нанесены термовакuumным напылением, химическим или электрохимическим способом.

Наиболее высокое качество сцепления покрытия с основным металлом и коррозионную стойкость паяных соединений обеспечивают никель-фосфорные покрытия, наносимые на поверхность алюминия химическим способом из специальных гипофосфитных растворов. После нанесения покрытия деталь подвергают термообработке в защитной среде аргона или в вакууме, что повышает прочность сцепления покрытия с поверхностью основного металла. В коррозионно-активных средах коррозионная стойкость соединений по никель-фосфорному покрытию гораздо выше, чем коррозионная стойкость соединений по медному покрытию.

Коррозионная стойкость соединений повышается при пайке по цинковым покрытиям, в частности, по сплаву  $Zn + 5\% Al$ , нанесенному на поверхность алюминия методом горячего плакирования.

Пайка алюминия по технологическим покрытиям производится оловянно-свинцовыми припоями с применением канифольно-спиртовых флюсов или флюсов на основе водного раствора хлористого цинка. Пайку по цинковому покрытию рекомендуется вести припоем ПОСК 51 с механическим удалением перед пайкой окисной пленки и с флюсом на основе глицерина, содержащего 20 % эвтектики гидроксида натрия (NaOH) и гидроксида калия (KOH).

*Низкотемпературную* пайку алюминия и его сплавов можно осуществлять припоями на основе цинка систем  $Sn - Zn$ ,  $Sn - Pb - Zn$ ,  $Pb - Zn$  и  $Zn - Cd$  с использованием галогенидных и фторборатных флюсов. Однако соединения, паянные такими припоями, также обладают невысокой коррозионной стойкостью. Увеличение содержания цинка в припое повышает коррозионную стойкость паяных соединений. Наибольшую коррозионную стойкость имеют соединения алюминия, паянные припоями, содержащими от 70 до 95 %  $Zn$  с добавками алюминия, серебра и меди. Но если добавить к цинку олово, свинец, кадмий или висмут, то это непременно приведет к снижению коррозионной стойкости соединения.

Для выполнения низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов используют реактивные и органические флюсы. Реактивные флюсы состоят из хлористых солей цинка, олова, аммония и фтористых солей натрия, калия или лития. Органические флюсы изготавливаются на основе триэтаноламина с добавками фторборатов кадмия, цинка или аммония.

После флюсовой пайки изделия сразу же должны промываться в проточной горячей и холодной воде с последующей обработкой в 5%-м растворе азотной кислоты или 10%-м растворе хромового ангидрида в целях тщательного удаления остатков флюса, так как они являются очагами коррозии.

*Высокотемпературная пайка* алюминия и его сплавов выполняется припоями системы  $Al - Si$  (силумины), 34А, 35А, П550А. Такие припои не вызывают коррозии в зоне паяных швов и обеспечивают получение соединений с высокими коррозионными и механическими свойствами.

В припои на алюминиевой основе вводят кремний, серебро, медь, цинк, кадмий, германий, однако наилучшие коррозионные свойства обеспечивают припои системы Al – Si.

Высокотемпературная флюсовая пайка алюминия и его сплавов может проводиться с применением газопламенного, печного, индукционного, контактного нагрева, а также погружением в расплавы солей металлов.

В качестве флюсов при любом способе нагрева применяют смеси солей хлоридов щелочных и тяжелых металлов с добавками фторидов металлов.

При *пайке горелками* используют бензовоздушные и газовоздушные смеси. Ацетилено-кислородное пламя применять нежелательно, так как оно взаимодействует с флюсом и снижает его флюсующие свойства. При пайке алюминиевых сплавов горелками наибольшее распространение получил припой 34А, который более легкоплавок, нежели силумины, поэтому паять им проще и нет опасности оплавления паяемых деталей.

Пайка крупногабаритных изделий, для которых необходим равномерный нагрев, а также пайка тонкостенных ажурных конструкций производится в печах. При *печной пайке* алюминия и его сплавов применяют те же флюсы и припои, что и при пайке горелками. Только наносят их на паяемые детали заранее. Припой наносят во время сборки деталей, а флюс непосредственно перед загрузкой деталей в печь. Скорость нагрева под пайку зависит от толщины стенок соединяемых деталей.

При печной пайке следует иметь в виду, что применение флюса 34А *опасно* из-за возможности значительного растворения основного металла цинком, выделяющимся из флюса. При пайке тонкостенных деталей это может привести к их сквозному проплавлению. Лучшие результаты дает применение флюсов, в которых хлористый цинк заменен на хлористое олово, хлористый кадмий или хлористый свинец, что дает возможность резко снизить растворение паяемой поверхности металлом, выделяющимся из флюса.

При *индукционной пайке* обеспечивается высокая скорость нагрева, поэтому она применяется в основном для изготовления тонкостенных (до 10 мм) телескопических соединений, а для

изделий сложной конфигурации применение индукционного нагрева ограничено.

Пайка алюминия и его сплавов в *солевых ваннах* отличается высокой производительностью и очень удобна для условий массового производства. Преимуществами данной технологии являются отсутствие деформаций изделия, быстрота сборки, большая скорость нагрева, возможность автоматического регулирования процесса, а также длительный срок службы оборудования.

При пайке в солевых ваннах расплавленная соль служит одновременно теплоносителем и флюсующей средой. Состав флюсовой ванны не должен содержать активных хлоридов типа  $ZnCl_2$  из-за сильного растворения в них основного металла. Также необходимо тщательное удаление из расплава ванны солей тяжелых металлов и влаги.

При подготовке поверхности деталей из алюминия и его сплавов к пайке рекомендуется после их обезжиривания проводить травление в 10–15%-м растворе едкого натра при температуре 60 °С с последующей промывкой в холодной воде и обработкой в 20%-м растворе азотной кислоты. После этого должна следовать тщательная промывка в проточной горячей и холодной воде и сушка горячим воздухом. Пайку рекомендуется производить не позднее чем через 6–8 часов после травления. Перед погружением в солевой расплав изделие предварительно подогревается в электропечах до температуры, которая на 30–50 градусов ниже температуры солидуса (начала плавления) припоя, с целью предотвращения попадания влаги в солевую ванну, а также для исключения коробления изделия во время пайки и ускорения его нагрева до температуры пайки.

Сборку изделий под пайку в соляных ваннах производят с помощью специальных приспособлений, изготовленных из нержавеющей стали, инконеля или керамики, не взаимодействующих с соляными расплавами.

Поскольку остатки применяемых флюсов чрезвычайно коррозионно-активны, особенно при эксплуатации изделий в электропроводящих средах, необходимо после пайки осуществлять тщательное удаление остатков флюсов. Для этого детали сразу же после пайки промывают в горячей и холодной проточной воде с после-

дующей обработкой в 55%-м растворе азотной кислоты или 10%-м растворе хромового ангидрида.

Однако остатки флюсов могут оказаться внутри паяного шва, и такая обработка не устранит опасности возникновения очагов коррозии. Именно в этом заключается основной *недостаток флюсовой пайки* алюминия и его сплавов.

В целях устранения данного недостатка и получения коррозионно-стойких соединений разработаны *бесфлюсовые* способы пайки алюминия и его сплавов.

*Бесфлюсовая пайка* осуществляется в газовых средах без применения защитных покрытий контактно-реактивным методом. В качестве припоя применяют кремний, медь или серебро, которые наносят на алюминий гальваническим путем, термовакуумным напылением или плакировкой.

Пайку алюминия припоями типа «силумин» осуществляют в вакууме с присутствием паров магния или в газовой среде, представляющей собой смесь аргона с парами магния. Такая атмосфера способна при температуре 550–580 °С восстанавливать окись алюминия и обеспечивать смачивание паяемой поверхности припоем. В процессе пайки магний, содержащийся в парах газовой атмосферы, переходит из газовой фазы в расплав. Коррозионная стойкость таких соединений получается намного выше, чем при флюсовой пайке.

Пайку в защитной атмосфере можно осуществлять также при использовании самофлюсующих припоев в среде аргона, гелия или в вакууме. Перед пайкой газы должны быть обязательно очищены от паров воды и кислорода.

Бесфлюсовую пайку алюминия припоями типа 34А, ПСр 5АКЦ можно проводить по предварительно луженой поверхности припоем П200А. Лужение производят абразивным способом, нагрев под пайку осуществляется либо в печи в потоке аргона, либо на воздухе токами высокой частоты.

Достаточно распространенным способом низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов без применения флюсов является абразивная пайка (пайка трением). Окисная пленка с поверхности алюминия удаляется шáбером или металлическими щетками под слоем расплавленного припоя. Либо абразивным паяльником или

частицами абразива (асбест, металлические порошки, первичные кристаллы сплавов-припоев), находящимися в расплаве припоя. Операция пайки осуществляется после абразивного лужения путем обеспечения плотного контакта деталей по луженым поверхностям при температуре полного расплавления припоя. Возможна подпитка шва припоем.

Лужение паяемых поверхностей может производиться также ультразвуком с помощью ультразвуковых паяльников или в ультразвуковых ваннах.

Разработан ряд технологических процессов, позволяющих получать надежные соединения алюминия со сталью, медью, никелем и их сплавами и другими металлами. Основными трудностями такой пайки являются:

- 1) трудности выбора флюса или газовой среды, которые могут обеспечить удаление окислов с поверхностей разнородных материалов;
- 2) образование хрупких соединений из-за возникновения интерметаллидов в зоне шва;
- 3) большая разница температурных коэффициентов линейного расширения алюминия и соединяемых с ним металлов.

Первые два осложнения успешно преодолеваются предварительным нанесением на поверхности соединяемых материалов защитных металлических покрытий. Пайку алюминия с медью можно успешно выполнять по никелевому покрытию, нанесенному на алюминий химическим способом.

Пайка алюминия с медью и ее сплавами может выполняться также при нанесении на поверхность меди защитных покрытий из цинка, серебра и их сплавов. Пайку ведут припоями на основе олова, кадмия и цинка.

Соединение алюминия со сталью, в том числе и с нержавеющей, облегчается предварительным лужением поверхности стальной детали легкоплавкими свинцово-оловянными припоями, алюминием или алюминиевыми припоями с применением активных флюсов на основе хлористых и фтористых солей.

## Контрольные вопросы

1. Как делятся алюминиевые сплавы в зависимости от входящих в них легирующих элементов?
2. В каких отраслях промышленности применяются алюминий и его сплавы для изготовления различных паяных изделий?
3. Что относится к основным особенностям пайки алюминия и его сплавов?
4. Какими способами производится удаление окисной пленки с поверхности алюминиевых сплавов?
5. Как можно повысить коррозионную стойкость соединений из алюминия и его сплавов, паянных оловянно-свинцовыми припоями?
6. Какие металлы используются в качестве технологических покрытий при пайке алюминия и его сплавов и какие существуют способы их нанесения?
7. Применение каких технологических покрытий обеспечивает наиболее высокую коррозионную стойкость паяных соединений из алюминия и его сплавов?
8. Какими припоями и флюсами осуществляется пайка алюминия и его сплавов по технологическим покрытиям?
9. Увеличение содержания какого элемента в припое повышает коррозионную стойкость паяных соединений из алюминия и его сплавов?
10. Какие разновидности флюсов используют для низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов?
11. Какова технология промывки изделий из алюминия и его сплавов после флюсовой пайки?
12. Какими припоями выполняется высокотемпературная пайка алюминия и его сплавов?
13. Какие припои обеспечивают наилучшие коррозионные свойства паяных соединений из алюминия и его сплавов при высокотемпературной флюсовой пайке?
14. С применением каких видов нагрева может производиться высокотемпературная флюсовая пайка алюминия и его сплавов?
15. Какой припой получил наибольшее распространение при пайке алюминиевых сплавов горелками и почему?

16. Какой вид нагрева применяется для пайки крупногабаритных изделий и тонкостенных ажурных конструкций?
17. Применение какого флюса при печной пайке опасно из-за возможности значительного растворения основного металла цинком, выделяющимся из флюса?
18. Для изготовления каких изделий из алюминия и его сплавов применяется индукционная пайка?
19. В чем заключаются преимущества технологии пайки алюминия и его сплавов в солевых ваннах?
20. Какую роль выполняет расплавленная соль в солевой ванне?
21. Каких веществ не должен содержать состав флюсовой ванны для пайки алюминия и его сплавов и почему?
22. Как осуществляется подготовка поверхности деталей из алюминия и его сплавов к пайке в солевой ванне?
23. Какие требования предъявляются к приспособлениям для пайки в солевых ваннах?
24. Как следует обрабатывать изделия из алюминия и его сплавов после флюсовой пайки и почему?
25. Как устраняется основной недостаток флюсовой пайки алюминиевых сплавов?
26. Как осуществляется бесфлюсовая пайка алюминия и его сплавов?
27. Какими методами может производиться лужение паяемых поверхностей под бесфлюсовую пайку?
28. В чем состоят основные трудности соединения алюминия со сталью, медью, никелем и их сплавами и другими металлами и как они преодолеваются?

## **2.5. Пайка титана и его сплавов**

Особенности пайки титана и его сплавов определяются высоким химическим сродством титана к кислороду, азоту и водороду, что является причиной высокой химической и термической стойкости окислов, образующихся на его поверхности. Титан относится к числу металлов-геттеров, интенсивно поглощающих кислород, азот и водород из воздуха, что существенно снижает его пластичность.



На поверхности титана всегда имеет место альфированный слой, то есть слой  $\alpha$ -титана, насыщенный атмосферными газами. Перед пайкой этот слой необходимо удалять пескоструйной обработкой или травлением в водном растворе азотной и соляной кислоты в течение 5–10 минут при комнатной температуре. Однако даже после такой обработки на поверхности титана всё же остается тонкая окисная пленка, препятствующая его смачиванию припоем.

*Высокотемпературную пайку* изделий из титана и его сплавов производят в вакуумных печах, используя средний вакуум, или в обычных печах в специальных контейнерах из нержавеющей стали, продуваемых сухим инертным газом, чаще всего аргоном марки «А», который тщательно очищен от примесей кислорода, азота и паров воды.

Только в исключительно чистой атмосфере или в вакууме оксидная и нитридная пленки, находящиеся на поверхности титана, растворяются при условии, что температура пайки выше 700 °С. Поэтому пайку титана ведут обычно при температурах 800–900 °С, что способствует быстрой очистке его поверхности и хорошему смачиванию припоем. Однако при более высоких температурах пайку титановых сплавов производят редко, так как при длительном нагреве титан склонен к росту зерна и снижению пластических свойств. Однако предел прочности титана и его сплавов при высоких температурах практически не снижается, поэтому в отдельных случаях титановые сплавы соединяют пайкой даже при температуре 1000 °С и выше.

Поскольку водород, всегда находящийся в титане и снижающий его пластичность, удаляется при нагреве в вакууме  $10^{-4}$  мм рт. ст. при температуре около 900 °С, пайка титана в вакууме считается более предпочтительной, нежели пайка в нейтральной атмосфере.

Герметизация контейнера и чистота его внутренней поверхности оказывают очень большое влияние на качество паяного соединения. Даже небольшая течь или неочищенная от окислов внутренняя поверхность контейнера могут быть причиной окисления поверхности паяемого изделия и ухудшения качества паяного шва.

Восстановительные газовые среды, содержащие азот и водород, применяемые для пайки других металлов, для пайки титана *непригодны*, так как активно взаимодействуют с ним при нагреве. Флюсы,

применяемые при пайке сплавов других металлов, также непригодны или малопригодны для пайки титана.

Нагрев соединений из титана и его сплавов при *газовой пайке* рекомендуется производить только после того, как припой уложен в зазор и паяемые поверхности покрыты слоем флюса. Сложность газовой пайки титана и его сплавов заключается в том, что применяемые флюсы, состоящие из хлоридов и фторидов металлов, малоактивны и загрязняют паяемую поверхность, из-за чего по ней плохо растекается припой, не обеспечивая высоких механических характеристик паяного соединения.

При пайке титана и его сплавов необходимо иметь в виду, что в паяном шве титан образует хрупкие интерметаллиды почти со всеми элементами, входящими в припой. Поэтому в качестве основы припоя используются серебро или алюминий, которые образуют с титаном менее хрупкие паяные соединения. Однако серебряные припои достаточно дороги, а припои на основе алюминия дают невысокую прочность соединений и непригодны для ответственных конструкций.

Наибольшее практическое применение при пайке титана и его сплавов нашли серебряные припои систем Ag – Cu (ПСр 72) и Ag – Cu – Mn (ПСр 37,5), которые позволяют получить при пайке в вакуумных печах при температуре 850–1000 °С высокопрочные паяные соединения.

Например, при пайке титана ВТ1-1 чистым серебром в атмосфере аргона получают соединения с пределом прочности ( $\sigma_B$ ) 18–20 кгс/мм<sup>2</sup>, а при пайке серебром, легированным 10–15 % Mn, предел прочности паяных соединений достигает 28 кгс/мм<sup>2</sup>. При этом соединения, паяные чистым серебром, неустойчивы против коррозии, и в течение года в городской атмосфере снижают свою прочность на 25–30 %.

Еще более высокие значения предела прочности паяных соединений можно получить при высокотемпературной пайке титана припоями на основе никеля или меди ( $\sigma_B = 30$  кгс/мм<sup>2</sup>), а также припоями на основе титана (Ti – Zr – Cu – Ni). Однако припои системы Ti – Zr – Cu – Ni хрупкие и не поддаются прокатке традиционными методами, поэтому используются в виде порошков или

стружки (ВПр 16; ВПр 28). В настоящее время из слитков сплавов системы Ti – Zr – Cu – Ni получают ленту припоя толщиной 20 мкм в инертной среде. Производятся аморфные припои (СТЕМЕТ 1201 и СТЕМЕТ 1202) в виде лент толщиной от 20 мкм из сплавов той же системы. Также в качестве припоя используется титан, плакированный с двух сторон медью.

Для получения более пластичных и прочных соединений применяют *диффузионную пайку* титана, сущность которой заключается в том, что изделие паяется минимально необходимым количеством припоя (на паяемые поверхности изделия наносят тонкие слои никеля, меди, цинка, железа, кобальта, серебра или их комбинаций). Затем изделие выдерживается при температуре пайки до тех пор, пока в паяном соединении не образуется пластичный твердый раствор. При таком способе пайки достигается прочность соединений, близкая к прочности основного металла.

Пайка титановых сплавов оловянно-свинцовыми и другими *низкотемпературными* припоями *применяется достаточно редко*. Но если такая пайка производится, то перед пайкой титан покрывают слоем никеля химическим или гальваническим способом. Для увеличения сцепления никеля с титаном его подвергают нагреву до 250 °С в вакууме или инертной среде в течение 1 часа. После этого пайку производят теми же припоями и флюсами, которые применяют для чистого никеля.

Паять титан и его сплавы легкоплавкими припоями возможно также после предварительного лужения деталей оловом, серебром или медью. Горячее лужение титана и его сплавов перед пайкой может быть произведено с помощью реактивных флюсов или погружением паяемых деталей в жидкий металл.

Для покрытия оловом подготовленное под пайку изделие быстро опускают на 10–20 минут в нагретое до 700 °С олово или на деталь наносят слой флюса SnCl<sub>2</sub> в виде порошка и нагревают в печи с нейтральной атмосферой до 350–400 °С. Процесс идет по уравнению



Медное покрытие может быть получено погружением изделия на несколько секунд в расплавленную хлористую медь или ее смесь

с другими хлоридами меди при температуре 650–700 °С. Процесс идет по уравнению



Покрытие титана серебром происходит по аналогичному уравнению



Образовавшийся при нагреве хлорид титана  $\text{TiCl}_4$  в виде газа улетучивается с поверхности металла, разрушая при этом окисную пленку  $\text{TiO}_2$ , а восстановленные олово, медь или серебро покрывают чистую поверхность металла.

После охлаждения деталей остатки флюса должны быть немедленно и тщательно смыты паром или горячей водой (90–100 °С). Детали просушиваются и паяются легкоплавкими припоями с температурой плавления не более 200 °С с применением канифольных флюсов.

### Контрольные вопросы

1. Чем определяются особенности пайки титана и его сплавов?
2. Как называется слой, который всегда имеется на поверхности титана и его сплавов, и как он удаляется?
3. Как производят высокотемпературную пайку изделий из титана и его сплавов?
4. Почему пайка титана в вакууме считается более предпочтительной, нежели пайка в нейтральной атмосфере?
5. Какие требования предъявляются к контейнерам для пайки титана?
6. Почему восстановительные газовые среды, содержащие азот и водород, применяемые для пайки других металлов, для пайки титана непригодны?
7. Какие серебряные припои нашли наибольшее практическое применение при пайке титана и его сплавов?
8. Какие припои на основе титана применяются для пайки титановых сплавов?
9. Почему в качестве основы припоя для пайки титана используют серебро и алюминий?

10. Какими припоями можно получить наиболее высокие значения предела прочности паяных соединений при пайке титана?
11. В чем состоит сущность диффузионной пайки титана?
12. В чем заключаются особенности пайки титана низкотемпературными припоями?
13. Как осуществляется лужение титановых деталей под низкотемпературную пайку?
14. Какой образующийся в процессе лужения титановых деталей газ разрушает окисную пленку  $TiO_2$ ?
15. Как должны обрабатываться детали после выполнения процесса их лужения оловом, медью или серебром перед пайкой?

## 2.6. Пайка драгоценных металлов

Драгоценные металлы и их сплавы отличаются высокой пластичностью, стойкостью к окислению при обычных и повышенных температурах. Сплавы благородных металлов применяют главным образом в ювелирном деле, зубоврачебной технике, медицине и радиоэлектронике.

Техника пайки благородных металлов и их сплавов с другими металлами не представляет трудностей. Важно при этом подобрать цвет припоя, обеспечивающего цвет соединения, что имеет декоративное значение.

Для изделий из золота и серебра рекомендуют специальные ювелирные припои, содержащие в качестве основы золото или серебро и легирующие элементы: медь, цинк, кадмий, олово, придающие припоям различные технологические свойства.

Температура плавления ювелирных припоев колеблется от 650 до 1000–1100 °С. Так как температуры плавления паяемых металлов различны, то и понятие твердости припоев «плавающее» относительно температуры плавления определенного сплава.

Предприятия, производящие ювелирные изделия, используют золотые и серебряные припои, отличающиеся пробой, цветом, температурой плавления. Однако независимо от этого все припои должны обладать хорошей текучестью, пластичностью и прочностью.

В последнее время при пайке серийно выпускаемых ювелирных изделий всё чаще стали применяться пастообразные припои (паяльные пасты) на основе сплавов золота 583-й пробы. Нанесение таких припоев на паяемые изделия осуществляется механизировано с помощью специального дозатора, что повышает производительность труда и улучшает культуру производства. Применение пастообразных припоев при реставрации изделий позволяет легко устранять такие дефекты, как трещины, поры, раковины.

Важнейшим элементом качественной пайки является правильно выбранный припой. Припои в ювелирной промышленности различаются по следующим показателям:

- 1) по основному компоненту (оловянные, кадмиевые, цинковые, магниевые, алюминиевые, медные, серебряные, золотые);
- 2) температуре плавления;
- 3) виду полуфабриката (фольга, лента, проволока, стружка, сетка, литые прутки, фигурные отливки).

Припои должны хорошо смачивать поверхности паяемых деталей, хорошо растекаться, обеспечивая качественное заполнение зазора, образовывать прочные и долговечные соединения. Выбор нужного припоя определяется свойствами основного металла, рабочей температурой припоя, методом пайки.

При нанесении припоя следует строго соблюдать некоторые закономерности. Кусочки припоя по форме должны быть прямоугольного сечения и не должны быть слишком большими или слишком малыми. Укладывать припой необходимо не бессистемно, а в определенной последовательности и только с одной стороны, помня одновременно о том, чтобы его остатки можно было легко удалить.

Располагать припой следует на внутренних, обратных сторонах изделий. Нарезают припой ножницами, а укладывают с помощью пинцета. Нанести припой можно и по типу подвода электрода, как в процессах сварки. Желательно производить пайку множества швов наименьшим количеством припоя.

Для получения качественных паяных соединений и удаления из места пайки окислов применяются флюсы. В качестве флюсов для пайки изделий из благородных металлов используют приготовленные растворы буры и борной кислоты. Выбор флюса зависит

от степени окисления сплава, подлежащего пайке. Чем больше активно окисляющихся добавок входит в состав припоя и чем выше их содержание, тем тщательнее нужно относиться к выбору флюса.

Флюсы, применяемые при пайке ювелирных изделий, должны отвечать следующим требованиям:

- иметь более низкую, чем у припоя, температуру плавления;
- способствовать растеканию припоя;
- удалять из зоны пайки загрязнения;
- не вступать с припоем в реакцию;
- не разрушать паяемые металлы.

Классическим флюсом ювелиров является бура, которая представляет собой натриевую соль тетраборной кислоты. В расплавленном виде бура растворяет окислы металлов. Применяется для пайки изделий из золота, серебра и мельхиора.

В случаях, когда надо паять уже полированные изделия и требуется сохранить их блеск, а также не допустить окисления поверхностей, ювелиры в качестве флюса применяют борную кислоту.

При пайке изделий из сплавов золота, не имеющих в своем составе никеля, используется водный раствор буры с борной кислотой. Ювелиры пользуются флюсом указанного состава в соотношениях 1 : 2 (одна часть буры и две части борной кислоты) и 2 : 1 (две части буры и одна часть борной кислоты). Флюс из буры и борной кислоты в соотношении 1 : 2 улучшает растекание припоя при *пайке изделий из золота*. Флюс из буры и борной кислоты в соотношении 2 : 1 улучшает растекание припоя при *пайке изделий из серебра*.

Однако наиболее универсальным, как показывает практика, является флюс, приготовленный из буры и борной кислоты в соотношении 1 : 1.

Некоторые ювелиры используют в своей практике стандартный, готовый к работе флюс ПВ209, применяемый обычно при процессах пайки в медицинской промышленности.

Нанесение флюса производится смачиванием всей детали с помощью кисточки; при этом недостаточно покрывать флюсом только места пайки. Пайку начинают с осторожного подсушивания пламенем горелки флюса и припоя, чтобы не допустить вспучивания флюса и вытекания в результате этого припоя из стыка. При этом

пламя нельзя направлять непосредственно на припой, так как это приведет не к растеканию припоя по стыку, а к свертыванию (скалыванию) в шарик, т. е. к браку.

Необходимо помнить, что остатки жидкого флюса выделяют хлористый цинк, который травит металл. Чтобы избежать этого, следует иметь под рукой емкость с водой и после каждой пайки проводить по стыку смоченной в воде кисточкой, обезвреживая таким образом кислоту.

В ювелирном производстве различают два способа пайки: пайку вручную с помощью газовых (пламенных) горелок и механизированную пайку в печах с защитной атмосферой.

*Газовая горелка* используется массово и повсеместно. Однако в отдельных случаях ее применение не дает нужного эффекта и тогда пайка ведется с помощью горелок специального назначения: *для точечной пайки и пайки крупногабаритных изделий*.

*Точечная пайка* обеспечивает быстрый, интенсивный нагрев до высоких температур. Применяется только в том случае, если нагрев деталей вне зоны пайки *недопустим*, то есть при соединении тонких сложных деталей, при проведении реставрационных работ, для исправления дефектов литых изделий, для проведения многоступенчатой пайки одного изделия припоем одного состава.

*Пайка крупногабаритных изделий* требует высокотемпературного нагрева всего изделия. Например, при пайке серебряных изделий посудной группы с филигранью, масса которых может достигать 1500 г. Перед началом такой пайки детали филигранного рисунка наклеиваются на корпус заготовки, напайка же их осуществляется с помощью многофакельной горелки, которая позволяет вести одновременный нагрев всей поверхности, заполненной филигранью. Для исключения местного перегрева изделие на время пайки устанавливается на вращающийся столик.

*Механизированная пайка* применяется для изделий из сплавов золота и осуществляется в конвейерных печах с защитной атмосферой. Подготовленные для пайки изделия (с нанесенным припоем) укладывают на металлический поддон, который затем устанавливают на движущуюся ленту. Режим пайки (температура пайки, время) регулируется автоматически.



*Пайка методом микроплазменной сварки* является одной из разновидностей дуговой сварки неплавящимся электродом на очень малых токах (2–30 А) для соединения металла (золота, серебра, меди) толщиной от 0,1 до 1,5 мм. В качестве источника тепла используется сжатая дуга, стабильно горящая между вольфрамовым электродом и изделием в непрерывном или импульсном режиме. Для защиты расплавленного металла используют инертные газы (аргон, гелий) или их смеси.

На предприятиях ювелирной промышленности микроплазменная сварка применяется как метод пайки изделий из золота и серебра, причем процесс такой пайки идет без использования присадочного материала (припоя), то есть шов образуется за счет расплавления основного металла. Наибольший эффект от применения микроплазменной сварки достигается при пайке изделий массового назначения, например, колец, а также филигранных изделий (пайка зерни).

При пайке ювелирных изделий применяются два основных типа соединений: внахлестку и встык, при необходимости их можно сочетать. Соединения встык используют при пайке изделий, не требующих особой жесткости, герметичности и прочности. Соединения внахлестку обеспечивают наиболее прочный и надежный шов; ими пользуются во всех возможных случаях. Так называемые скошенные соединения являются разновидностью соединения встык. Они позволяют увеличить площадь соединяемых поверхностей, но значительно затрудняют качественную подгонку деталей.

До начала процесса пайки необходимо тщательно очистить соединяемые поверхности от загрязнений и окислов химическим или механическим способом. Наиболее эффективным для удаления загрязнений считается химический метод очистки. Он ведется с помощью четыреххлористого углерода, трихлорэтилена или тринатрийфосфата.

Механическая очистка производится с помощью напильника, надфиля, шáбера, наждачной шкурки, проволочной (стальной) или стеклянной щетки. При этом нужно соблюдать осторожность, чтобы не повредить соединяемый зазор. При необходимости после механической очистки следует произвести еще и химическую.

Поверхности паяемых деталей состыковывают друг с другом с большой точностью и плотностью.

При пайке замкнутых пустотелых деталей необходимо проделать в них (в малозаметных местах) небольшие отверстия для беспрепятственного выхода воздуха. Иначе, нагреваясь и расширяясь, воздух может вспучить деталь и даже разорвать ее. Чтобы снять внутренние напряжения, оставшиеся после предшествующей обработки, и избежать возможных излишних дефектов, соединяемые детали подвергают отжигу.

Перед пайкой прессованных деталей и изделий следует тщательно проверить, нет ли в них трещин или дырочек, которые при пайке, вследствие затекания припоя, расширятся, что неизбежно приведет к некачественной пайке, то есть браку.

При пайке слабоподвижных шарнирных соединений, а также пружинных замков браслетов можно избежать затекания припоя в зазоры, проложив маленькие кусочки бумаги или картона.

Перед пайкой при ремонте полых цепочек и полых звеньев браслетов места поломки опиливают и между стыками перпендикулярно к ним вставляют тонкую серебряную пластинку. На обе стороны пластинки наносят припой, паяют, а после пайки выступающие концы пластинки опиливают.

В процессе пайки детали располагают на специальной подкладке — асбестовом листе. Пайку нельзя начинать, не произведя фиксацию деталей. При ручном изготовлении ювелирных украшений пригодны традиционные методы фиксации: удерживание пинцетом, круглогубцами, укрепление с помощью проволоки, булавок, зажимов.

В условиях массового производства незаменимым способом фиксации деталей перед пайкой является контактная пайка-прихватка. Детали помещают в соответствующих форм выемки съемных матриц, закрепляемых на опорной плите. Затем к деталям подводят электрод. Соединение деталей в определенных точках происходит за счет местной пластической деформации, которая вызывается нагревом электрическим током.

При этом электроды, проводящие ток, одновременно играют роль пуансонов для осадки металла в нагретой зоне. Способ этот

пригоден для абсолютного большинства ювелирных украшений. Точечный паяный шов между деталями достаточно прочен, чтобы выдержать впоследствии нанесение флюса, припоя, транспортировку деталей к месту пайки, которая должна осуществляться немедленно после очистки соединяемых поверхностей.

### **Пайка серебра**

Низкотемпературную пайку серебра можно производить с помощью олова. На первый взгляд такое соединение является крепким, но металлы реагируют друг с другом, и изделие через некоторое время рассыпается. Поэтому для пайки серебра необходимы припои, представляющие собой сплавы серебра с другими металлами. Такие сплавы близки к серебру по показателям надежности, прочности и коррозионной стойкости.

Чем выше в припое содержание серебра, тем более прочным он считается. В зависимости от изменения доли серебра меняются температура плавления припоя, его плотность, удельное сопротивление.

Чаще всего для пайки серебра используют припои ПСр 3, ПСр 10, ПСр 15, ПСр 25. Припои ПСр 2,5; ПСр 15 и ПСр 25 можно использовать при пайке изделий, которые не испытывают значительных нагрузок на шов. Для получения высокопрочного соединения используют припой ПСр 45, ПСр 65. Если необходима особая прочность соединения и высокая защита от коррозии, то пайку производят припоем ПСр 72 или ПСр 90, обладающими еще более высокими прочностными свойствами, однако имеющими высокую стоимость.

Для качественной пайки необходимо обеспечить удаление окислов в месте соединения, что осуществляется с помощью флюсов из порошковой буры (декагидрат тетрабората натрия) или поташа (карбонат калия).

В настоящее время ювелирными предприятиями применяется около 30 видов серебряных припоев. К серебряным припоям не предъявляют такие жесткие требования, как к золотым, им не обязательно соответствовать пробе изделия. Содержание серебра в ювелирных припоях колеблется от 50 до 80 %. Как правило, серебряные припои являются трехкомпонентными (Ag – Cu – Zn),

но встречаются двухкомпонентные (без участия цинка) и четырехкомпонентные (с добавкой кадмия или олова). Ювелирные серебряные припои обладают высокой пластичностью, прочностью и хорошей текучестью.

Для пайки серебра можно использовать активный флюс ПВ209, состоящий из борного ангидрида (до 35 %), фтористого калия (до 42 %) и тетрабората калия (до 23 %), а также канифольный флюс для условий низкотемпературной пайки.

Мелкие детали соединяют перед пайкой с помощью паяльника, используя небольшое количество серебряного припоя.

Для пайки более крупных деталей с применением серебряного припоя используется газовая горелка, имеющая температуру пламени до 1300 °С.

### **Пайка золота**

Процесс пайки золотых изделий не отличается от пайки других металлов. Нюанс заключается в том, что детали золотых изделий, которые необходимо припаять друг к другу, имеют довольно малые размеры.

Различие состоит также в применяемых инструментах. Для пайки золота не применяют паяльник, так как припой для пайки золотых изделий имеет высокую температуру плавления. Поэтому работа ведется газовой горелкой.

Расплавленный припой должен смачивать место соединения и заполнять зазор в месте соединения. Консистенцию расплава следует поддерживать в таком состоянии, чтобы он не стекал с детали, удерживаясь силами поверхностного натяжения.

Нагрев не должен прекращаться до тех пор, пока припой не сравняется по цвету с материалом изделия. Это является сигналом того, что содержащийся в нем кадмий выгорел и процесс пайки может быть завершен.

Если присадочный материал был выбран правильно, а шлифовка выполнена качественно, место пайки на глаз определяться не должно.

Изделия из золота могут иметь при равной пробе различный цвет, поэтому для их реставрации применяют припой желтого и белого цвета.

Для реставрационных целей используются *низкотемпературные* припои на основе галлия. Кроме галлия и золота в состав таких припоев входят медь, серебро, никель, индий, олово. Все припои на основе галлия при затвердевании расширяются, что обеспечивает хорошее заполнение припоем имеющихся трещин.

Золотые припои служат для пайки золотых и платиновых изделий. Проба их должна соответствовать пробе изделия, и поэтому существуют припои всех узаконенных проб для золотых ювелирных изделий, изготавлиющихся при помощи пайки. На каждую из проб предусмотрено несколько припоев, различных по цвету и температуре плавления.

Кроме традиционно применяющихся методов пайки с нагреванием изделий или мест пайки пламенем горелки разработаны методы пайки в электропечи при равномерном нагревании в атмосфере инертного газа (азота) или восстановительном пламени.

При нагревании участка пайки восстановительным пламенем происходит экзотермическая реакция, при которой цинк взаимодействует с металлом с образованием более легкоплавкого, чем основной металл, сплава, играющего роль припоя. Этот припой хорошо смачивает поверхность металла и затекает, затягивается в узкие щели и трещины.

Легкоплавкость, текучесть, разность цветов и оттенков золотых припоев достигаются путем введения в их состав серебра, меди, кадмия, цинка, палладия и никеля.

Серебро, входящее в состав припоя, понижает температуру его плавления, повышает текучесть и пластичность, делает его цвет более светлым. Медь препятствует легкоплавкости припоя, повышает его прочность и придает ему красноватые оттенки. Кадмий понижает температуру плавления и придает припою зеленоватый оттенок. Цинк понижает температуру плавления, улучшает текучесть и делает более светлым цвет припоя. Палладий входит в состав золотых припоев белого цвета, повышает температуру плавления припоя и окрашивает его в белый цвет. Никель, как и палладий, придает

припою белый цвет, поэтому используется как составной компонент белого золотого припоя, повышает его прочность и температуру плавления.

В ювелирной промышленности при производстве ювелирных изделий используют припои четырех проб: 750, 583, 500, 375.

К стандартным золотым припоям для пайки золотых изделий 583-й пробы, применяемым на предприятиях ювелирной промышленности, относятся ПЗл 585-I, ПЗл 585-II, ПЗл 585-III и т. д., к нестандартным – припои ПЗл 585-143, ПЗл 585-202, ПЗл 585-90.

К стандартным золотым припоям для пайки золотых изделий 750-й пробы, применяемым на предприятиях ювелирной промышленности, относятся ПЗл 750-70, ПЗл 750-95, ПЗл 750-87 и др. К нестандартным – припои марок ПЗлМЦ 750-60, ПЗлМКЦ 750-87, ПЗлМНЦ 750-100 и др.

Цвет золотых припоев делят на желтый и белый. Желтые припои употребляются для пайки золота различных желтых оттенков и поэтому имеют красноватые, оранжевые, желтые, зеленоватые цвета. Белые припои по цвету напоминают платину и применяются для пайки изделий из белого золота и платины. К желтым припоям относятся припои марок ПЗл 750-62, ПЗл 750-130, ПЗл 750-150 и др. К белым припоям относятся припои ПЗл 750-0, ПЗл 750-105, ПЗл 750-55, ПЗл 750-130-I и др.

Существуют также золотые припои 500-й и 375-й проб, которые используются при пайке реставрируемых и ремонтируемых изделий. Для пайки изделий 500-й пробы используются припои марок ПЗл 500-200, ПЗл 500-250-I, ПЗл 500-300 и др. Для пайки изделий 375-й пробы используются припои марок ПЗл 375-285, ПЗл 500-250-I, ПЗл 500-300 и др.

Универсальным флюсом для пайки золота и серебра является паста из смеси буры с борной кислотой (1 : 1).

К золотым изделиям с содержанием никеля рекомендуется применять двойное флюсование. Для этого, перед тем как нанести буру на место пайки, изделие следует прокипятить в густом растворе борной кислоты. На прокипяченном изделии образуется тонкая плотная пленка, предохраняющая его от окисления. После этого

на изделие наносят флюс насыщенного раствора буры, и изделие готово к пайке. Так же, как изделия, перед пайкой офлюсовываются и припой.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы характерные особенности драгоценных металлов и их сплавов и в каких отраслях производства они находят свое применение?
2. Какие припои рекомендуются для пайки изделий из золота и серебра?
3. В каких пределах колеблется температура плавления ювелирных припоев и как они называются в зависимости от температуры их плавления?
4. В чем состоит преимущество применения пастообразных припоев (паяльных паст) на основе сплавов золота 583-й пробы?
5. По каким показателям различаются припои в ювелирной промышленности?
6. По каким показателям выбирается нужный припой при пайке драгоценных металлов?
7. Что используют в качестве флюсов для пайки изделий из благородных металлов?
8. Каким требованиям должны отвечать флюсы, применяемые при пайке ювелирных изделий?
9. Какой флюс является классическим флюсом ювелиров и из чего он состоит?
10. Какой флюс нужно применять в случаях, когда надо паять уже полированные изделия и требуется сохранить их блеск и не допустить окисления поверхностей?
11. Какой флюс является наиболее универсальным для пайки серебряных и золотых изделий?
12. Какие два способа пайки практикуются в производстве ювелирных изделий?
13. Каковы особенности выполнения точечной пайки ювелирных изделий?
14. Как выполняется пайка крупногабаритных ювелирных изделий?

15. Как осуществляется механизированная пайка изделий из сплавов золота?
16. Что такое пайка методом микроплазменной сварки и как она осуществляется при изготовлении ювелирных изделий?
17. Какие типы соединений применяются при пайке ювелирных изделий?
18. Как осуществляется подготовка под пайку соединяемых поверхностей ювелирных изделий?
19. Как производится фиксация паяемых деталей при ручном изготовлении ювелирных украшений и в массовом производстве?
20. Какие припои применяются для пайки серебра?
21. Как влияет на прочность паяного изделия количество серебра в припое?
22. В каких пределах колеблется содержание серебра в ювелирных припоях? Предъявляют ли к серебряным припоям жесткие требования соответствия пробе материала изделия?
23. Какие источники нагрева применяются для пайки мелких и крупногабаритных серебряных изделий?
24. Какое оборудование применяют для пайки изделий из золота?
25. Какие по цвету припои используются для пайки золотых изделий?
26. Какие легирующие элементы входят в состав золотых припоев?
27. Существуют ли для золотых припоев жесткие требования соответствия пробе материала изделия?
28. Какое влияние оказывают серебро, медь, кадмий, цинк, палладий и никель при введении в состав золотых припоев на их легкоплавкость, текучесть, разность цветов и оттенков?
29. Припои каких проб используют в промышленности при производстве золотых ювелирных изделий?
30. Какие существуют рекомендации по пайке золотых изделий с содержанием никеля?



## Выводы

Данный раздел учебного пособия посвящен описанию технологических возможностей получения качественных паяных соединений с оптимальными механическими, физическими и химическими свойствами из различных металлов и их сплавов.

В разделе рассмотрено получение паяных соединений из таких металлов, как сталь, чугун, медь, никель, алюминий, титан и их сплавы, с использованием различных источников нагрева, режимов пайки, технологических и вспомогательных материалов. Рассмотрены также особенности технологических процессов пайки драгоценных металлов.

Отмечены основные различия между низкотемпературной и высокотемпературной пайкой рассматриваемых в данном разделе пособия металлов и их сплавов.

Определено влияние различных технологических факторов на качество получаемых паяных соединений. Рассмотрены методы автоматизированной пайки изделий в условиях промышленного производства.

Приведены практические примеры подбора режимов пайки, технологических и вспомогательных материалов для получения качественных паяных соединений из различных металлов и их сплавов, а также выбора оборудования для выполнения пайки на различных температурных режимах.

Отмечены основные трудности, возникающие при создании надежных паяных соединений из металлов и их сплавов. Определены причины возникновения при пайке неблагоприятных технологических факторов и методы уменьшения их влияния.

Представленные в данном разделе материалы дают информацию, необходимую для проектирования эффективных технологических процессов пайки металлов и их сплавов, и могут быть полезны при разработке и внедрении в производство методов управления качественными характеристиками паяных изделий.

## **Раздел 3. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ**

### **3.1. Пайка металлов с керамикой**

Изделия, выполненные пайкой металла с керамикой, находят широкое применение в электротехнической, радиоэлектронной промышленности, точном приборостроении и криогенной технике.

Существует несколько способов получения паяного соединения металла с керамикой:

- 1) пайка припоями предварительно металлизированной керамики (осуществляется аналогично пайке металлов);
- 2) активная пайка с использованием титана и циркония в качестве компонентов припоя;
- 3) пайка стеклоприпоем (глазурью);
- 4) пайка без спекания металлизационного слоя (по сырому металлизационному слою);
- 5) пайка неметаллизированной керамики под давлением.

#### **Пайка металлизированной керамики**

Данный способ получения металлокерамических соединений является многоступенчатым, так как вначале производится металлизация поверхности керамической детали (нанесение тонкого слоя металла), затем осуществляется пайка металлизированной детали с металлом. В состав металлизационного покрытия обычно входят:

- порошок молибдена или вольфрама в количестве 75–95 % (по массе);
- активные добавки марганца, кремния, титана (гидрата титана), железа, бориды молибдена, ферросилиция, стекла и др.

Выбор добавок определяется химическим составом материала керамической детали и температурой спекания металлизационного покрытия, в процессе которого происходит закрепление слоя металлизации на ее поверхности.

Главным условием для создания вакуумно-плотного и прочного соединения керамики с металлом является обеспечение хорошей когезии (сцепления) между керамической поверхностью и слоем нане-

сенного металла. Данная проблема тщательно изучалась. В результате были разработаны различные способы металлизации керамики, среди которых наиболее часто используемыми являются *твердофазный способ* и *способ с использованием активного металла*.

*Твердофазный способ* заключается в том, что суспензия тонко измельченного в растворе нитроцеллюлозы порошка металла (вольфрама, молибдена, железа или никеля) наносится кистью или как-либо иначе на керамику в виде полосы – точно по месту спая. Покрытая суспензией керамика отжигается в атмосфере водорода при температуре несколько ниже точки размягчения керамики, как правило, в интервале температур 1300–1600 °С.

Для того чтобы полученную металлизированную керамику можно было паять, необходимо второе покрытие, которое хорошо смачивалось бы расплавленным припоем. Для этого используют никель, железо или медь, которые обычно наносятся гальваническим методом. Прочность соединения металлической пленки с керамикой улучшается, если к порошку металла добавить марганец. Обычно порошкообразная смесь для алюмооксидной керамики состоит из молибдена и марганца в массовом соотношении 4 : 1. Считается, что марганец в процессе отжига окисляется и образует с  $\text{SiO}_2$  фазу, обладающую низкой температурой плавления, которая затем прочно связывается с молибденом.

Поэтому данный способ соединения керамики с металлом может быть успешно реализован только в том случае, если керамика содержит не менее 1,5 % стекловидной фазы  $\text{SiO}_2$ . В некоторых случаях в металломарганцевую смесь добавляют  $\text{SiO}_2$  в виде порошка для обеспечения вакуумно-плотных и прочных соединений с чистой алюмооксидной керамикой (>98 % чистоты).

*Использование активного металла* при соединении керамики с металлом основано на использовании легкоокисляемых активных металлов, таких как цирконий, тантал и титан, которые образуют прочную химическую связь при сплавлении с керамикой. Цирконий, тантал и титан обладают очень высокой температурой плавления (около 1700 °С), поэтому для получения соединений с более низкой рабочей температурой используются либо сплавы этих металлов, либо их гидриды.

Для получения такого соединения на поверхность керамической детали наносится суспензия гидрида титана или циркония, а затем она нагревается в вакууме до температуры разложения гидрида (около 600 °С). В результате нагрева керамическая деталь покрывается слоем металла и в дальнейшем может быть припаяна к металлу обычным способом.

Несмотря на то, что данный способ освоен промышленностью, прочность получаемого соединения несколько ниже, чем в случае применения твердофазного способа.

Однако для алюмооксидной керамики высокой чистоты ни один из рассмотренных способов соединения не подходит. Поэтому для нее был разработан метод соединения, основанный на использовании смеси оксидов с добавлением порошка оксида молибдена. Хорошие результаты получены при металлизации алюмооксидной керамики методом напыления.

Но вне зависимости от того, какой процесс металлизации керамики выбран, очень важно, чтобы соединяемые детали были тщательно очищены и не имели механических дефектов, таких как трещины или неровности.

Таким образом, основными технологическими процессами получения металлокерамических соединений при использовании любого способа металлизации керамики являются:

- 1) приготовление и нанесение металлизационной пасты на поверхность керамической детали;
- 2) закрепление металлизационной пасты на поверхности керамической детали (вжигание);
- 3) нанесение второго металлизационного слоя;
- 4) пайка узла.

Для первого слоя металлизации могут быть использованы пасты на основе смеси оксидов молибдена и марганца. Их наносят тонким слоем и вжигают (закрепляют на поверхности детали). Температура вжигания для керамических материалов, содержащих 6–20 % стекла, составляет 1250–1450 °С. Уменьшение содержания в керамике стекла приводит к повышению температуры вжигания до 1500–1650 °С.

Вжигание металлизационной пасты обычно производится в смеси азота и водорода при соотношении от 1 : 3 до 1 : 1 в электропечах конвейерного типа ПВТ-6, К-265. Точка росы газа – 10–33 °С.

При вжигании оксиды металлов хорошо смачивают поверхность керамики. Последующее частичное поверхностное восстановление оксидов позволяет получить на поверхности керамической детали металл и создать тем самым металлическую поверхность, которая смачивается припоем при пайке.

После закрепления первого слоя наносится второй слой (никель, железо, медь) методом химического осаждения или гальваническим методом. Перед никелированием детали травят в смеси соляной и азотной кислот в течение 4–8 секунд и промывают в проточной воде. При сборке под пайку существенное значение имеет размещение припоя.

Пайку осуществляют высокотемпературными припоями в интервале температур 780–1100 °С в печах с защитной атмосферой как периодического, так и непрерывного действия.

В качестве материалов припоев используют чистую медь, серебро, золото, а также сплавы на их основе. В настоящее время разработаны различные марки припоев, различающиеся температурой плавления.

Режимы пайки металлокерамических узлов существенно отличаются от режимов, применяемых при пайке металлов. Это объясняется спецификой физико-химических процессов, протекающих при пайке металлизированной керамики, и свойствами керамического материала. Основными параметрами режимов пайки являются время выдержки и температура.

Последовательность технологических этапов соединения металла с керамикой показана на рис. 4.

Основной проблемой изготовления металлокерамических узлов (соединения металла с керамикой) является большое различие коэффициентов теплового расширения основных типов конструкционных материалов (металлов и керамики). Устраняется данная проблема выбором специальных конструкций соединения металла с керамикой, в которых различие коэффициентов теплового расширения скомпенсировано.

Для металлокерамических узлов, изготовленных с применением пайки, особое значение имеет сохранение вакуумной плотности в условиях эксплуатации и хранения.



Рис. 4. Последовательность технологических этапов соединения металла с керамикой

### **Активная пайка с использованием титана и циркония в качестве компонентов припоя**

Вторым наиболее распространенным методом получения паяных соединений керамики с металлами является *метод активной пайки*, или одноступенчатый метод. Сущность его заключается в использовании титана и циркония в качестве активных составляющих металлического припоя. Титан и цирконий способствуют растеканию припоя по поверхности керамики.

Можно выделить три наиболее характерные разновидности этого метода:

1) пайку керамики непосредственно с титаном или цирконием, при этом активные компоненты переходят в припой в результате растворения металлических манжет, соединяемых с керамикой;

2) пайку керамики с предварительным нанесением на место соединения порошка активного металла или его гидрида;

3) пайку керамики с применением активных припоев, то есть припоев, содержащих титан или цирконий.

Основным достоинством одноступенчатого метода является его простота, так как не требуется предварительная металлизация керамики.

Однако метод активной пайки имеет и свои недостатки, а именно:

1) процесс пайки необходимо проводить либо в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст., либо в среде инертного газа, не содержащего кислород и пары воды (кислорода не более 0,0001 % по объему, точка росы не выше  $-70$  °С);

2) температурные коэффициенты линейного расширения керамики и металла должны быть близкими во всём диапазоне температур.

Несмотря на кажущееся разнообразие способов активной пайки, в основе протекающих процессов лежит взаимодействие активного металла с окислами керамики, при этом титан (или цирконий), являясь межфазно-активной добавкой, растворяясь в припое, обеспечивает растекание активного сплава по поверхности неметаллизированной керамики.

Титан образует эвтектические сплавы почти со всеми металлами. Поэтому при пайке по активной технологии во всех случаях образуются высокоактивные сплавы, взаимодействующие с неметаллизированной керамикой и обеспечивающие ее прочное соединение металлом.

Химическая природа протекающих процессов заключается в следующем. Активные металлы (титан или цирконий) при контакте с керамическими окислами в условиях вакуума и повышенных температур частично их восстанавливают с образованием в пограничной зоне сложных растворов *внедрения* и *замещения*. При взаимодействии чистых окислов  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  с титаном  $Al_2O_3$  частично восстанавливается (при температуре 950 °С) и отдает кристаллической решетке титана кислород с образованием *твердого раствора внедрения*.

В свою очередь, алюминий, освободившийся при восстановлении  $Al_2O_3$ , также растворяется в титане, но с образованием *твердого раствора замещения*.

При взаимодействии  $\text{SiO}_2$  с титаном образуется твердый раствор кислорода в титане и появляются интерметаллические соединения титана с кремнием, так как последний не дает твердых растворов с титаном.

Данные процессы являются определяющими в механизме образования металлокерамических соединений по активной технологии, а припой облегчает перенос активного металла к керамике и, кроме того, заполняет зазоры между керамикой и металлом.

Применяя гидриды титана (или циркония) и активные припои, можно получать металлокерамические соединения со многими конструкционными материалами без металлизации керамики, при этом чем ближе значения температурных коэффициентов линейного расширения керамики и металла, тем выше эксплуатационная надежность полученных узлов.

Для пайки металлокерамических узлов по активной технологии можно использовать любое вакуумно-термическое оборудование, обеспечивающее вакуум  $10^{-5}$  мм рт. ст. и заданную температуру нагрева.

### **Пайка керамики с металлами стеклоприпоем (глазурью)**

Соединение керамики с металлами тонкими прослойками стекла является наиболее старым способом получения металлокерамических соединений.

По химическому составу стеклоприпои представляют собой смеси окислов металлов, имеющие такие же температурные коэффициенты линейного расширения, как у керамики, и необходимые температуры размягчения.

Пайка металлокерамических соединений стеклоприпоем основана на хорошей адгезии керамики и стеклоприпоя за счет того, что керамика содержит окислы либо те же, что и припой, либо близкие по свойствам. С другой стороны, получение металлокерамических соединений основано на том, что процессы пайки проводят в таких условиях, когда на металле появляется тонкая пленка окисла, способствующая хорошему адгезионному сцеплению стеклоприпоя с металлом.



Разновидностями стеклоприпоев являются стеклокристаллические припои (стеклоцементы), которые отличаются от стеклоприпоев тем, что они кристаллизуются при нагреве до определенной температуры. При этом температура размягчения стеклоприпоя значительно выше.

Для пайки в *окислительной среде* пригодны стеклоприпой системы  $\text{SiO}_2 - \text{ZnO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{PbO}$ , а для изделий с более высокой температурой эксплуатации – припой системы  $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$ .

Для пайки в *восстановительной среде* стеклоприпой не должны содержать легковосстанавливающихся окислов металлов, поэтому, как правило, применяют стеклоприпои на базе окислов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{BaO}$ .

Получение стеклоприпоев сводится к приготовлению шихты, варке и измельчению стеклообразной массы в порошок. Припои варят в корундовых или платиновых тиглях. После осветления массы жидкий стеклоприпой выливают в холодную воду. Затем гранулы припоя размалывают в спирте в фарфоровых или яшмовых барабанах. Из тонкоизмельченного порошка стеклоприпоя изготавливают припойные кольца путем протягивания, прессования или прокатывания ленты и последующей штамповки.

В некоторых случаях для придания кольцам стеклоприпоя большей механической прочности их спекают при температуре на 200–300 °С ниже, чем температура последующей пайки.

Однако чаще всего стеклоприпои используют в виде пастообразных смесей, которые наносят на поверхности сопрягаемых деталей.

При изготовлении узлов наносят 1–2 слоя стеклоприпоя на керамическую и металлическую детали в месте их соединения. Затем оплавливают каждый слой в печи. После этого наносят последний тонкий слой стеклоприпоя и без спекания производят сборку по коническим поверхностям.

Собранный узел поступает на окончательную пайку. Под действием сжимающего груза в момент размягчения стеклоприпоя происходит посадка конусных обойм на изолятор с образованием тонкого слоя припоя между металлом и керамикой.

При высокой температуре плавления стеклоприпоев пайку производят в восстановительной или нейтральной среде с использова-

нием манжет из тугоплавких металлов и сплавов, например вольфрама, молибдена или сплавов вольфрама и молибдена с рением. Последние предпочтительнее, так как они обладают более высокой температурой рекристаллизации.

### **Пайка керамики с металлом без спекания металлизационного слоя**

Этот способ соединения сводится к нанесению на керамическую деталь металлизационной пасты и последующей пайке медью или медно-золотыми припоями. Основными условиями получения соединений являются смачиваемость припоем сырого металлизационного слоя и химическая реакция между керамикой и покрытием.

Составы металлизационных паст:

- обыкновенная молибден-марганцевая паста (Mo80; Mn20);
- молибден-марганцевая паста с добавкой титана или двуокиси титана (Mo80; Mn15; TiO<sub>2</sub>5).

Пайку узлов следует проводить в водороде или форми газе с точкой росы от  $-20$  до  $+5$  °С, то есть в таком температурно-газовом режиме, когда имеется возможность окисления компонентов пасты, но в то же время обеспечивается удовлетворительное смачивание соединяемых деталей жидким припоем. В качестве конструкционного металла применяют ковар, реже молибден или медь.

### **Пайка неметаллизированной керамики под давлением**

Данный способ в значительной степени напоминает диффузионную сварку. Процесс получения соединений сводится к сборке узла, расплавлению припоя с выдержкой 3–5 мин без давления и с последующей выдержкой под давлением в течение 8–10 мин. Затем температура снижается и узел охлаждается под давлением 0,4–0,5 кгс/мм<sup>2</sup> до комнатной температуры.

Так же как и для диффузионной сварки, в этом случае конструкции соединений торцовые компенсированные. В качестве материала манжет могут быть использованы ковар, железоникелевые сплавы и молибден при пайке медью и медь при пайке ПЗЛМ 35.

Также керамика может быть соединена с металлом термокомпрессионным способом. Разработано устройство, с помощью которого

посеребренная муфта из инконеля обжимается вокруг конического конца керамической трубы, создавая вакуумно-плотное соединение.

Керамика может соединяться с металлом также посредством стеклоцементов, особенно расстекловывающегося типа с высокой температурой плавления.

Проводились успешные эксперименты по соединению керамики с металлом методом прессования при повышенных температурах в условиях вакуума или в среде инертного газа. Однако использование этого метода ограничено ввиду того, что он пригоден только для соединения деталей встык или в дисковых соединениях.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют способы получения паяных соединений керамики с металлами?
2. Какие элементы обычно входят в состав металлизационного покрытия?
3. Чем определяется выбор добавок металлизационного покрытия?
4. Что является главным условием создания вакуумно-плотного и прочного соединения керамики с металлом?
5. В чем заключается твердофазный способ металлизации керамики?
6. В какой защитной атмосфере и при какой температуре отжигается керамика, покрытая суспензией?
7. Какие химические элементы применяют для создания второго металлизированного покрытия, обеспечивающего хорошую смачиваемость расплавленным припоем?
8. На чем основан способ использования активного металла при соединении керамики с металлом?
9. Какой метод предложен для соединения алюмооксидной керамики высокой чистоты с металлом?
10. Какие требования предъявляются к поверхности соединяемых деталей вне зависимости от того, какой выбран процесс металлизации керамики?
11. Перечислите основные технологические процессы получения металлокерамических соединений.
12. Какие материалы используют для нанесения первого слоя металлизации?

13. В какой среде и на каком оборудовании производится вжигание первого слоя металлизации?
14. Каким методом наносится второй слой металлизации после закрепления первого слоя?
15. Какие припои используют при пайке металлокерамических узлов?
16. Чем объясняется отличие режимов пайки металлокерамических узлов от режимов, применяемых при пайке металлов?
17. Что является основной проблемой изготовления металлокерамических узлов?
18. В чем заключается сущность метода активной пайки металлокерамических узлов?
19. Какие существуют наиболее характерные разновидности метода активной пайки металлокерамических узлов?
20. Что является основным достоинством метода активной пайки?
21. Что относится к недостаткам метода активной пайки?
22. В чем заключается химическая природа протекающих процессов при активной пайке металлокерамических узлов?
23. Какое оборудование можно использовать для пайки металлокерамических узлов по активной технологии?
24. Что представляют собой стеклоприпои по химическому составу?
25. На чем основывается получение металлокерамических соединений при пайке стеклоприпоем?
26. Какие стеклоприпои пригодны для пайки в окислительной среде?
27. Какие стеклоприпои применяются для пайки в восстановительной среде и почему?
28. Какова технология получения стеклоприпоев?
29. Какова последовательность выполнения операций при пайке узлов стеклоприпоем?
30. В чем заключается сущность пайки керамики с металлом без спекания металлизационного слоя?
31. Каков химический состав металлизационных паст?
32. Что представляет собой процесс получения соединений при пайке неметаллизированной керамики под давлением?

## 3.2. Пайка металлов со стеклом и кварцем

### Пайка металлов со стеклом

Достижения современной электровакуумной техники тесно связаны с успехами в области получения вакуумно-плотных спаев различных металлов со стеклами разных марок, в том числе и с кварцем, при изготовлении электровакуумных и полупроводниковых приборов в стеклянных оболочках.

Расплавленное стекло хорошо смачивает все металлы при условии наличия на поверхности металла адсорбирующего слоя окисла и его нагрева до соответствующей температуры. Образование прочного соединения между металлом и стеклом зависит от таких факторов, как:

- напряжение в зоне спая,
- наличие газовых пузырей,
- процесс электролиза,
- процесс расстекловывания стекла.

Спаи металла со стеклом могут быть согласованными и несогласованными. Согласованные спаи образуются между стеклом и металлом с равными или близкими температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) во всем интервале температур от 20 °С до температуры пайки. Несогласованные спаи образуются между стеклом и металлом с резко различными ТКЛР. Обеспечение прочности в этом случае достигается конструктивным решением металлической детали, которая должна свободно деформироваться вслед за деформацией стекла.

Качество спая в значительной степени определяется:

- адгезией стекла к металлу;
- подготовкой поверхности металла;
- геометрическими размерами спаиваемых деталей;
- конструктивным исполнением спая;
- технологическими приемами изготовления, обработки и отжига как исходных материалов, так и готового спая;
- правильностью расчета теплоотвода от металлических деталей, подверженных тепловым нагрузкам.

Пайка металла со стеклом имеет много общего с пайкой металла с керамикой. Различаются два типа стекол в зависимости от температурного коэффициента линейного расширения:

- 1) твердые стёкла с низким ТКЛР,
- 2) мягкие стёкла с высоким ТКЛР.

При температурах в пределах 20–350 °С для твердых стекол температурный коэффициент линейного расширения равен  $3,2–5,0 \cdot 10^{-6}$ , а для мягких –  $8,8 \cdot 10^{-6}$ .

Для получения согласованного спая соединяемые со стеклом металлы должны иметь весьма близкие ТКЛР. К таким металлам относятся молибден, вольфрам и их сплавы с танталом, ковар (54 % Fe, 29 % Ni и 17 % Co), сплав фернико-1 (54 % Fe, 31 % Ni и 15 % Co), а также ферроникель с 43 % Ni.

*Низкотемпературная* пайка стекла с металлами может проводиться после металлизации стекла, которая осуществляется такими способами, как:

- спекание суспензией порошков металлов,
- испарение и конденсация в вакууме,
- восстановление из окислов,
- охлаждение металлов из аэрозолей и соединений,
- катодное распыление.

Поверхность стекла перед нанесением металлизированного слоя обрабатывается абразивами, так как она должна иметь определенную шероховатость. Припои, применяемые для пайки металла с металлизированным слоем на стекле, не должны его растворять.

Меднённые поверхностные слои следует паять свинцовыми припоями типа ПСр 3, ПСр 2,5, а посеребрённые слои – припоями с содержанием 2 % Ag. Для лучшего сцепления металлического слоя со стеклом к суспензии серебра добавляют окись меди.

Неметаллизированное стекло может быть соединено с металлом с применением галлиевого припоя состава 39,6 % Ga – 4,4 % Sn – 56 % Cu.

Возможно также нанесение на металл нескольких слоев стекол с различными ТКЛР для снижения остаточных напряжений в несогласованном спае. Пайка металлов со стеклом может проводиться с использованием активных припоев, в состав которых входят титан, цирконий или их гидриды.

Спаи металла со стеклом бывают следующих видов: бусиновые, ленточные, сжатые, трубчатые рантовые, дисковые, окошечные.

При пайке металлов со стеклом используют следующие виды нагрева:

- 1) газовый нагрев,
- 2) индукционный нагрев,
- 3) нагрев в печах,
- 4) нагрев сопротивлением.

*Газовый нагрев* применяют для бусиновых и ленточных спаев, для изготовления гребешковых и плоских ножек. Эти виды соединений выполняются при радиационном нагреве горелкой в печах, с помощью простых приспособлений или на универсальных горизонтально-заварочных станках для стеклодувных работ.

*Индукционный нагрев* целесообразно применять для изготовления рантовых, дисковых и других типов соединений. При этом используют генераторы мощностью до 30 кВт и специальное оборудование.

Для сплавления слоя стеклянной пасты, наносимой на поверхность металла для предотвращения его переокисления, нагрев производят в *муфельных, туннельных и конвейерных печах*. *Печной* нагрев целесообразен для пайки деталей простой конфигурации.

Нагрев стекла осуществляется за счет теплопроводности металла, нагретого при пропускании через него тока. Этот способ нагрева обеспечивает дозирование тепла и не требует высокой квалификации оператора.

Соединение стекла с металлом возможно за счет использования эмали. На соединяемые детали наносят слой эмалевой пасты, и место соединения нагревают до температуры ее плавления. При этом способе соединения уменьшаются внутренние напряжения, снижается переокисление металла и обеспечивается получение вакуумно-плотных соединений.

Поскольку легкоплавкие стёкла и расплавленные эмали хорошо смачивают все металлы при условии наличия на их поверхности адсорбирующего слоя оксида, они могут быть использованы как припой.

После соединения стекла с металлом производят отжиг соединений для снижения внутренних напряжений. Режим отжига выбирают с учетом ТКЛР соединяемых материалов и конструкции спая.

Для снижения внутренних напряжений применяют также оптимальный режим отжига или охлаждения соединений для поддержания одинакового объемного сжатия металла и стекла в процессе охлаждения.

### **Пайка металлов с кварцем**

При пайке металлов с кварцем на поверхность кварца наносятся пленки меди, никеля, серебра, золота (гальванически, напылением или вжиганием) и по покрытиям проводится пайка паяльником малооловянистыми припоями с применением жидких (канифольных) флюсов.

При применении активных припоев на поверхность кварца наносится слой титана или циркония. Пайка проводится в печах с применением припоев, содержащих олово, индий, галлий. В качестве конструкционного металла используют медь, серебро, золото.

Пленка благородных металлов на кварце образуется по следующей технологии: на паяемую поверхность кварца наносят платино-золотую краску, нагревают в вакууме до 550–580 °С до получения металлического блеска. Затем на поверхность кварца наносят пленку расплавленного индия при температуре 200–250 °С.

При пайке кварца с медью на кварц предварительно наносят слой титана из порошка гидрида титана. Нагрев производят в вакууме  $(2,6-6,5)10^3$  Па при 1000–1050 °С в течение 15–30 мин. В качестве припоя используют свинец. Пайка ведется при температуре 750–800 °С.

Возможна пайка кварца непосредственно с титаном или цирконием припоем ПСр 72. При этом образуются прочные и термостойкие спаи.

Перед пайкой кварц покрывают гидридом титана, образующим в вакууме чистый титан. При изготовлении пьезоэлектрических кварцевых резонаторов пайку кварца проводят галлиевыми припоями, содержащими индий, олово, медь. Термообработку этих спаев выполняют при температуре выше 100 °С в кислородосодержащей атмосфере.

Процесс пайки кварца с металлом производится с использованием газового или индукционного нагрева, нагрева в печах или



нагрева сопротивлением. Кварцевое стекло при пайке можно нагревать, доводя его до плавления.

Пайка кварца, покрытого алюминием и медью, с никель-кобальтовым сплавом и латунию производится припоем состава 75 % In – 15,5 % Sn – 2,5 % Ag – 7 % Bi. Температура пайки 370–380 °С, выдержка 20 мин. Пайка производится в вакууме.

Лучшее качество пайки получается на согласованных спаях. На несогласованных спаях для уменьшения остаточных напряжений в кварцевом стекле используют следующие способы:

- применение тонких проволок или фольги в конструкции металлической части спая;
- использование металлов с низким пределом текучести;
- создание конструкции спая с прослойками других стекол или металлов с промежуточным значением ТКЛР;
- пайка припоями с большим интервалом кристаллизации.

В отдельных случаях достигается релаксация напряжений в паяном шве благодаря конструктивным решениям металлического и стеклянного элементов паяемого изделия. В спае желательно иметь сжимающие напряжения.

После пайки кварца с металлом необходимо производить отжиг для снижения остаточных напряжений. Режим отжига подбирается в зависимости от соединяемых материалов, конструкции спаев и используемого припоя.

Существующие способы пайки кварцевого стекла (кварца) с металлами различаются в зависимости от агрегатного состояния кварца во время пайки. Кварц можно паять, доводя его до плавления, при высокой температуре, как и стекло, или вести процесс при более низких температурах, когда кварц находится в твердом состоянии.

Пайку кварца с его оплавлением производят с использованием переходных стекол с различными ТКЛР. Эти стекла, сплавляясь друг с другом, образуют постепенный переход от металла к кварцу таким образом, чтобы напряжения на отдельных границах между стеклами не превышали допустимых значений.

В качестве металла для ввода применяют, как правило, вольфрам или молибден. Этот способ пайки кварца с металлами трудоемок, спаи имеют значительные размеры, механическая прочность и теплоемкость невелики.

Более прогрессивным считается способ впаивания металлической фольги непосредственно в кварц (ленточные спаи). При этом в качестве металлов используют вольфрам, молибден, тантал, платину. Однако размеры фольги ограничены (ширина порядка нескольких миллиметров, толщина 0,01–0,05 мм). Это ограничение связано с большой разностью ТКЛР соединяемых материалов. Иногда одновременно впаивают несколько одиночных тонких вводов.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие условия необходимы для хорошего смачивания металла расплавленным стеклом?
2. От таких факторов зависит образование прочного соединения между металлом и стеклом?
3. Какие бывают спаи металла со стеклом?
4. Что представляют собой согласованные спаи?
5. Что такое несогласованные спаи?
6. Какими факторами определяется качество спая металла со стеклом?
7. Какие существуют типы стекол в зависимости от температурного коэффициента линейного расширения?
8. Какие металлы имеют достаточно близкие ТКЛР со стеклом?
9. Какими способами осуществляется металлизация стекла для низкотемпературной пайки стекла с металлом?
10. Как обрабатывается поверхность стекла перед нанесением металлизированного слоя и для чего?
11. Какое основное требование предъявляется к припоям, применяемым для пайки металла с металлизированным слоем на стекле?
12. Какими припоями паяют меднённые поверхностные слои?
13. Какими припоями паяют посеребрённые поверхностные слои?
14. При помощи какого припоя может быть соединено неметаллизированное стекло с металлом?
15. Для чего производится нанесение на металл нескольких слоев стекол с различными ТКЛР?
16. Какие виды нагрева используют при пайке металлов со стеклом?
17. Для пайки деталей какой конфигурации целесообразен печной нагрев?

18. Какую операцию производят после соединения стекла с металлом для снижения внутренних напряжений?
19. Что наносят на поверхность кварца при пайке металлов с кварцем паяльником малооловянистыми припоями?
20. Что наносят на поверхность кварца при пайке активными припоями?
21. На каком оборудовании производится пайка металлов с кварцем с применением активных припоев?
22. Какие припои применяются при изготовлении пьезоэлектрических кварцевых резонаторов?
23. С использованием каких видов нагрева производится процесс пайки кварца с металлом?
24. Какие способы используют для уменьшения остаточных напряжений в кварцевом стекле на несогласованных спаих?
25. Какие напряжения желательно иметь в спае металл – кварц?
26. Для чего используют переходные стекла с различными ТКЛР при пайке кварца с его оплавлением?
27. Какие спаи при пайке кварца с металлами называют ленточными?

### **3.3. Пайка металлов с графитом**

Применение графита в различных отраслях техники обусловлено его небольшой плотностью, высокой теплопроводностью, близкой к теплопроводности металлов, а также более высокой термостойкостью, чем у большинства керамических материалов. Прочность графита возрастает с повышением температуры до 2000–2500 °С, при этих температурах он имеет наибольший предел прочности из всех известных материалов. Графит обладает низкой химической активностью ко многим реагентам, имеет слоистую структуру, благодаря чему легко обрабатывается и является хорошим самосмазывающимся материалом.

Однако сам по себе графит – достаточно хрупкий материал, и поэтому в определенных конструкциях необходимо его соединение с металлами.

Соединения металлов с графитом выполняются с применением капиллярной, контактно-реактивной и диффузионной пайки.

Создание паяных конструкций типа графит – графит и металл – графит обусловлено не только экономическими соображениями, но и возможностью реализации положительных свойств графита. Примерами таких конструкций являются длинномерные нагреватели, тигли и лодочки для плавки металлов, электроды дуговых печей, крупногабаритные аноды ртутных выпрямителей, нагреватели шахтных печей, высокотемпературные теплообменники, тепловыделяющие элементы.

Графит хорошо смачивается тугоплавкими металлами (титан, цирконий, кремний, гафний, ванадий, ниобий, вольфрам, молибден), алюминием, кремнием, бором, а также металлами группы железа.

Основной стадией процесса пайки графита с металлами является его пропитка расплавленным припоем. Образующийся при этом металлический каркас и определяет прочность паяного соединения.

Однако пайка металла с графитом имеет определенные трудности, обусловленные различием теплофизических и физико-механических свойств соединяемых материалов. Это приводит к образованию в процессе пайки напряжений, превышающих предел прочности графита, а поскольку графит сравнительно хрупкий и малопрочный материал, то возможно разрушение графитовой детали в зоне соединения.

Снизить уровень возникающих в процессе пайки напряжений можно следующими путями:

- созданием согласованного спая (коэффициенты линейного расширения соединяемых материалов равны или близки друг к другу в интервале от комнатной температуры до температуры спаивания);
- уменьшением температуры пайки;
- применением пластичных припоев;
- выбором конструкции соединения, при котором на графит воздействуют только напряжения сжатия;
- созданием неравномерного температурного поля, при котором металлические детали в процессе пайки нагреваются до более низкой температуры, чем графитовые;
- применением припоев с более низкой температурой плавления и большим интервалом кристаллизации.

Графит практически не смачивается низкотемпературными припоями на основе олова, свинца, висмута, кадмия, поэтому на его поверхность перед пайкой предварительно наносится покрытие (электролитически, пропиткой поверхности медью, напылением слоя меди или никеля).

*Низкотемпературная* пайка графита и графитовых материалов с такими металлами, как сталь, медь, никелевые сплавы, производится паяльником с использованием жидких флюсов.

При *высокотемпературной* пайке в защитных средах и в вакууме графит хорошо смачивается припоями, содержащими карбидообразующие металлы (титан, цирконий, кремний, гафний, ванадий, ниобий, вольфрам, молибден). Но при этом образуются охрупчивающие карбидные слои, что чаще всего приводит к образованию трещин.

Для предотвращения образования трещин на поверхность металлов или графита наносят барьерные покрытия плазменным или электролитическим способом. Эти покрытия состоят из пластичных некарбидообразующих металлов. Для пайки применяются активные припои систем Cu – Sn – Ti; Cu – Ti – Si; Pb – Sn – Sb – Ti и др.

### **Пайка графита со сталями**

Соединение графита со сталями позволяет наиболее широко использовать уникальные свойства графита. Пайка графита со сталями является достаточно технологичным методом соединения, обеспечивающим высокопрочные, электропроводные и герметичные соединения.

Примерами конструкций графита со сталями являются длинномерные нагреватели, тепловыделяющие элементы, высокотемпературные теплообменники.

Для соединений графитовых электродов со стальными штангами применяют *контактно-реактивную* пайку. Это позволяет уменьшить величину «огарка» электрода, повысить электропроводность зоны перехода и удешевить способ соединения. Оптимальная температура контактно-реактивной пайки составляет 1150–1200 °С в атмосфере защитных газов или на воздухе. Использование флюсов не обязательно, так как восстановление окислов стали осуществляется углеродом графита. Пайка в воздушной среде целесообразна

только для деталей большого сечения, так как при нагреве происходит окисление и разрыхление графита с потерей прочности.

При контактно-реактивной пайке сплавов железа с графитом происходит диффузия активных карбидообразующих компонентов сплава в зону спаев с образованием пограничных слоев, обогащенных карбидами этих элементов.

Пайка графита с высоколегированными сталями выполняется в атмосфере защитных газов и ограничена толщиной стали (не более 15 мм).

Применение припоев при пайке графита со сталями обеспечивает реализацию следующих возможностей:

- 1) осуществление процесса пайки при более низких температурах;
- 2) формирование шва из более пластичного материала;
- 3) использование промежуточных компенсационных элементов, снижающих уровень внутренних напряжений, что особенно важно при пайке графита с коррозионно-стойкими и жаростойкими сплавами, имеющими отличные от графита температурные коэффициенты линейного расширения.

В зависимости от назначения изделий для соединения графитовых и стальных материалов применяют низко- или высокотемпературную пайку.

*Низкотемпературную* пайку используют в основном при изготовлении торцовых уплотнений, подпятников, радиальных и упорных подшипников, рабочая температура эксплуатации которых не превышает 200–250 °С.

При низкотемпературной пайке применяют припои на основе олова, свинца, висмута, кадмия и сурьмы. Перечисленные припои не смачивают чистый графит, поэтому они рекомендуются для пайки графита, пропитанного металлами, или графита с предварительно нанесенным покрытием. В качестве покрытий наиболее часто применяют медь и никель.

*Высокотемпературную* пайку графита со сталью широко используют при изготовлении отдельных узлов ядерных реакторов, а также для соединения графитовых электродов с токоведущими элементами, уплотнительных колец и вкладышей с металлическими обоймами.

При пайке графита с никель-кобальтовым сплавом рекомендуется припой с бóльшим, чем у графита, температурным коэффициентом линейного расширения. После охлаждения металла паяного шва в соединении возникают напряжения сжатия, что позволяет использовать более высокий предел прочности графитового материала при сжатии (примерно в 3 раза бóльший, чем при растяжении). Поэтому зазоры в этом случае рекомендуется назначать порядка 0,0125–0,025 мм с целью уменьшения растягивающих напряжений, возникающих в зоне шва.

### **Пайка графита с тугоплавкими металлами**

Наилучший результат имеет смачивание графита тугоплавкими металлами, такими как молибден, вольфрам, гафний, ниобий, ванадий, титан, цирконий, кремний. Наиболее сложным и ответственным процессом пайки является пропитка графита припоем. Следует отметить, что в основном возможна пайка только высокопористых графитов, так как у высококачественных конструкционных графитов достаточно низкий процент открытых пор, и их размер очень мал – от 1 до 10 мкм. Поэтому пайка конструкционных графитов является процессом технологически сложным и дорогостоящим. При пайке графита образуется металлический каркас, который и определяет прочность паяного соединения.

Также трудность соединения графитов с металлами обусловлена различными коэффициентами температурного линейного расширения, поэтому при пайке припой подбирается с максимально близким температурным коэффициентом линейного расширения.

Если ТКЛР будут сильно отличаться, то место пропитки графита припоем может быть разрушено. Кроме того, паяемую конструкцию следует проектировать таким образом, чтобы на место спая действовали в основном сжимающие напряжения. Глубина проникновения припоя в графит и предел прочности паяного шва на разрыв напрямую зависят от усилия сжатия в процессе пайки.

Паяные соединения графита с тугоплавкими металлами (молибденом, ниобием, танталом, титаном, цирконием, вольфрамом) широко применяются в различных конструкциях. Такие соединения выполняются в печах с контролируемой атмосферой (аргон, гелий,

вакуум), а также в вакуумных камерах с использованием электронного луча и электрической дуги.

Наиболее широкое применение для соединения тугоплавких металлов с графитом нашли высокотемпературная пайка в печах с контролируемой атмосферой и пайкосварка с использованием электронного луча и газозлектрической дуги.

При пайке требуется особо чистая среда, так как даже незначительное содержание в защитной атмосфере кислорода, азота, водорода или углерода сопровождается трещинообразованием в тугоплавких металлах. Оптимальная температура пайки составляет 1150–1200 °С.

Предотвращение науглероживания и охрупчивания металла достигается:

- 1) предварительным нанесением на соединяемые поверхности покрытия из пластичных металлов, не образующих в контакте с графитом сплошных хрупких карбидных диффузионных слоев;
- 2) применением припоев с основой из пластичных металлов, инертных по отношению к графиту, и введением в них карбидообразующих добавок для обеспечения смачиваемости. Металлизацию графита производят плазменным или электролитическим способом.

Соединение графита с титаном используется при креплении графитовых колец торцовых уплотнений в титановой обойме и в качестве промежуточного слоя при соединении графита со сталью. В этом случае применяют дуговую пайкосварку вольфрамовым электродом в защитной атмосфере аргона.

Пайку металлизированного графита производят нагревом плотно поджатых друг к другу соединяемых элементов при температуре до 900 °С в течение 10–15 секунд. В качестве припоя служит слой металлизации на поверхности графита.

Для соединения графита с тугоплавкими металлами применяют электронно-лучевую пайкосварку. Данным способом соединяют графитовый анод с металлическим токопроводом в химической и электротехнической промышленности, а также графитовый диск с молибденовым цилиндром (деталь баллона разрядника). Соединения, выполненные данным способом, выдерживают пятидесятикратное термоциклирование в интервале от 1300 до 20 °С.



## **Пайка графита с медью**

Трудности пайки графита с медью связаны с практически отсутствующим химическим взаимодействием между ними и существенным различием физико-механических свойств.

Пайка этих материалов осуществляется за счет применения промежуточных прослоек и припоев, содержащих металлы, поверхностно-активные к углероду (титан, цирконий, никель, коррозионно-стойкая сталь).

Пайка графита с медью осуществляется с применением припоев, содержащих карбидообразующие металлы (титан, цирконий, никель и др.), на основе меди или серебра. Пайка графита с медью может проводиться в печах с защитной атмосферой, в вакууме, на воздухе с использованием стандартных флюсов ПВ200, ПВ201, ПВ209, а также флюсов ГТВ201 и ГГВ209.

## **Пайка силицированных графитов со сталью**

Силицированный графит — это высокотехнологичный композитный материал на основе карбида кремния, углерода и кремния, обладающий высокой износостойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и другими уникальными свойствами, определившими его востребованность в различных отраслях народного хозяйства.

Пять силицированные графиты со сталями можно с применением стандартных припоев на медной, серебряной и оловянной основах.

Для того чтобы был обеспечен процесс смачивания графита припоем, на поверхность графита предварительно наносят силикатную или боросиликатную пленку толщиной 0,1–0,2 мм путем объемной или поверхностной пропитки графита кремнием или его сплавом с бором.

При пайке силицированного графита с высоколегированными сталями (например, нержавеющей сталью 12Х18Н10Т) в состав припоя на основе меди (80 % Cu) в качестве активного элемента должен входить титан (20 % Ti) либо в равных количествах титан и олово (10 % Ti + 10 % Sn). Пайку производят в печах с защитной атмосферой (в аргоне) при температурах 1100–1200 °С.

Пайка силицированного графита с углеродистыми сталями (например, Ст3) производится припоем на основе олова (85–95 % Sn), в который в качестве активной добавки вводится титан (5–15 % Ti).

Можно также паять серебряным припоем состава (45 % Ag – 45 % Cu – 10 % Ti). В качестве флюса используется стандартный флюс ПВ209, температура пайки в зависимости от применяемого припоя колеблется от 900 до 1200 °С.

Боросилицированный графит с углеродистыми сталями (например, Ст3) паяют припоями на основе меди (80 % Cu + 20 %Ti) или припоями на основе олова, содержащими марганец, никель и титан.

Если производится пайка латунью Л63, то она должна вестись по омедненной поверхности с применением в качестве флюса буры в диапазоне температур 950–1050 °С.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие основные свойства графита обусловили его применение в различных отраслях техники?
2. При каких температурах прочность графита возрастает?
3. Чем обусловлено создание паяных конструкций типа графит – графит и металл – графит?
4. Какие трудности имеет пайка металла с графитом?
5. Как можно снизить уровень возникающих напряжений при пайке графита?
6. Как обеспечивается смачивание поверхности графита низкотемпературными припоями на основе олова, свинца, висмута, кадмия?
7. Какими тугоплавкими металлами графит хорошо смачивается?
8. Какими видами пайки выполняются соединения металлов с графитом?
9. Как удастся избежать образования трещин в соединениях металлов с графитом при образовании охрупчивающих карбидных слоев?
10. Какие по качеству соединения обеспечивает пайка графита со сталями?
11. Каковы особенности соединений графитовых электродов со стальными штангами контактно-реактивной пайкой?
12. Как выполняется пайка графита с высоколегированными сталями?

13. Реализацию каких возможностей обеспечивает применение припоев при пайке графита со сталями?
14. Какие припои применяют при низкотемпературной пайке графита со сталями?
15. Какие металлы используются в качестве покрытий при низкотемпературной пайке графита со сталями?
16. Чем обусловлена трудность соединения графита с тугоплавкими металлами?
17. На каком оборудовании выполняются паяные соединения графита с тугоплавкими металлами?
18. Почему при пайке в атмосфере защитного газа требуется особо чистая газовая среда?
19. С чем связаны трудности пайки графита с медью?
20. Как осуществляется пайка графита с медью?
21. Какими припоями можно паять соединения из силицированных графитов со сталью?
22. Что предварительно наносят на поверхность графита для обеспечения смачиваемости?

## **Выводы**

Представленная в данном разделе информация посвящена изучению технологических особенностей пайки металлов с неметаллическими материалами.

Подробно рассмотрены существующие способы пайки металлов с керамикой, позволяющие получать качественные изделия для различных отраслей народного хозяйства. Отмечены достоинства и недостатки каждого из рассматриваемых способов. Дана последовательность технологических этапов соединения металла с керамикой, описаны основные проблемы изготовления металло-керамических узлов и методы их преодоления.

Подробно описаны способы металлизации поверхности керамики, позволяющие получить надежные паяные соединения.

Изложены технологические особенности пайки металлов со стеклом и кварцем, показаны критерии выбора источника нагрева в зависимости от вида спая металла со стеклом и назначения

паяного соединения. Отмечены способы уменьшения остаточных напряжений в кварцевом стекле, представляющие основную сложность при изготовлении несогласованных спаев.

Рассмотрены основные способы пайки, используемые при соединении металлов с графитом. Описаны технологические различия между низкотемпературной и высокотемпературной пайкой графита с металлами.

Особое внимание в разделе уделено процессам подготовки поверхностей неметаллических материалов к пайке с металлами и вопросам физико-химической совместимости материалов, составляющих паяное соединение. Приводятся практические примеры по подбору технологических и вспомогательных материалов, режимов пайки и источников нагрева.

Материалы данного раздела могут быть полезны обучающимся для грамотного проектирования технологических процессов пайки металлов с неметаллическими материалами как в условиях промышленного производства, так и в мелкосерийном и единичном производстве на малых предприятиях.

## Раздел 4. ПАЙКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.1. Пайка графита

Соединение графитовых деталей между собой необходимо для создания из них блоков либо при изготовлении изделий из разных графитов, имеющих различные физико-механические свойства.

*Искусственный* графит, начиная с 400 °С, легко окисляется, разрыхляется и теряет прочность. Для сохранения его физико-механических свойств пайку следует осуществлять в вакууме или нейтральных средах (аргоне, гелии, азоте).

*Силицированный* графит используется для изготовления таких изделий, как термпары погружения и роликовые конвейеры обжиговых печей, поскольку он обладает высокой жаростойкостью, химической стойкостью по отношению к расплавленным металлам и другим агрессивным средам.

Углеродистые материалы паяют с применением карбидообразующих припоев (содержащих Ti, Zr, Ta или Nb). Формирование прочного соединения происходит за счет образования эвтектического расплава типа MeC – C (карбид металла – углерод) и проникновения его в графит с последующей кристаллизацией.

Установлено, что паяные соединения обладают удовлетворительной прочностью и разрушаются не по шву, а по графиту, если наблюдается проникновение данного эвтектического расплава на глубину не менее 2 мм.

И поскольку самые тугоплавкие эвтектики проникают на значительную глубину лишь при высоких температурах, для хорошего соединения графитовых деталей циркониевыми или титановыми припоями пайку нужно проводить при температурах 3200–3500 °С, а пайку танталовым и ниобиевым припоями – при еще более высоких температурах. Однако при таких температурах может наблюдаться сублимация графита, его разрыхление и некоторое разупрочнение. Пайка осуществляется в инертной газовой атмосфере или в вакууме.

Для пайки графита с графитом используют припои с кремнием. Эти припои хорошо растекаются по поверхности графита и обладают

способностью быстро диффундировать в графит. Однако при их применении следует тщательно вести температурный режим и соблюдать установленное время пайки. Припой этой группы приемлемы для пайки изделий, работающих при высоких температурах.

При пайке графита карбидообразующими припоями (с Ti, Zr, Ta, Si) глубина проникновения припоя является одним из основных факторов, влияющих на прочность паяного соединения. Недостатком данного способа пайки графита является недостаточная термостойкость и коррозионная стойкость карбидного шва.

При различных способах пайки графита с графитом и графита металлами необходимо, чтобы расплавленный припой смачивал графит, растекаясь по его поверхности, затекая в зазоры и проникая в поры. В результате чего обеспечивается физический контакт между жидким припоем и графитом и создаются условия для их взаимодействия.

Процесс пайки графита ведут в два этапа:

1) первоначально место соединения нагревают до температуры, достаточной, чтобы металл прослойки расплавился и пропитал соединяемые графитовые поверхности;

2) на втором этапе температуру в зоне стыка повышают до значений, при которых процесс карбидообразования протекает достаточно интенсивно. Например, пайка графитовых цилиндров титановым припоем осуществляется первоначально при температуре 1650 °С, а термодиффузионное насыщение проводится при 2200 °С. В результате получается прочное соединение с карбидным швом, устойчивое к воздействию высоких температур.

Наиболее активным компонентом припоев для пайки графита (алмаза) является титан. Проведенные исследования показывают, что наиболее эффективно на снижение краевого угла смачивания и увеличение работы адгезии действуют малые добавки титана. Припой с содержанием титана применяют как для пайки графита с графитом, так и для пайки графита с тугоплавкими металлами – молибденом, вольфрамом или их сплавами.

Для пайки графитовых деталей между собой используются, как правило, те же припои, что и для пайки графита с металлами.

Для соединения крупных деталей графитовых изделий разработан метод пайки с применением электрической дуги в атмосфере аргона под высоким давлением. Данный процесс называется *сплавлением*, но поскольку он очень сложен и трудоемок, в промышленном масштабе данный процесс практически не применяется.

Вязкость припоя и краевой угол смачивания паяемых поверхностей определяются в основном процессами растворения углерода в жидком расплаве припоя при пропитке им поверхностей графитовых деталей.

При пайке графита с графитом припоями с содержанием титана, циркония, гафния температурная зависимость глубины пропитки носит *экстремальный* характер в результате того, что припой, растекаясь в виде тонкого слоя по поверхности поры, не полностью заполняет ее сечение, что существенно ослабляет прочность паяного соединения в зоне стыка.

При пайке мелкопористых графитов из-за капиллярного эффекта сечение поры полностью заполняется расплавленным металлом.

Для изготовления графитовых изделий, работающих при низких и средних температурах, применяют титановые и медно-серебряные припои. Эти припои хорошо смачивают графит, их можно применять для пайки графита с графитом и графита с металлом.

### **Контрольные вопросы**

1. В каких случаях требуется соединение графитовых деталей между собой?
2. В каких защитных средах осуществляют пайку деталей из искусственного графита для сохранения его свойств?
3. Какие изделия изготавливают из силицированного графита и почему?
4. Как паяют углеграфитовые материалы?
5. За счет чего происходит формирование прочного соединения при пайке углеграфитовых материалов?
6. В каком случае паяные соединения из углеграфитовых материалов обладают удовлетворительной прочностью и разрушаются не по шву, а по графиту?

7. При каких температурах нужно проводить пайку графитовых деталей циркониевыми или титановыми припоями для получения хорошего соединения?
8. Какие существуют особенности пайки графита карбидообразующими припоями?
9. Что является одним из основных факторов, влияющих на прочность паяного соединения?
10. В результате чего при пайке обеспечивается физический контакт между жидким припоем и графитом?
11. Сколько этапов включает в себя процесс пайки графита?
12. Какая операция осуществляется на первом этапе пайки графита?
13. Что выполняется на втором этапе пайки графита?
14. Какой металл является наиболее активным компонентом припоев для пайки графита (алмаза)?
15. Какие припои используются для пайки графитовых деталей между собой?
16. Какой метод разработан для соединения крупных деталей графитовых изделий?
17. Почему существующие методы пайки графита путем сплавления деталей практически не применяются в промышленном масштабе?
18. Какой характер носит температурная зависимость глубины пропитки при пайке графита с графитом припоями, содержащими титан, цирконий, гафний, и почему?
19. Какие припои применяют для изготовления графитовых изделий, работающих при низких и средних температурах?

## **4.2. Пайка керамики**

Соединение керамики с керамикой можно производить, используя технологию пайки стекла, применяя расстекловывающиеся и нерасстекловывающиеся стеклоцементы, специально разработанные для этих целей. Керамика, имеющая в своем составе стекловидную фазу, хорошо смачивается расплавленным стеклоцементом с получением вакуумно-плотного соединения.



Но для чистой алюмооксидной керамики обеспечение хорошей смачиваемости является достаточно затруднительным. Даже если используется стеклоцемент расстекловывающегося типа, полученное соединение необходимо эксплуатировать при более низких температурах, чем это позволяет керамика. Это серьезно снижает преимущества керамики перед стеклом.

Достаточно распространенным методом соединения керамики с керамикой является ее металлизация с последующей пайкой, так же как и в случае соединения керамики с металлическими деталями. Соединения, выполненные данным методом, выдерживают нагрев до 1000 °С и выше.

Высококачественная алюмооксидная керамика металлизуется достаточно сложно, особенно если требуется выполнение высокотемпературного соединения. Исследования установили, что вакуумно-плотное и прочное высокотемпературное соединение может быть получено с использованием керамического припоя на основе системы оксидов  $Al_2O_3 - CaO - MgO - SiO_2$ , температура плавления которого превышает 1200 °С.

Керамические материалы могут быть соединены также со стеклом путем прямого сплавления, однако при этом необходимо, чтобы коэффициенты термического расширения керамики и стекла были близки друг другу.

Выполнение этого условия имеет определенную сложность потому, что для керамических материалов не характерно резкое увеличение коэффициента термического расширения в точке отжига, которое свойственно стеклу. Вследствие чего для создания соединения наиболее подходят стекло и керамика с низкими коэффициентами термического расширения, особенно если керамика содержит большое количество стекланной фазы. Поэтому чаще всего используют технологию соединения керамики со стеклом с применением стеклоцемента. Однако для алюмооксидной керамики такие соединения получить достаточно трудно.

В высоковакуумных системах керамика применяется в качестве изоляторов для электрических сквозных вводов, поэтому наибольший интерес здесь представляют способы соединения керамики с металлом. Как и в случае соединения керамики со стеклом, наиболее качественные соединения получаются для металлов и керамик,

обладающих близкими коэффициентами термического расширения. Но так как керамика прочнее стекла, то необходимость в точном совпадении этих коэффициентов отсутствует.

При соединении керамики с металлом керамику сначала металлизуют, а затем соединяют с металлом, применяя те же материалы, что и для пайки металла с металлом.

Для пайки керамики в вакууме используется порошковый припой состава 42 % Ag – 18 % Cu – 35 % Pb – 5 % Ti; температура плавления припоя равна 860 °С. Свинец введен для понижения температуры плавления и уменьшения коэффициента линейного расширения, который у такого припоя меньше, чем у керамики. Поэтому при высокотемпературной пайке обеспечивается плотный контакт между керамикой и кольцом припоя.

### **Контрольные вопросы**

1. С использованием какой технологии можно проводить соединение керамики с керамикой?
2. Для какого вида керамики не существует проблемы смачивания соединяемых поверхностей расплавленным стеклоцементом?
3. Для какой керамики обеспечение хорошей смачиваемости является затруднительным?
4. Какие соединения керамики с керамикой выдерживают нагрев до 1000 °С и выше?
5. Использование какого керамического припоя при пайке алюмооксидной керамики обеспечивает вакуумно-плотное и прочное высокотемпературное соединение?
6. В каком случае керамические материалы могут быть соединены со стеклом путем прямого сплавления?
7. В каком случае стекло и керамика с низкими коэффициентами термического расширения наилучшим образом подходят для соединения друг с другом?
8. Какие паяные изделия из керамики применяются в высоковакуумных системах?
9. Какой порошковый припой используется для пайки керамики в вакууме?

### 4.3. Пайка полупроводников

**Пайку полупроводников** применяют при внутреннем монтаже приборов (припайка токоотводов, напайка перехода на кристаллодержатель) и при наружном монтаже (припайка внешних выводов, герметизация).

Поверхность изделия из полупроводника предварительно облуживают в расплаве припоя, применяя для этого ультразвуковой паяльник или используя способ гальванического покрытия никелем или золотом.

Пайку производят в печах с контролируемой (нейтральной или восстановительной) атмосферой, в вакууме или методом сопротивления предварительно облуженных поверхностей.

При соединении изделий с уже готовым переходом требуется строго выдерживать температуру нагрева. Для этого используются терморегуляторы.

Пайку тонких электрических выводов можно осуществлять на воздухе микропаяльниками с использованием защитных или активных флюсов (спиртового раствора канифоли, флюса на основе хлористого цинка и хлористого аммония). После флюсовой пайки изделие промывают деионизированной водой и сушат.

Для получения электрических контактов малой площади выводы присоединяют с помощью связи, состоящей из металлического порошка компонентов припоя (олова, свинца, кадмия, алюминия, индия, сурьмы, фосфора) с разлагающейся при нагреве органической добавкой (смесь нитроцеллюлозы с бутилацетатом).

Операции по сборке изделия под пайку выполняют в сборочных линиях, имеющих контролируемую атмосферу и состоящих из нескольких соединенных между собой скафандров, в которые подается воздух или азот определенной температуры и влажности.

При пайке полупроводниковых материалов припои должны образовывать электронно-дырочный переход или невыпрямляющий омический контакт. В производстве германиевых и кремниевых приборов в качестве основы припоев применяют алюминий, индий и сплавы на основе олова и свинца. Для создания в месте контакта проводимости электронного типа в основу припоев в качестве при-

месей вводят фосфор, мышьяк, сурьму и висмут. Для обеспечения невыпрямляющего омического контакта в основу припоев добавляют бор и галлий.

При создании переходов и омических контактов на интерметаллических соединениях применяют такие элементы, как олово, висмут, сурьма, цинк, кадмий, а также припой-пасты на основе галлия.

Состав припоев оказывает значительное влияние на электрические характеристики паяемых изделий, поэтому при выборе припоя следует учитывать его электрофизические свойства: электропроводность и температурный коэффициент линейного расширения. Для обеспечения надежности смачивания припоем контактной поверхности используют ультразвук.

В качестве флюсов при низкотемпературной пайке полупроводников используют спиртовые и водные растворы хлористого цинка и хлористого аммония или вазелиновые пасты (бескислотные флюсы – раствор канифоли в спирте). При высокотемпературной пайке применяют флюсы на основе буры.

Паяемость полупроводников на основе твердых растворов халькогенидов сурьмы и висмута зависит от таких факторов, как:

- способ производства полупроводников (экструзия, прессование, зонная плавка);
- технология подготовки поверхности;
- состав припоев;
- режим пайки.

Диффузионные процессы между припоем и полупроводником способствуют образованию соединений, увеличивающих переходное сопротивление термоэлемента. Поэтому время контакта полупроводника с припоем в процессе лужения и пайки должно быть предельно ограниченным. Отклонение температуры нагрева при пайке не должно превышать 2–3 °С.

Для пайки полупроводников на основе халькогенидов сурьмы и висмута в качестве припоев применяют сплавы, содержащие висмут, свинец, олово, кадмий, сурьму, теллур, алюминий, галлий, индий, серебро. При пайке таких полупроводников большинство процессов выполняется вручную. Для условий массового производства процесс пайки механизирован.

Подготовка поверхности полупроводников типа халькогенидов к облуживанию включает следующие этапы:

1) удаление консервирующего слоя парафина обезжириванием в бензине или четыреххлористом углероде ( $CCl_4$ ) при  $90^\circ C$  в течение 5 минут с последующей промывкой изделия в горячей воде;

2) шлифование образцов с двух сторон до оптимальной толщины абразивной пастой М-14 (раствор порошка  $Al_2O_3$  дисперсностью 14 мкм в воде) в течение 5 минут при механизированном производстве. Шлифование позволяет снять дефектные слои (0,2–0,3 мм), образовавшиеся в процессе разрезания полупроводников. При обработке вручную кроме шлифования производится также полирование поверхности образца.

Обезгаживание поверхности полупроводников достигается выдерживанием их в эксикаторе в течение двух суток.

Хранить подготовленные к облуживанию образцы следует в герметичных сосудах с притертыми пробками.

При облуживании полупроводников вручную используют паяльник с никелевым наконечником. Применение медного наконечника недопустимо, так как при взаимодействии полупроводника с медью образуются соединения теллура, обладающие большим электросопротивлением.

Механизированное облуживание производится погружением деталей, помещенных в кассету, в расплав припоя с одновременной активацией поверхности механическим способом или ультразвуком.

Технология пайки полупроводников с теплообменниками определяется коммутационным материалом, используемым для изготовления теплообменника (медь или алюминий).

При облуживании теплообменников из меди применяют такие же флюсы и припои, как и при облуживании полупроводников ПВДХ-1 и ПВЭХ-1 однослойным и двухслойным способами.

При облуживании теплообменников из алюминия в качестве припоев для первого слоя (ультразвуковое лужение) применяют припои на основе цинка. Для последующих слоев применяют припои, используемые в качестве поверхностных слоев для лужения полупроводников.

Облуживание алюминия, плакированного медью, производят аналогично облуживанию меди.

Для защиты от коррозии, возникающей в результате попадания влаги на изделие, после пайки наносят лакокрасочные покрытия.

### **Контрольные вопросы**

1. При выполнении каких работ производится пайка полупроводников?
2. Как готовится поверхность изделия из полупроводника перед пайкой?
3. На каком оборудовании производят пайку предварительно облуженных поверхностей полупроводников?
4. Как осуществляется пайка тонких электрических выводов?
5. Как обрабатывается изделие после флюсовой пайки?
6. Как получают электрические контакты малой площади?
7. Как выполняют операции по сборке изделия под пайку?
8. Какой переход и контакт должны образовывать припои при пайке полупроводниковых материалов?
9. Какие химические элементы применяют в качестве основы припоев в производстве германиевых и кремниевых приборов?
10. Какие элементы добавляют в основу припоев для обеспечения невыпрямляющего омического контакта?
11. Какие электрофизические свойства припоя следует учитывать при выборе его для пайки изделия?
12. Что используют для обеспечения надежности смачивания припоем контактной поверхности?
13. Что используют в качестве флюсов при низкотемпературной пайке полупроводников?
14. Какие флюсы применяют при высокотемпературной пайке полупроводников?
15. От каких факторов зависит паяемость полупроводников на основе твердых растворов халькогенидов сурьмы и висмута?
16. Чему способствуют диффузионные процессы, протекающие между припоем и полупроводником?
17. Какие сплавы применяют в качестве припоев для пайки полупроводников на основе халькогенидов сурьмы и висмута?

18. Какие этапы включает подготовка поверхности полупроводников типа халькогенидов к облуживанию?
19. Как следует хранить подготовленные к облуживанию образцы?
20. Какое оборудование используют при облуживании полупроводников вручную?
21. Как производится механизированное облуживание полупроводниковых деталей?
22. Чем определяется технология пайки полупроводников с теплообменниками?
23. Какие флюсы и припои применяют при облуживании теплообменников из меди?
24. Какие флюсы и припои применяют при облуживании теплообменников из алюминия?
25. Как после пайки защищают изделие от коррозии, возникающей в результате попадания на него влаги?

## **Выводы**

Сведения, представленные в данном разделе, позволяют студентам получить представление о пайке неметаллических материалов, таких как графит, керамика, полупроводниковые материалы.

В разделе рассмотрены особенности и сложности выполнения пайки графита. Определены технологические условия, при которых формируются прочные паяные соединения из искусственного и силицированного графитов. Представлены этапы процесса выполнения пайки графита.

Рассмотрены существующие технологические способы получения паяных соединений керамики с керамикой, керамики со стеклом.

Показаны технологические особенности пайки полупроводников с применением различных видов оборудования. Уделено особое внимание составу припоев для пайки полупроводников ввиду их значительного влияния на электрические характеристики паяемых изделий.

В разделе даются практические рекомендации по подбору технологических и вспомогательных материалов, применяемых при

пайке рассматриваемых неметаллических материалов, а также температурные режимы пайки.

Технологии пайки, в отличие от технологий сварки, позволяют получать качественные соединения неметаллических материалов как между собой, так и с различными металлами, что делает возможным создание уникальных по своим технологическим и эксплуатационным свойствам изделий для различных отраслей народного хозяйства.

Представленная в данном разделе информация может быть использована в качестве рекомендательной при проектировании технологических процессов для всех желающих заняться пайкой графита, керамики и полупроводниковых материалов.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы, представленные в данном учебном пособии, позволяют студентам получить первоначальные представления о теоретических основах пайки, о технологических возможностях получения качественных паяных соединений из различных металлов и их сплавов, о технологических особенностях пайки металлов с неметаллическими материалами и различных неметаллических материалов между собой.

Раздел, посвященный теоретическим основам пайки материалов, дает информацию об особенностях существующих способов пайки и их отличиях от других технологических процессов соединения деталей, а также основных понятиях, терминах и определениях, применяемых в области производства паяных конструкций. В разделе рассмотрены физико-химические процессы, протекающие при пайке, основные типы паяных соединений, способы сборки деталей, предназначенных для пайки, методы подготовки поверхности деталей к пайке, а также преимущества определенных способов пайки при изготовлении паяных конструкций на предприятиях, имеющих различные типы организации производства.

Проведенный в пособии анализ используемых для пайки технологических и вспомогательных материалов и их свойств может оказаться полезным для студентов как будущих специалистов в осуществлении правильного выбора материалов при проектировании технологических процессов низкотемпературной и высокотемпературной пайки в конкретных производственных условиях.

В разделе, посвященном пайке металлов и их сплавов, показаны технологические возможности получения качественных паяных соединений с оптимальными механическими, физическими и химическими свойствами из стали, чугуна, меди, никеля, алюминия, титана и их сплавов, а также драгоценных металлов и их сплавов при использовании различных источников нагрева, режимов пайки, технологических и вспомогательных материалов. Даны рекомендации по проектированию технологических процессов низкотемпературной и высокотемпературной пайки металлов и их сплавов.

Рассмотренные в разделе практические примеры подбора режимов пайки, технологических и вспомогательных материалов, выбора оборудования для выполнения пайки на различных температурных режимах и разбор основных трудностей, возникающих при создании надежных паяных соединений, могут быть полезны студентам как будущим специалистам по разработке и внедрению в производство методов управления качественными характеристиками паяных изделий.

В разделе, посвященном описанию технологических особенностей пайки металлов с неметаллическими материалами, даны подробные примеры существующих способов пайки металлов с керамикой, позволяющих получать качественные изделия для различных отраслей народного хозяйства, отмечены достоинства и недостатки каждого из рассматриваемых способов, описаны основные проблемы изготовления металлокерамических узлов и методы их преодоления. Рассмотрены технологические особенности пайки металлов с такими неметаллическими материалами, как стекло, кварц и графит, показаны критерии выбора источника нагрева в зависимости от вида спая металла со стеклом и назначения паяного соединения, а также основные способы пайки, используемые при соединении металлов с графитом. Описаны технологические различия между низкотемпературной и высокотемпературной пайкой графита с металлами.

Особое внимание при рассмотрении вопросов пайки металлов с неметаллическими материалами уделено процессу подготовки поверхностей неметаллических материалов к пайке с металлами и вопросам физико-химической совместимости материалов, составляющих паяное соединение. Приводятся практические примеры по подбору технологических и вспомогательных материалов, режимов пайки и источников нагрева, что является полезным для грамотного проектирования технологических процессов пайки металлов с неметаллическими материалами как в условиях промышленного производства, так и в мелкосерийном и единичном производстве на малых предприятиях.

В разделе, посвященном пайке неметаллических материалов между собой, рассмотрена пайка таких материалов, как графит,

керамика, полупроводниковые материалы. Особое внимание уделено особенностям и сложностям выполнения пайки графита, даны практические рекомендации поэтапного выполнения технологического процесса пайки графита. Рассмотрены различные технологические способы получения паяных соединений керамики с керамикой, керамики со стеклом и керамики с металлом, а также способы пайки полупроводниковых материалов. Подробно описаны существующие методы металлизации поверхности керамики, позволяющие получить надежные паяные соединения, уделяется внимание технологическим особенностям пайки полупроводников с применением различных припоев, состав которых оказывает значительное влияние на электрические характеристики паяемых изделий.

В разделе даются практические рекомендации по подбору технологических и вспомогательных материалов и температурных режимов пайки неметаллических материалов между собой. Представленная информация может быть использована в качестве рекомендательной при проектировании технологических процессов для всех желающих заняться пайкой графита, керамики и полупроводниковых материалов.

Показано, что пайка неметаллических материалов как между собой, так и с различными металлами делает возможным создание уникальных по своим технологическим и эксплуатационным свойствам изделий для различных отраслей народного хозяйства.

Изученные студентами материалы данного учебного пособия помогут им сформировать комплекс знаний, обеспечивающих грамотный подход к созданию производственных технологий пайки, ведению технологических процессов и управлению качественными характеристиками изготавливаемых паяных изделий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брукер, Г. Р. Пайка в промышленности / Г. Р. Брукер, Е. В. Битсон. — Москва : Оборонгиз, 1957. — 295 с.
2. ГОСТ 17325–79. Пайка и лужение. Основные термины и определения : государственный стандарт Союза ССР : введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 11 октября 1979 г. № 3914 : взамен ГОСТ 17325–71 : дата введения 1981-01-01 : с изменениями от 28.12.90 г. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. — URL: [docs.cntd.ru/document/1200008728](https://docs.cntd.ru/document/1200008728) (дата обращения: 11.10.2021).
3. ГОСТ 19249–73. Соединения паяные. Основные типы и параметры : государственный стандарт Союза ССР : введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 4 декабря 1973 г. № 2641 : дата введения 1975-01-01 : с изменениями 1981 г. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. — URL: [docs.cntd.ru/document/1200006501](https://docs.cntd.ru/document/1200006501) (дата обращения: 11.10.2021).
4. ГОСТ 17349–79. Пайка. Классификация способов : государственный стандарт Союза ССР : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 декабря 1979 г. № 5048 : взамен ГОСТ 17349–71 : дата введения 1981-01-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. — URL: [docs.cntd.ru/document/1200005669](https://docs.cntd.ru/document/1200005669) (дата обращения: 11.10.2021).
5. ГОСТ 19248–90 (ИСО 3677–76, СТ СЭВ 6733–89). Припои. Классификация и обозначения : государственный стандарт Союза ССР : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 27.06.90 г. № 1890 : взамен ГОСТ 19248–73 : дата введения 1991-07-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. — URL: [docs.cntd.ru/document/1200003127](https://docs.cntd.ru/document/1200003127) (дата обращения: 11.10.2021).
6. ГОСТ Р ИСО 857-2–2009. Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 2. Процессы пайки. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен

- в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 августа 2009 г. № 278-ст : введен впервые : дата введения 2010-07-01 / подготовлен ФГУ «НУЦСК» при МГТУ им. Н. Э. Баумана [и др.] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. – URL: [docs.cntd.ru/document/1200073856](https://docs.cntd.ru/document/1200073856) (дата обращения: 11.10.2021).
7. Гржимальский, Л. Л. Самофлюсующие припои / Л. Л. Гржимальский. – Ленинград : [б. и.], 1972. – 32 с.
  8. Гржимальский, Л. Л. Технология и оборудование пайки / Л. Л. Гржимальский, И. И. Ильевский. – Москва : Машиностроение, 1979. – 240 с.
  9. Григорьев, Б. Л. Пайка металлов и сплавов : учеб. пособие / Б. Л. Григорьев. – 2-е изд., доп. и перераб. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2017. – 276 с. – ISBN 978-5-7422-5950-3.
  10. Есенберлин, Р. Е. Пайка и термическая обработка деталей в газовой среде и вакууме / Р. Е. Есенберлин. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 183 с.
  11. Квасницкий, В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении / В. Ф. Квасницкий. – Ленинград : Судостроение, 1986. – 221 с.
  12. Краткий справочник паяльщика / И. Е. Петрунин, И. Ю. Маркова, Л. Л. Гржимальский [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1991. – 212 с.
  13. Кузнецов, О. А. Прочность паяных соединений / О. А. Кузнецов, А. И. Погалов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 112 с.
  14. Лашко, Н. Ф. Вопросы теории и технологии пайки / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. – Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1974. – 248 с.
  15. Лашко, Н. Ф. Пайка металлов / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1988. – 375, [1] с.
  16. Лашко, С. В. Технология пайки изделий в машиностроении : справочник проектировщика / С. В. Лашко, Е. И. Врублевский. – Москва : Машиностроение, 1993. – 462, [1] с. – ISBN 5-217-01456-3.

17. Лашко-Авакян, С. В. Пайка алюминиевых сплавов / С. В. Лашко-Авакян, Н. Ф. Лашко. – Москва : [б. и.], 1958. – 27 с.
18. Лашко-Авакян, С. В. Пайка легких металлов (магния, титана, бериллия и их сплавов) / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. – Москва : [б. и.], 1958. – 23 с.
19. Луковская, Е. О. Сварка и пайка неметаллических материалов : учеб. пособие / Е. О. Луковская. – Минск : РИПО, 2017. – 206 с. – ISBN 978-985-503-722-5.
20. Навроцкий, А. Г. Пайка и сборка : [Все виды пайки. Соединения. Чеканка : практическое руководство] / А. Г. Навроцкий. – Москва : Рипол классик, 2004. – 222, [1] с. – ISBN 5-7905-2329-3.
21. Никитинский, А. М. Пайка алюминия и его сплавов / А. М. Никитинский. – Москва : Машиностроение, 1983. – 190 с.
22. Новиковский, Е. А. Пайка металлов : учеб. пособие / Е. А. Новиковский. – Барнаул : Типография АлтГТУ, 2013. – 63 с.
23. Перевезенцев, Б. Н. Теоретические основы пайки : электрон. учеб. пособие / Б. Н. Перевезенцев, О. В. Шашкин. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. – 132 с. – URL: [dspace.tltsu.ru/handle/123456789/8813](https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/8813) (дата обращения: 11.10.2021).
24. Петрунин, И. Е. Пайка металлов : [учеб. пособие] / И. Е. Петрунин, С. Н. Лоцманов, Г. А. Николаев. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва : Металлургия, 1973. – 281 с.
25. Петрунин, И. Е. Металловедение пайки / И. Е. Петрунин, И. Ю. Маркова, А. С. Екатова. – Москва : Металлургия, 1976. – 263 с.
26. Петрунин, И. Е. Физико-химические процессы при пайке / И. Е. Петрунин. – Москва : Высшая школа, 1972. – 278, [2] с.
27. Проектирование технологии пайки металлических изделий : справочник / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко, И. Г. Нагапетян [и др.]. – Москва : Металлургия, 1983. – 280 с.
28. Руководство по пайке металлов / под общ. ред. С. Н. Лоцманова. – Москва : Оборонгиз, 1960. – 190, [1] с.
29. Сварка в машиностроении. Справочник. В 4 томах. Том 2 / А. И. Акулов, Г. А. Асиновская, В. В. Баженов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1978. – 462 с.

30. Сварка, пайка, склейка и резка металлов и пластмасс : справочник / Г. Калиске, В. Климанд, К.-Й. Маттес [и др.]. — Изд. 3-е, перераб. и доп. — Москва : Metallurgiya, 1985. — 479, [1] с.
31. Справочник по пайке / Л. Л. Гржимальский, А. И. Губин, А. С. Екатова [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1975. — 407 с.
32. Справочник по пайке / И. Е. Петрунин, Ю. И. Березников, Р. Р. Бунькина [и др.]. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2003. — 479 с. — ISBN 5-217-03167-0.
33. Сторчай, Е. И. Флюсовая пайка алюминия / Е. И. Сторчай. — Москва : Metallurgiya, 1980. — 124 с.
34. Федоров, А. Л. Технология изготовления паяных конструкций : учеб.-метод. пособие / А. Л. Федоров, А. Ю. Краснопевцев, О. В. Шашкин. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. — 61 с.
35. Хорунов, В. Ф. Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей / В. Ф. Хорунов. — Киев : Наукова думка, 2008. — 240 с. — ISBN 978-966-00-0802-1.
36. Хряпин, В. Е. Справочник паяльщика / В. Е. Хряпин. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1981. — 349 с.

## ГЛОССАРИЙ

**Адгезия** — сцепление различных по своему составу и структуре материалов, обусловленное их физическими и химическими свойствами.

**Активная газовая среда** — газообразные флюсы и восстановительные газовые атмосферы (водород или его заменители: оксид углерода, азотно-водородная смесь).

**Активные припои** — припои, содержащие титан или цирконий, применяются для соединения керамики с металлами.

**Аморфный припой** — металлический сплав на основе меди, никеля, титана или циркония, близкий к эвтектическому составу с добавками аморфизаторов, депрессантов и раскислителей.

**Барьерное покрытие** — металлическое покрытие на паяемом материале, применяемое для предотвращения контакта материала с припоем или затекания припоя на поверхность, не подлежащую пайке (лужению), и не растворяющееся или частично растворяющееся в расплавленном припое.

**Бронза** — двойной или многокомпонентный сплав, состоящий из меди и легирующих элементов (кроме цинка) в разном процентном соотношении.

**Бусиновый спай** — металлический ввод, остеклованный на участке длиной менее 10 мм.

**Вакуум для пайки** — разреженный газ, имеющий давление ниже  $10^5$  Па.

**Высокотемпературная пайка** — характеризуется нагревом зоны пайки (места контакта паяемых материалов и припоя) до температур выше  $450^\circ\text{C}$ .

**Диффузионная пайка** — характеризуется полной кристаллизацией припоя в процессе изотермической выдержки при температуре пайки, обусловлена взаимной диффузией основного металла и припоя.

**Инконель** — семейство аустенитных никель-хромовых жаропрочных сплавов (Ni – Cr – Fe – Mn – Cu – Si).

**Инструментальная сталь** — сталь с содержанием 0,6–1,2 % углерода, отличается высокой твердостью и прочностью, применяется для изготовления инструмента.



**Интерметаллид** — химическое соединение двух или более металлов, имеющее фиксированное соотношение между компонентами.

**Кавитация** — образование пузырьков газа в жидкости, при схлопывании которых возникает большое давление.

**Капиллярная пайка** — пайка, при которой расплавленный припой заполняет паяльный зазор и удерживается в нем преимущественно поверхностным натяжением.

**Карбидообразование** — получение химических соединений с углеродом.

**Ковар** — прецизионный сплав с заданным коэффициентом линейного теплового расширения, обычно состоящий из 29 % никеля, 17 % кобальта и 54 % железа с примесями кремния, углерода, марганца.

**Когезия** — сцепление частей одного и того же однородного тела (жидкого или твердого), характеризует прочность тела и его способность противостоять внешнему воздействию.

**Композиционный припой** — припой, содержащий в своем объеме наполнитель, изготавливаемый из паяемого сплава, его основы или металлов, образующих с ним твердые растворы.

**Константан** — термостабильный сплав на основе меди (около 59 %) с добавкой никеля (39–41 %) и марганца (1–2 %).

**Латунь** — сплав меди с цинком (Zn до 50 %) с добавлением Al, Sn, Fe, Mn, Ni, Si, Pb — в сумме до 10 %.

**Легирующая сталь** — сталь, в которой, кроме углерода и обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы.

**Лужение** — образование на поверхности материала металлического слоя путем плавления припоя, смачивания припоем поверхности и последующей его кристаллизации.

**Металлизация** — метод изменения свойств поверхности изделия путем нанесения на его поверхность слоя металла.

**Монель** — сплав никеля с медью.

**Нейтральная газовая среда** — защитная среда инертного газа: аргона, гелия или азота, используется при пайке нержавеющей и жаропрочных сталей, вольфрама и титана.

**Некапиллярная пайка** – пайка, при которой расплавленный припой заполняет зазор преимущественно под действием своей массы или прилагаемой извне силы.

**Низкотемпературная пайка** – характеризуется нагревом зоны пайки (места контакта паяемых материалов и припоя) не выше температуры 450 °С.

**Нихрóm** – сплав никеля и хрома с добавками марганца, кремния, железа, алюминия.

**Пайка** – образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации.

**Пайкосварка** – пайка, при которой соединяемым кромкам заготовок придается форма, подобная разделке кромок при сварке плавлением. Соединение деталей осуществляется приемами, характерными для сварки, только в качестве присадочного металла используется припой.

**Паяемость** – способность основного материала вступать в физико-химическое взаимодействие с расплавленным припоем и образовывать паяное соединение.

**Паяльный флюс** – вещество (чаще смесь веществ) органического и неорганического происхождения, предназначенное для удаления окисных пленок с паяемого материала и припоя и предотвращения их образования.

**Припой** – материал, применяемый при пайке для соединения заготовок и имеющий температуру плавления ниже, чем соединяемые металлы.

**Расстекловывание** – процесс кристаллизации стеклообразного (аморфного) материала путем последовательного кристаллографического упорядочения.

**Распайка** – разъединение изделия по шву в результате нагрева материала шва выше температуры его солидуса.

**Растекаемость** – распределение расплавленного припоя по поверхности паяемого материала. Определяется соотношением сил адгезии припоя к поверхности и когезии, характеризуемой силами связи между частицами припоя.

**Режим пайки** — совокупность параметров и условий, при которых осуществляется пайка.

**Самофлюсующий припой** — припой, содержащий элементы-раскислители с сильным химическим сродством к кислороду, способствующие улучшению растекаемости припоя и смачиваемости им паяемого металла.

**Силицированный графит** — эрозионно- и коррозионно-стойкий материал на основе карбида кремния, углерода и кремния. Обладает высокой жаропрочностью, жаростойкостью, износостойкостью, стойкостью к агрессивным средам и многократным теплосменам.

**Сваркопайка** — пайка разнородных материалов, при которой более легкоплавкий материал, нагреваясь до температуры, превышающей температуру его плавления, выполняет роль припоя.

**Смачиваемость** — сцепление молекул жидкости (припоя) с твердой поверхностью (паяемым материалом), в результате которого жидкость необратимо растекается по твердой поверхности.

**Стеклоприпой** — смеси окислов металлов, имеющие такие же, как у керамики, температурные коэффициенты линейного расширения и необходимые температуры размягчения.

**Сталь** — сплав железа с углеродом, в котором массовая доля углерода составляет не более 2,14 %.

**Стоп-материал** — покрытие, наносимое на поверхность паяемого материала в те места, где нежелательно его смачивание жидким припоем.

**Сублимация** — переход вещества из твердого состояния без плавления в газообразное.

**Термоциклирование** — процесс резкой смены температурного режима, повторяющийся несколько раз.

**Технологическое покрытие** — металлическое покрытие на паяемом материале, применяемое для защиты его от окисления при нагреве, участвующее в контактном плавлении и растворяющееся в расплавленном припое.

**Точка росы** — температура воздуха, при которой содержащийся в нем пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в росу (температура выпадения конденсата).

**Травле́ние** — операция удаления окислов с поверхности сплавов в растворах, содержащих смесь серной, азотной и соляной кислоты.

**Оксидная (оксидная) пленка** — пленка на поверхности металла или полупроводника, образующаяся при определенных условиях на воздухе или в слегка окислительной среде и состоящая из окислов этого вещества.

**Охрупчивание** — повышение хрупкости металла по причине изменения его свойств в результате старения, понижения температуры или высокой скорости нагружения.

**Температурный интервал активности флюса** — диапазон температур, при которых проявляется способность флюса к удалению окислов и водной пленки с поверхностей паяемого металла и припоя и предотвращению ее образования при пайке на воздухе.

**Формирга́з (формовочный газ)** — смесь из 95 % азота и 5 % водорода.

**Халькогениды** — бинарные химические соединения халькогенов (кислород, сера, селен, теллур, полоний и ливерморий) с металлами.

**Чугун** — сплав железа с углеродом, содержащий углерода более 2,14 %.

**Эвтектика** — смесь двух и более компонентов, плавящаяся при минимальной температуре.

**Эксика́тор** — сосуд, в котором поддерживается определенная влажность воздуха (обычно близкая к нулю), изготовленный из толстого стекла или (реже) пластика.