

И. Е. ПЕТРУНИН
С. Н. ЛОЦМАНОВ
Г. А. НИКОЛАЕВ

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

И. Е. ПЕТРУНИН, С. Н. ЛОЦМАНОВ, Г. А. НИКОЛАЕВ

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

Издание 2-е, исправленное и дополненное

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов машиностроительных специальностей вузов



Москва „МЕТАЛЛУРГИЯ“ 1973

УДК 621.791.3

Пайка металлов. Петрунин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. А. М., «Металлургия», 1973, 2-е изд., с. 280.

Отражена сущность современных процессов пайки, описаны особенности конструирования паяных соединений, технология пайки и применяемое оборудование. Целый раздел посвящен контролю качества паяных изделий, техническому нормированию и технике безопасности при выполнении паяльных работ.

При изложении теоретических вопросов рассмотрены строение и свойства окисных пленок на металлах, способы удаления их при пайке, процессы смачивания и капиллярного течения припоев, процессы диффузии, растворения и кристаллизации при пайке. Освещена методика механических испытаний и металлографических исследований паяных соединений.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов вузов, а также может быть использована конструкторами и технологами, занимающимися проектированием и изготовлением паяных изделий. Ил. 143. Табл. 52. Список лит.: 58 назв.

Петрунин Иван Егорович, Лоцманов Сергей Николаевич

Николаев Георгий Александрович

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

Редактор издательства О. М. Хиврич

Технический редактор Э. А. Кулакова

Переплет художника А. Я. Беднарского

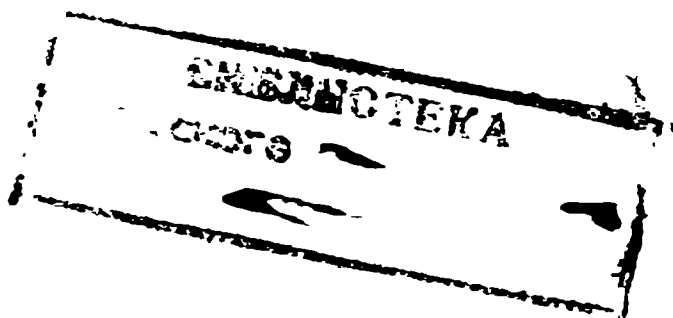
Фундаментальная
библиотека

3328900

Сдано в набор 28/VII 1972 г. Подписано в печать 23/I 1973 г. Т-01670
Формат 60/90 ¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Печ. л. 17,50. Уч.-изд. л. 18,39
Тираж 19 000 экз. Изд. № 2492. Заказ 1892. Цена 80 коп.

Издательство «Металлургия». Москва, 119034, 2-й Обыденский пер., 14

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10



П 3103—046
040(01)—73

П р е д и с л о в и е

Пайка — групповой метод обработки, позволяющий одновременно соединять любое число деталей. Механизация и автоматизация этого процесса резко повышают производительность труда. Пайка позволяет соединять однородные и различные неоднородные материалы: разнородные металлы, металлы со стеклом, керамику с полупроводниками, металлы с графитом, фарфором и многие другие. При пайке не расплавляются соединяемые кромки деталей, что позволяет более точно выдерживать их заданные размеры и форму.

При рациональном подборе паяемых материалов и припоев и использовании конструкций с оптимальной площадью перекрытия надежность паяных соединений по сравнению со сварными в четыре раза выше для самолетов и в 20 раз выше для космических аппаратов [1]. В связи с этим вполне закономерен интерес к пайке со стороны специалистов самых различных отраслей техники. С широким внедрением новых конструкционных материалов и переходом на легированные стали, сварка которых затруднена, значение пайки будет возрастать. Поэтому важно не только знать технологию пайки, но и изучить физико-химические явления, протекающие при формировании паяных швов и работе паяных соединений.

Как наука и как производственный процесс пайка развивается на базе физической химии, термодинамики, металловедения, технологии металлов, поэтому курс «Пайка металлов» необходимо изучать после прохождения этих дисциплин.

Предлагаемое учебное пособие написано в соответствии с программой, утвержденной для студентов специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Глава VI написана Г. А. Николаевым и И. Е. Петруниным, глава III — И. Е. Петруниным, остальной материал написан совместно И. Е. Петруниным и С. Н. Лоцмановым.

Введение

Пайка является наиболее древним способом соединения металлов. На основе археологических раскопок известно, что человек достаточно хорошо владел ею еще 3—5 тысяч лет назад. Так, при раскопках на территории Древнего Египта были найдены паяные медно-серебряным припоем трубы, которые, по заключению специалистов, были изготовлены около пяти тысяч лет назад [2]. На территории этой страны при раскопках находят паяные изделия, относящиеся к еще более раннему периоду [3].

На территории СССР также было найдено множество самых различных паяных изделий, относящихся к глубокой древности. Обычно это оружие, предметы домашнего обихода и украшения. Особенно много материалов, характеризующих применение пайки в Древней Руси, дали раскопки на Южном Урале и около Киева [4, 5].

В развитие пайки металлов внесли вклад русские ученые. Так, например, М. В. Ломоносов впервые наблюдал и описал явление спаивания металлов в разряде атмосферного электричества [6]. Д. И. Менделеев в своем капитальном труде «Основы химии» первым дал объяснение процесса флюсования при пайке с применением в качестве флюса водного раствора хлористого цинка [7].

В XVIII и XIX вв. в связи с развитием промышленности пайка вышла за рамки ремесла; ее стали применять также в производственных условиях. Первыми оценили преимущества высокотемпературной пайки тульские оружейники, начав широко применять ее для соединения ответственных деталей [8]. Однако, несмотря на эти примеры, пайка оставалась ремеслом и применение ее в промышленности было весьма ограниченным. Только в 30-х годах текущего столетия в связи с потребностями массового производства и появлением таких новых источников нагрева, как электрические печи и высокочастотные установки, пайку начали широко применять в промышленности. Именно в этот период разработан способ пайки в высокопроизводительных конвейерных электропечах и созданы автоматы для индукционной вакуумной пайки.

Советские ученые С. Н. Лоцманов, А. И. Губин, Р. Е. Есин-берлин, С. В. Лашко, В. П. Фролов и др. внесли большой вклад в развитие пайки металлов и во многом способствовали ее прогрессу. В нашей стране разработаны и внедрены в производство высокопрочные и кислотостойкие припои, активные газовые среды, специальные

печи для пайки крупногабаритных изделий; успешно решается задача пайки титановых, алюминиевых и магниевых сплавов, а также пайки металлов с полупроводниками, графитом, керамикой и другими материалами. После второй мировой войны начался период бурного развития пайки, вызванного прогрессом в атомной, ракетной, радиоэлектронной и других отраслях новой техники. Пайка металлов быстро превращается в современный высокопроизводительный технологический процесс.

В настоящее время пайку металлов применяют во всех отраслях техники — машиностроении, автотракторостроении, станкоинструментальной промышленности, самолето- и ракетостроении, радиоэлектронике и других отраслях техники.

В автотракторостроении пайку применяют в производстве радиаторов, а также при изготовлении трубопроводов топливных и масляных систем и ряда других деталей. Механизация процессов пайки позволяет улучшить качество паяных соединений и значительно сократить расход дефицитных оловянносвинцовых припоев. Так, на Московском автозаводе им. Лихачева успешно работает автоматическая линия по изготовлению автомобильных радиаторов, позволившая высвободить большое число рабочих. Значительный интерес представляет внедрение в автотракторном моторостроении паяных блоков цилиндров и даже картеров двигателей, изготовленных из стальных тонкостенных заготовок. Опыт показывает, что паяные блоки менее трудоемки в изготовлении, значительно легче литых и имеют лучшие эксплуатационные свойства.

В станкоинструментальной промышленности широко используется пайка при изготовлении режущего инструмента, в особенности из твердых сплавов. Механизация и автоматизация процессов пайки снижают трудоемкость изготовления инструмента, увеличивают выпуск и повышают его качество. В самолетостроении наметился переход от алюминиевой обшивки, соединяемой клепкой, на конструкции, изготавливаемые из высокопрочных нержавеющей сталей в виде паяных в печи панелей с сотовым наполнителем; пайка является основным процессом при производстве камер сгорания жидкостных ракетных двигателей, качественно изготовить которые удастся только с помощью пайки (рис. 1).

В радиоэлектронной промышленности пайка позволила коренным образом изменить существовавшие до этого принципы конструирования и производства радиоаппаратуры. Например, создание печатных радиосхем (плат) дало возможность автоматизировать весь комплекс технологических процессов изготовления радиоаппаратуры.

Одним из основных преимуществ пайки является возможность соединения за один прием множества заготовок. На рис. 2 показан направляющий аппарат газовой турбины, изготовленный за один нагрев пайкой. Таким образом, пайка выдвигается из ряда родственных ей процессов как групповой метод обработки металлов и, следовательно, наиболее соответствующий условиям массового производства. Производя несложную механическую обработку заготовок, полученных прокаткой, прессованием, штамповкой или литьем,

можно собирать разнообразные по форме детали, которые затем при помощи пайки могут быть соединены в сложные узлы и конструкции. При этом достигается высокий коэффициент использования мате-

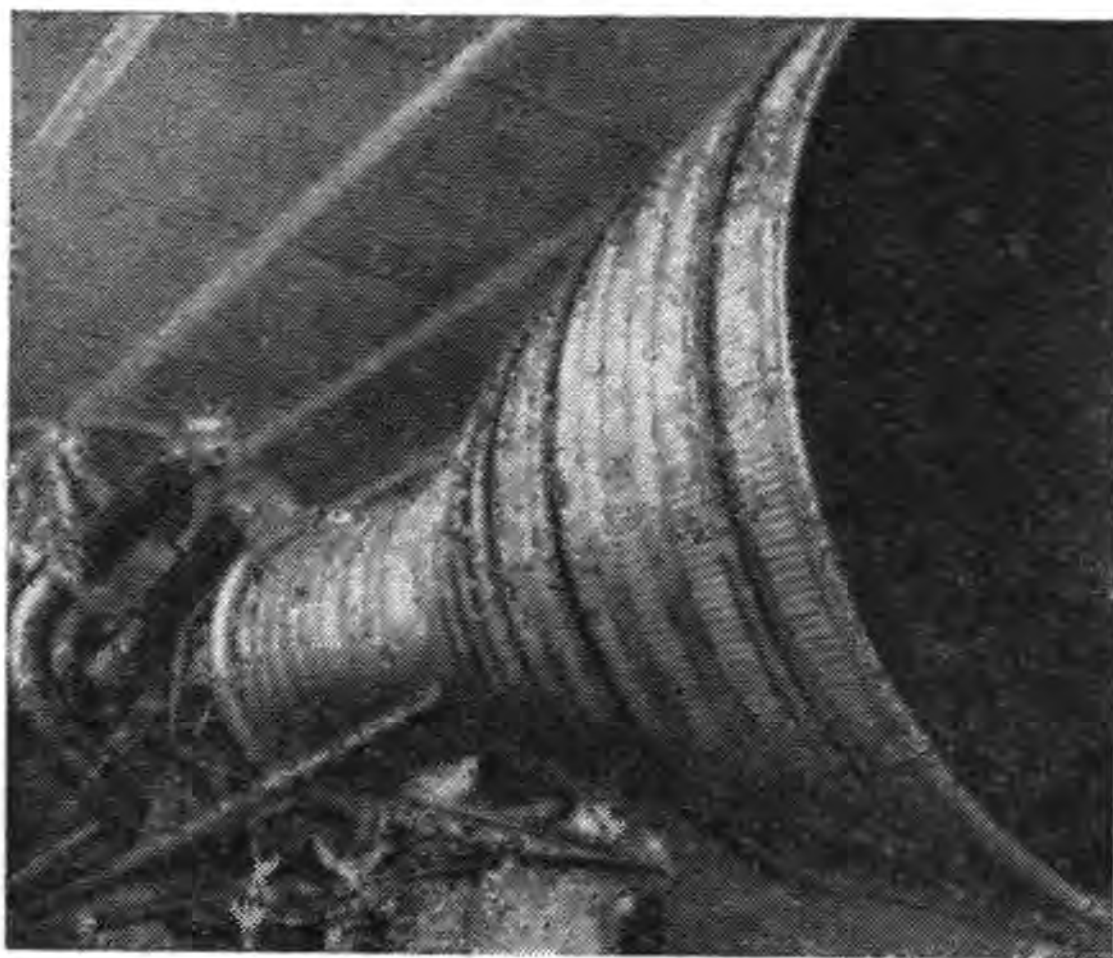


Рис. 1. Камера сгорания современного ракетного двигателя, изготовленная пайкой

риала в заготовках, поскольку значительно сокращается объем обработки резанием, а следовательно, отход металла в стружку.

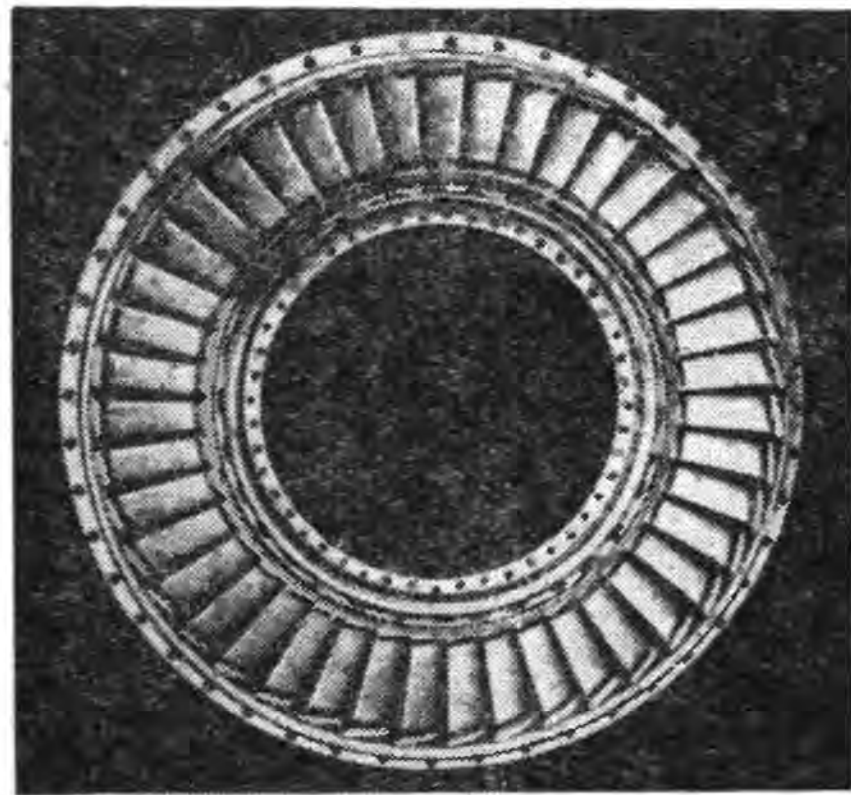


Рис. 2. Направляющий аппарат газовой турбины, изготовленный пайкой

Таким образом, пайка выступает в роли процесса предварительной или даже окончательной сборки деталей, входящих в узел или целую конструкцию. На этом основании пайку часто рассматривают как сборочный процесс, относя его к методам получения неразъемных соединений. Это утверждение, однако, неправильно, так как в ряде случаев паяные соединения делают специально разъемными. Исходя из этого пайку следует рассматривать как метод получения не только неразъемных, но и разъемных соединений. Последнее

свойство пайки широко используют для контровки деталей гидравлических агрегатов, при монтажных работах в радиоприборостроении, при замене трубок в радиаторах и т. д.

К числу особенно важных преимуществ пайки относится возможность соединения разнородных металлов и металлов с неметалличе-

скими материалами. Соединение разнородных металлов, резко отличающихся по своим свойствам, а также металлов с керамикой, графитом, полупроводниками и другими неметаллическими материалами позволяет находить принципиально новые конструктивные решения во многих областях техники.

Лишь преимуществами пайки можно объяснить значительные темпы механизации и автоматизации этого процесса, например, в США в последние годы.

Конструктивные, технологические и экономические преимущества механизированных способов пайки, высокая надежность паяных изделий свидетельствуют о целесообразности широкого внедрения этого технологического процесса в машиностроении, особенно в условиях массового производства деталей малых и средних размеров из заготовок, получаемых механической обработкой, прокаткой, штамповкой или литьем.

При сварке, даже самой механизированной, сварочным инструментом необходимо обрабатывать индивидуально каждое место соединения. В отличие от этого механизированная печная пайка является групповым методом обработки, обеспечивая высокую производительность труда.

В наше время в связи с переходом на легированные стали, применением неметаллических и композитных материалов пайка является более перспективным по сравнению со сваркой технологическим процессом, поэтому массовое внедрение механизированных способов пайки в промышленность позволит резко повысить производительность труда, снизить металлоемкость конструкций, уменьшить отход металла в стружку, поднять культуру производства, что будет способствовать быстрейшему решению грандиозных задач коммунистического строительства в нашей стране.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПАЙКИ МЕТАЛЛОВ

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

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

Материалы, подвергаемые пайке, называют паяемыми, соединяемыми или основными. Вводимый между ними для соединения металл или сплав, имеющий более низкую температуру плавления, называют припоем.

Из определения пайки следует, что процесс образования паяного соединения связан с нагревом. Для получения спая¹, т. е. связывающего основной металл и припой переходного слоя (возникающего в результате смачивания при температуре пайки и последующего взаимодействия твердого и жидкого металлов), наряду с нагревом необходимо еще удалить с поверхности металлов в процессе пайки окисную пленку. При кристаллизации выступившего во взаимодействие с паяемыми металлами более легкоплавкого связующего металла (припоя) образуется паяное соединение.

При исследовании микроструктур паяных соединений в них различают зону сплавления, зоны спая и диффузионные зоны.

Зоной сплавления называют участок паяного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации находящегося в соединительном зазоре сплава.

Зоной спая называется переходный слой на границе основной металл — зона сплавления, состоящий из диффузионной зоны и прикристаллизованного слоя, образовавшегося в результате выделения из расплава более тугоплавкой составляющей.

Диффузионными зонами называют участки основного металла, примыкающие к зоне сплавления и имеющие измененную структуру и свойства в результате диффузии в процессе пайки компонентов припоя и основного металла.

Процесс пайки металлов имеет много общего со сваркой плавлением, но, несмотря на внешнее сходство, между ними имеются прин-

¹ В работах по пайке металлов с неметаллами термин «спай» часто отождествляется с понятием «паяный шов», что является ошибочным, так как при пайке металлов со стеклом, керамикой, полупроводниками и т. п. шов имеет два спая, различных по природе.

ципиальные различия. Если при сварке плавлением свариваемый и присадочный металлы в сварочной ванне находятся в расплавленном состоянии, то при пайке паяемый металл не плавится. Образование соединения без расплавления кромок паяемых деталей является основной особенностью пайки. Эта особенность обеспечивает важное преимущество пайки — возможность распая, т. е. разъединения паяных соединений без нарушения исходных размеров и формы элементов конструкции.

При пайке формирование шва происходит обычно путем заполнения припоем капиллярного зазора между соединяемыми деталями, т. е. процесс пайки связан с капиллярным течением присадочного металла, чего нет при сварке плавлением.

И, наконец, пайка в отличие от сварки плавлением принципиально может быть осуществлена при любых температурах, лежащих ниже

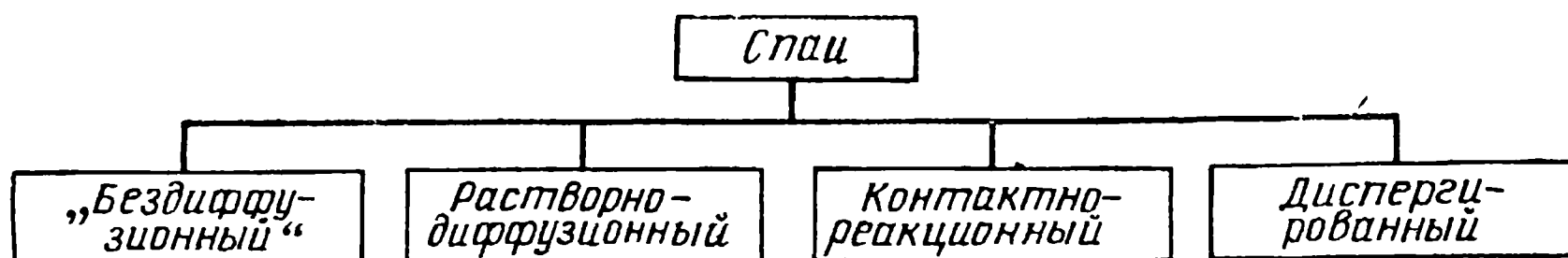


Рис. 3. Классификация спаев

температуры плавления основного металла. При сварке плавлением обязательно расплавление основного металла по месту соединения. Эти различия объясняются, как увидим ниже, иной, чем при сварке плавлением, природой процессов, протекающих при образовании паяного шва.

Исторически сложилось деление пайки на мягкую, выполняемую припоями с температурой плавления до 400—500° С, и твердую, выполняемую припоями с более высокой температурой плавления. Однако, если раньше такое деление служило для разграничения низкотемпературной пайки оловянносвинцовыми припоями и высокотемпературной пайки медными и серебряными припоями, а процессы пайки распространялись главным образом на железоуглеродистые сплавы (медь и ее сплавы), то при многообразии существующих методов пайки и применяемых материалов такое деление утратило смысл.

В настоящее время, когда известны сотни припоев, по указанному признаку пайку разграничить невозможно. Исходя из природы этого способа соединения пайку металлов необходимо рассматривать как единый процесс, который можно осуществлять при любых температурах, лежащих ниже точки плавления основного металла. Поэтому от устаревших терминов, мягкая и твердая пайка, необходимо отказаться.

Приведенные выше условия образования паяного соединения в общих чертах отражают физическую картину, свойственную всем разновидностям пайки, однако в ряде случаев проявляется специфика, имеются некоторые отклонения от этих условий, что привело к необходимости систематизации процессов пайки.

Пайку можно классифицировать по сущности физико-химических процессов, протекающих при формировании спая (рис. 3), по особенностям технологии получения паяных швов (рис. 4) и по способам применяемого нагрева или оборудования (см. рис. 10).

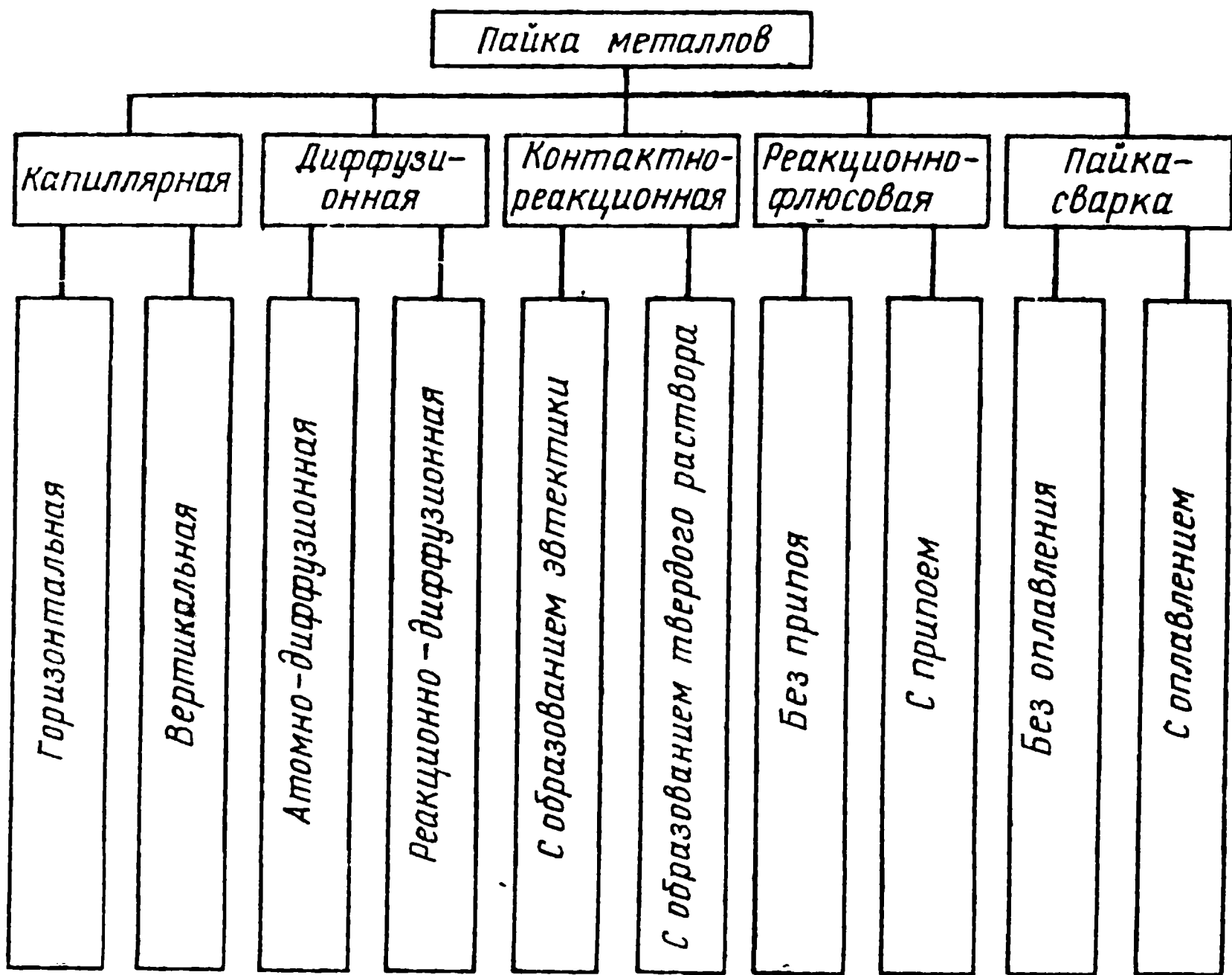


Рис. 4. Классификация видов пайки

§ 1. Виды спаев¹

Образование паяного соединения происходит в результате возникновения химических связей в контакте основной металл — расплав припоя, т. е. в результате образования спаев. При пайке между соединяемыми металлами и расплавленным припоем образуются два спая, которые наряду с прослойкой литого металла в шве обеспечивают прочность паяного соединения. Если при пайке однородных металлов спай по своей природе, составу и строению одинаковы, то при пайке разнородных металлов, металлов с неметаллами характер взаимодействия основного материала с расплавом припоя, природа возникающих связей, состав и структура спаев различны поэтому рассматривать эти спай в шве нужно отдельно.

Взаимодействие основного металла с расплавом припоя приводит к возникновению четырех разновидностей спаев [11]: «бездиффузионного», растворно-диффузионного, контактно-реакционного и диспергированного (рис. 3).

¹ Рассматривается взаимодействие чистых металлов.

При взаимодействии основного металла с расплавом припоя процесс может быть ограничен во времени, будучи зафиксирован на стадии хемосорбции и образования химических связей, когда процессы гетерогенной диффузии в объеме взаимодействующих металлов развития не получили. Такой спай называется б е з д и ф ф у з и о н н ы м. Для образования бездиффузионного спая необходимо, чтобы температура пайки соответствовала температуре смачивания, а продолжительность взаимодействия твердой и жидкой фаз не превышала времени релаксации диффузионных процессов. Прочность соединения при этом обеспечивается за счет возникновения химических связей в двумерном слое, образующимся в зоне спая. Бездиффузионный спай дает соединения, не изменяя физико-химические свойства основного металла, поэтому он наибольшее значение может иметь при соединении полупроводников с металлами, где важно не изменить электрофизические свойства полупроводников.

Растворно-диффузионный спай образуется, когда основной металл и припой обладают взаимной растворимостью, а продолжительность контактирования твердой и жидкой фаз превышает время релаксации пика межфазной энергии. Растворно-диффузионный спай наиболее часто встречается в паяных соединениях. Смачивание основного металла расплавом припоя в условиях нагрева их до одинаковой температуры создает благоприятные условия для развития диффузионных процессов и растворения твердого металла в жидком.

Поскольку в контакте основной металл—расплав припоя реакции идут в гетерогенной среде, между металлами, находящимися в различных агрегатных состояниях, то развитие их связано не только с химическими превращениями, но и с переносом веществ из глубины фаз к поверхности, а также с удалением продуктов взаимодействия из зоны реакции. Скорость этих процессов между основным металлом и расплавом припоя зависит от интенсивности переноса входящих в их состав компонентов в зону реакции, активности взаимодействия и удаления продуктов реакции.

В зависимости от свойств взаимодействующих твердого и жидкого металлов растворно-диффузионный спай могут образовать металлы с неограниченной растворимостью в твердом состоянии, с ограниченной растворимостью, дающие эвтектики и интерметаллические соединения.

Контактно-реакционный спай при пайке образуется в результате контактного плавления соединяемых металлов. Этот вид спая характеризуется следующими особенностями:

- 1) пайка идет при температурах ниже точек плавления взаимодействующих металлов;
- 2) процесс образования спая при температуре пайки начинается при отсутствии жидкой фазы;
- 3) в момент образования жидкой фазы взаимодействующие металлы (при наличии растворимости в твердом состоянии) предельно насыщены диффундирующим в них компонентом;
- 4) развитие процесса взаимодействия в зоне спая при температуре пайки идет в направлении увеличения количества жидкой фазы в шве.

Контактно-реакционный спай возникает, когда соединяемые металлы дают эвтектики или образуют непрерывные твердые растворы с минимумом на кривой ликвидуса.

Пайкой можно получать соединения, когда основной металл и припой не сплавляются и не вступают в химическое взаимодействие. Например, пайка железа успешно протекает при применении в качестве припоя не сплавляющихся с ним серебра и свинца; вольфрам можно паять не сплавляющимися с ним медью, серебром и оловом [12]. В этих случаях взаимодействие расплавов с основным металлом характеризуется диспергированием последнего, поэтому спай между несплавляющимися металлами названы диспергированными.

Для образования диспергированного спая в отдельных случаях требуется высокая степень термической активации. Необходимый

перегрев при пайке вольфрама оловом, медью и серебром указан в табл. 1.

Условия образования спаев в зависимости от температуры и продолжительности пайки, а также схема их строения приведены на рис. 5, на котором показано взаимодействие чистых металлов. Предполагается, что окисная пленка с поверхности основного металла и припоя удалена и не происходит взаимодействие металлов с окружающей средой.

Особенностью «бездиффузионного» спая является отсутствие массопереноса через межфазную границу или, точнее, ограничение массопереноса до значений, которые не обнаруживаются существующими методами анализа. Преимуществом этого вида спая является возможность получения соединения без интерметаллидов. На рис. 6 приведена дифрактограмма бездиффузионного спая на пайке железа оловом. Несмотря на то что в этой системе возможно образование химических соединений, в шве по границе основной металл — припой они не обнаружены.

В растворно-диффузионном спае можно выделить две стадии взаимодействия, которые сказываются на строении спая. Если равновесие не достигается (состав жидкой фазы не соответствует ликвидусу, а твердой — солидусу диаграммы состояния взаимодействующих металлов при температуре пайки), то спай имеет диффузионную зону и прикристаллизованный слой переменного (когда компоненты растворимы в твердом состоянии) или постоянного состава (когда компоненты нерастворимы в твердом состоянии). После достижения равновесия в шве начинается изотермическая кристаллизация, поэтому в спае дополнительно образуется слой изотермической кристаллизации.

При образовании контактно-реакционного спая (в результате контактного плавления двух металлов) режим пайки отражается на

Т а б л и ц а 1

Припой	Температура плавления припоя, °С	Температура пайки, °С	Перегрев, °С
Олово	231,9	930	698,1
Серебро	960,8	1300	339,2
Медь	1083,0	1120	37

его строения. Если температура пайки соответствует эвтектической или минимуму на кривой ликвидуса (в системах с неограниченной растворимостью), то зона сплавления имеет однородный состав —

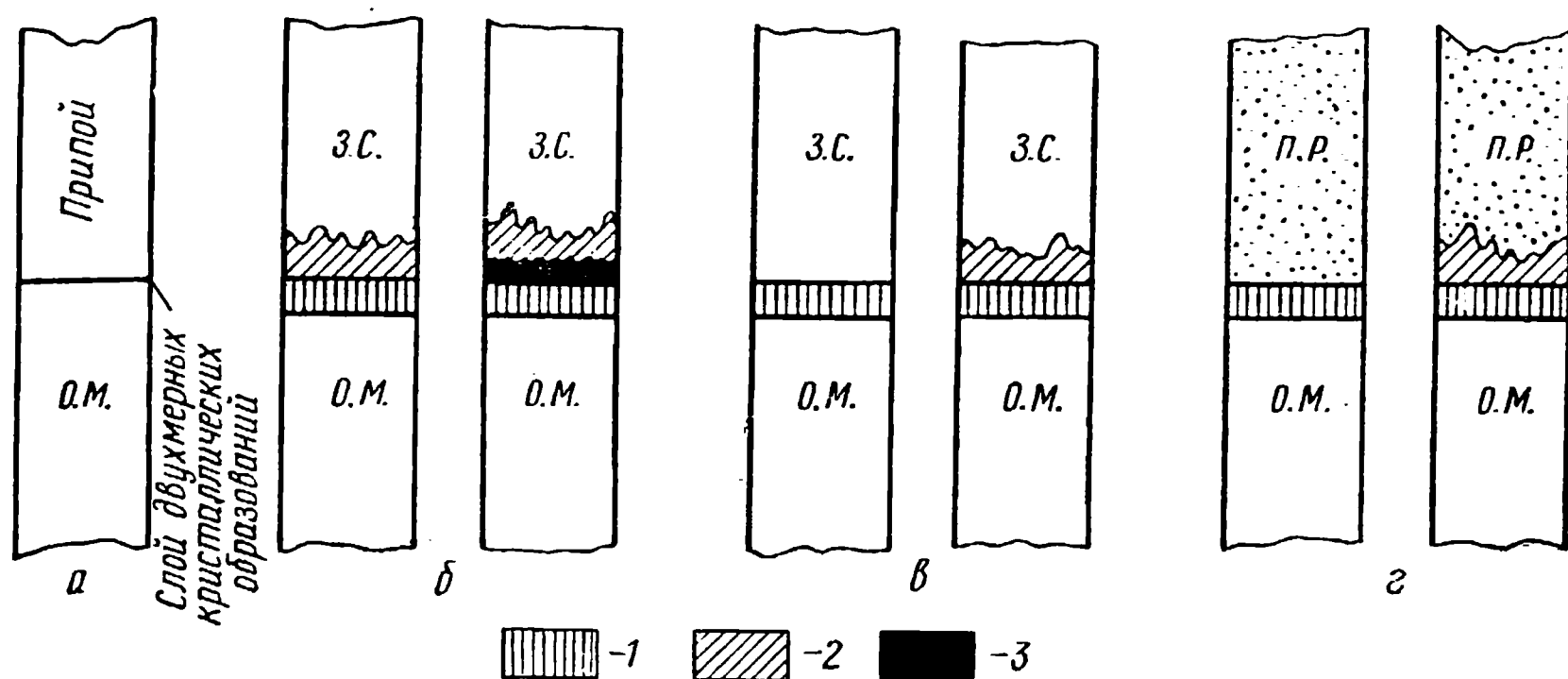


Рис. 5. Схема строения спаев:

а — бездиффузионный: $T_{\text{п}} \approx T_{\text{см}}$, $\tau_{\text{п}} < \tau_{\text{р}}$; б — растворо-диффузионный: $T_{\text{пл. пр}} \leq T_{\text{п}} < T_{\text{пл. ом}}$, $\tau_{\text{р}} < \tau_{\text{п}} < \tau_{\text{ик}}$; в — контактно-реакционный: $T_{\text{пл. эвт (тв. р.)}} \leq T_{\text{п}} < T_{\text{пл. ом}}$, $\tau_{\text{р}} < \tau_{\text{п}} < \tau_{\text{нс}}$; г — диспергированный: $T_{\text{см}} \leq T_{\text{п}} < T_{\text{пл. ом}}$, $\tau_{\text{р}} < \tau_{\text{п}} < \tau_{\text{нс}}$. $T_{\text{п}}$, $T_{\text{см}}$, $T_{\text{пл. пр}}$, $T_{\text{пл. ом}}$, $T_{\text{пл. эвт (тв. р.)}}$ — соответственно температура пайки, смачивания, плавления припоя, плавления основного металла, плавления эвтектики (твердого раствора), $\tau_{\text{п}}$, $\tau_{\text{р}}$, $\tau_{\text{ик}}$, $\tau_{\text{нс}}$ — соответственно время выдержки при температуре пайки, ретардации диффузионных процессов, изотермической кристаллизации, образования непрерывной структурной связи в шве; О. М. — основной металл; З. С. — зона сплавления, П. Р. — псевдо-раствор основного металла в припое; 1 — диффузионная зона; 2 — прикристаллизованный слой; 3 — слой изотермической кристаллизации

эвтектика или твердый раствор, кристаллизующийся при постоянной температуре. Спай в этом случае имеет диффузионную зону, основание которой является подложкой для кристаллизации зоны сплавления. Если температура пайки превышает эвтектическую или минимум на кривой ликвидуса, то кристаллизация зоны сплавления идет с выделением на подложку избыточной фазы постоянного или переменного состава. Кристаллизация в этом случае идет с разделением жидкого раствора и выделением твердой фазы на родственную подложку.

Диспергированный спай дают металлы, не сплавляющиеся и не образующие химических соединений. Строение спаев в этом случае зависит от интенсивности диспергирования. Если дисперсные частицы равномерно распределены в расплаве припоя и при кристаллизации не выделяются, то спай состоит из диффузионной зоны, образовавшейся в результате мигра-

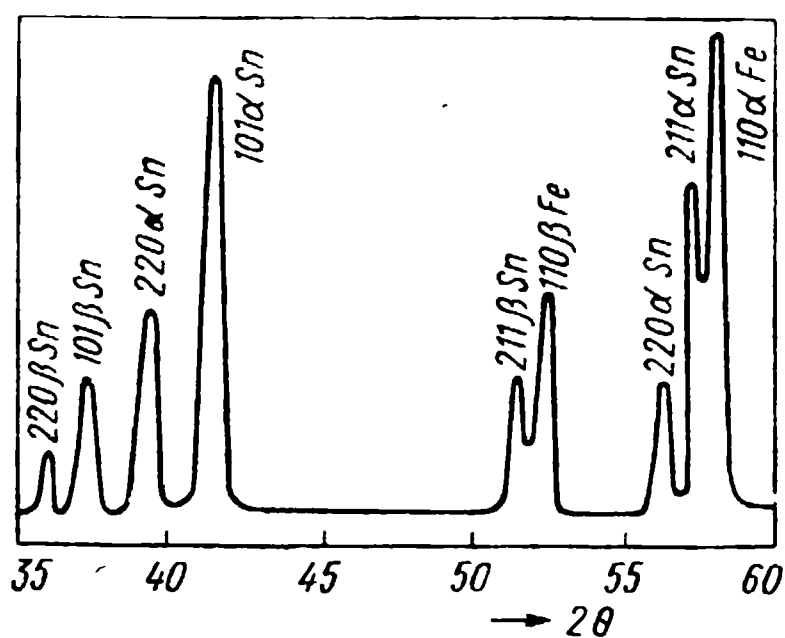


Рис. 6. Дифрактограмма «бездиффузионного» спаия при пайке железа оловом. Температура пайки 240° С, флюс — семи-карбазид

ции припоя по границам зерен и дефектам структуры основного металла. При определенном содержании в шве дисперсные частицы выделяются на подложку, образуя прикристаллизованные слои.

§ 2. Виды пайки

По особенностям процесса и технологии пайку можно подразделить на капиллярную, диффузионную, контактно-реакционную, реакционно-флюсовую и пайку-сварку. Классификация пайки по видам приведена на рис. 4.

Капиллярной называют пайку, при которой припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями деталей и удерживается в нем за счет капиллярных сил.

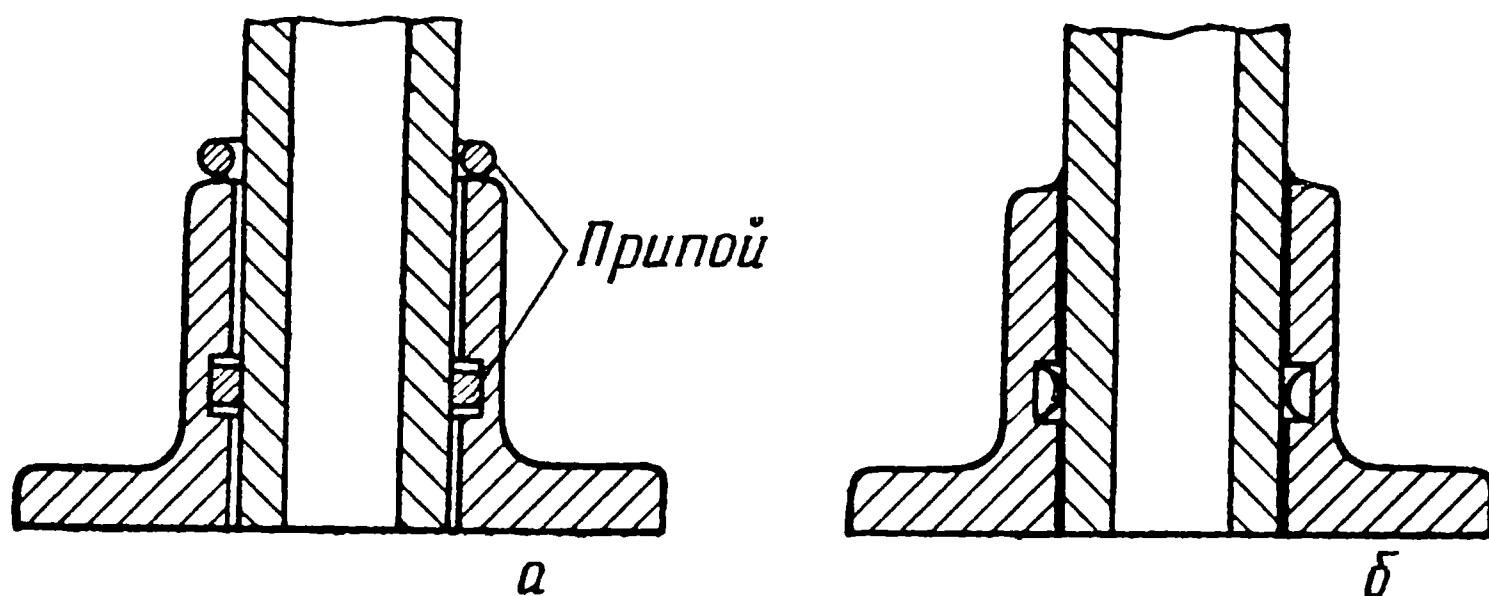


Рис. 7. Схема образования шва при капиллярной пайке:

а — перед пайкой; б — после пайки

живается в нем за счет капиллярных сил. Схема образования шва при капиллярной пайке приведена на рис. 7.

Эта разновидность пайки наиболее распространена. Во всех случаях, когда в паяном соединении имеется перекрытие элементов деталей (нахлестка), возможна капиллярная пайка. Однако капиллярные явления присущи всем видам пайки, поэтому данный термин является условным, обозначающим процессы пайки, связанные с течением припоев под действием капиллярных сил.

Капиллярная пайка может быть горизонтально-капиллярной и вертикально-капиллярной в зависимости от положения паяного шва в пространстве. При вертикальном течении припой в зазоре может подниматься на ограниченную высоту и, следовательно, величина нахлестки соединяемых элементов паяемых деталей при этом не может быть больше вполне определенного значения. При горизонтально-капиллярной пайке теоретически припой может течь неограниченно. Однако, поскольку припой в процессе пайки вступает во взаимодействие с основным металлом и, насыщаясь им, изменяет свои свойства, то горизонтальное течение его будет также ограниченным, но в меньшей мере, чем при вертикально-капиллярной пайке. Исходя из этого при конструировании паяных изделий и производстве паяльных работ необходимо стремиться создавать условия для горизонтального течения припоев.

Д и ф ф у з и о н н о й называют пайку, отличающуюся длительной выдержкой с целью упрочнения соединения за счет диффузии компонентов припоя и паяемых металлов.

При диффузионной пайке в зависимости от сочетания основного металла и припоя, во-первых, возможно образование в шве твердого раствора, благодаря чему существенно повышается пластичность и прочность паяного соединения. Например, при пайке никеля медью в результате диффузионных процессов происходит образование в шве твердого раствора со столь постепенным изменением концентрации компонентов, что иногда трудно установить границу между основным металлом и припоем.

Во-вторых, в процессе диффузионной пайки возможно образование в шве весьма тугоплавких, но, как правило, хрупких интерметаллидов. Их образование обусловлено протеканием реакционной диффузии, которая приводит к повышению температуры плавления металла шва и, следовательно, к повышению жаропрочности паяных соединений. Так, например, при пайке вольфрама припоем платина—бор с температурой плавления 855°C протекает реакция $3\text{W} + \text{PtB} \rightarrow \text{PtW} + \text{W}_2\text{B}$ с образованием в шве сплава с температурой плавления выше 2000°C [13, 14].

Приведенные примеры позволяют выделить две основные разновидности диффузионной пайки: атомно-диффузионную и реакционно-диффузионную.

В практике пайки при различных сочетаниях основного металла и припоев, иногда весьма сложного состава, такие разновидности диффузии возможны в одном паяном шве.

Диффузионную пайку можно проводить с выдержкой в процессе пайки при температуре образования паяного шва и после завершения процесса пайки при температуре ниже солидуса припоя. В первом случае зона сплавления затвердевает при температуре пайки в результате изотермической кристаллизации, являющейся наиболее характерным признаком диффузионной пайки. Во втором случае длительная выдержка дается после завершения процесса пайки при температуре ниже солидуса припоя и упрочнение шва достигается в результате изменения состава зоны сплавления вследствие диффузии в твердом состоянии, что фактически является не пайкой, а термообработкой.

К о н т а к т н о - р е а к ц и о н н о й называется пайка, при которой между соединяемыми металлами или между соединяемыми металлами и прослойкой другого металла в результате контактного плавления образуется сплав, который заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение.

Примером контактно-реакционной пайки при взаимодействии между паяемыми металлами является соединение меди с серебром без нанесения припоя. При нагреве до температуры пайки происходит контактное плавление соединяемых металлов с образованием сплава медь—серебро. Аналогичное взаимодействие может протекать между одним из соединяемых металлов и покрытием на втором или между соединяемыми металлами и фольгой третьего металла, вводи-

мого в зазор между ними. При этом пайка в отличие от обычных условий производится при температуре ниже температуры плавления покрытия или фольги. Схема контактно-реакционной пайки приведена на рис. 8.

Взаимодействие между соединяемыми металлами и прокладкой второго металла можно наблюдать, например, при соединении стали или никеля палладием (в качестве второго металла), который образует с ними сравнительно легкоплавкие сплавы типа твердого раствора.

Реакционно-флюсовой называют пайку, при которой припой образуется за счет реакции вытеснения между основным ме-

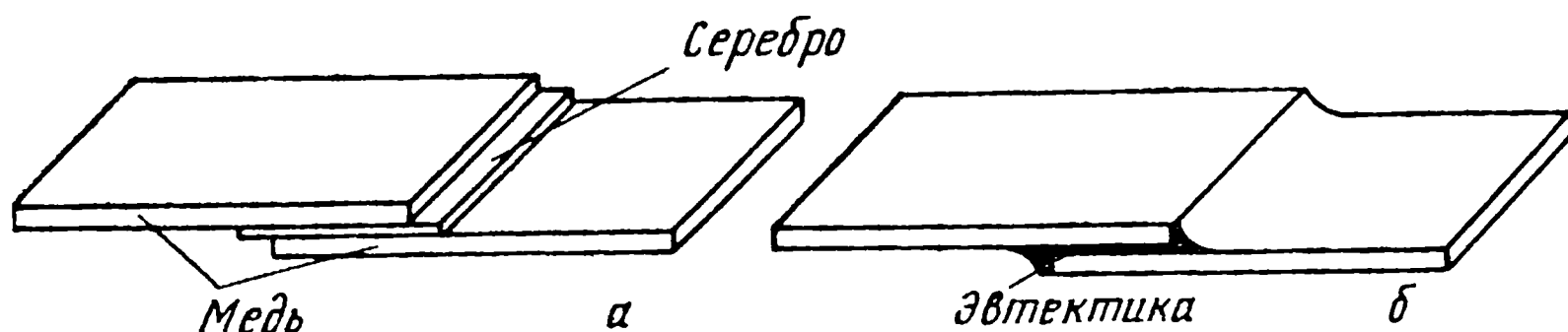


Рис. 8. Схема образования шва при контактно-реакционной пайке:
а — перед пайкой; б — после пайки при температуре 779° С

таллом и флюсом. Реакционно-флюсовая пайка может осуществляться в двух вариантах: без введения припоя и с дополнительным введением припоя.

Примером реакционно-флюсовой пайки без введения припоя является пайка алюминия с флюсом, содержащим большое количество хлористого цинка. При пайке на соединяемые поверхности алюминиевых деталей наносят избыточное количество флюса. При нагреве между хлористым цинком и алюминием протекает реакция $3\text{ZnCl}_2 + 2\text{Al} = 2\text{AlCl}_3 + 3\text{Zn}$.

Восстановленный из хлорида цинк является припоем. Он осаждается на поверхности алюминия, затекает в зазор и соединяет паяемые детали. При больших зазорах или при недостаточно обильном флюсовании в зазор дополнительно вводят припой.

Пайкой-сваркой называется пайка, при которой паяное соединение образуется способами, характерными для сварки плавлением, но в качестве присадочного материала применяется припой.

Пайка-сварка подразделяется на пайку без оплавления кромок соединяемых деталей и с оплавлением кромок одной из соединяемых деталей, изготовленной из более легкоплавкого металла. Схема образования шва при пайке-сварке приведена на рис. 9.

Лужение. Родственным пайке процессом является лужение. Лужением называется способ покрытия поверхности металлов тонким слоем расплавленного припоя с образованием в контакте основной металл—припой сплавов переменного состава с теми же зонами, что и при пайке. Если при пайке прочность паяного соединения определяется прочностью двух спаев и зоны сплавления, то при лужении прочность связи слоя полуды с основным металлом зависит от прочности переходного слоя (спая) между ними.

Лужение можно применять как предварительный процесс с целью создания более надежного контакта между основным металлом и припоем или как покрытие для защиты металлов от коррозии. Для повышения прочности спая при лужении иногда проводят последующую термическую обработку.

Наиболее широкое применение в производстве паяных конструкций в настоящее время получила капиллярная пайка. Диффузионная и контактно-реакционная пайки менее изучены, но они обеспечивают высокое качество паяных соединений. Их целесообразно применять в тех случаях, когда в процессе пайки можно обеспечить минимальные зазоры между соединяемыми деталями.

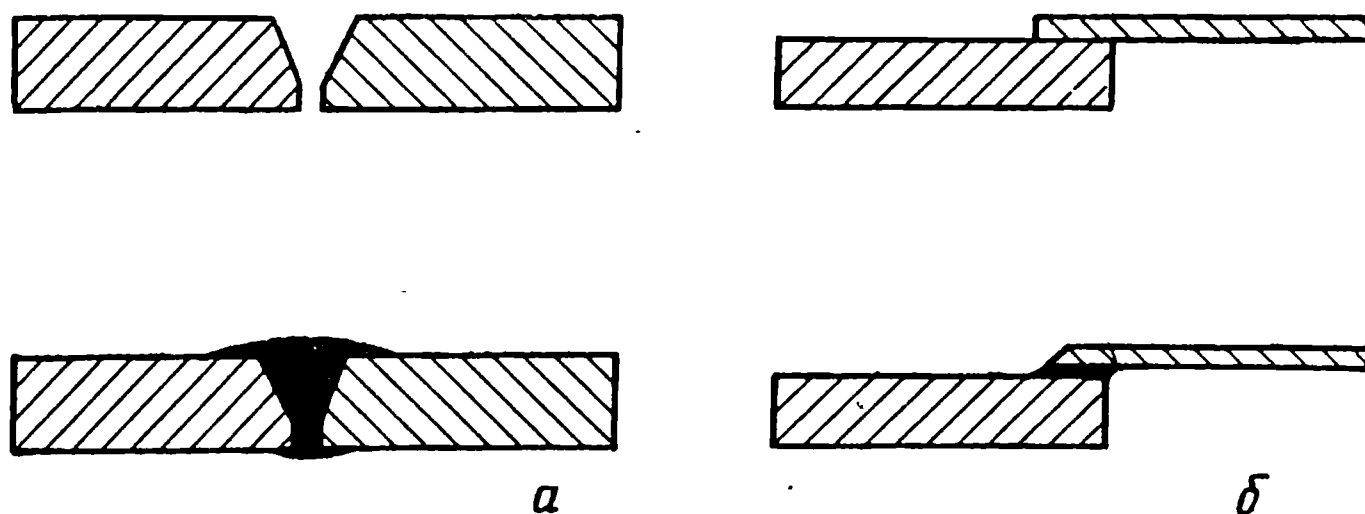


Рис. 9. Схема образования шва при пайке-сварке:

а — без оплавления кромок деталей; б — с оплавлением кромки одной детали;
1 — до пайки; 2 — после пайки

Пайку-сварку обычно применяют при устранении поверхностных дефектов в литых деталях. Для соединения конструкционных материалов пайку-сварку применяют сравнительно редко. Реакционно-флюсовая пайка мало изучена и из-за сложности технологии и большого расхода флюса распространения не получила.

При изучении особенностей диффузионной, контактно-реакционной и реакционно-флюсовой пайки следует иметь в виду, что они связаны с заполнением зазора припоем и удержанием расплавленного припоя в зазоре за счет капиллярных сил, что еще раз свидетельствует об условности термина «капиллярная пайка».

§ 3. Способы пайки

Рассмотренные виды пайки могут быть осуществлены различными способами в зависимости от используемых источников нагрева и оборудования. Классификация наиболее распространенных в настоящее время способов пайки приведена на рис. 10.

П а й к а в п е ч а х обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной деформации даже при их больших габаритах и сложной конфигурации. Для пайки применяют печи электросопротивления, с индукционным нагревом и газопламенные. В настоящее время распространение получают также газовые печи с беспламенным горением.

Пайку крупногабаритных деталей проводят в камерных печах с неподвижным подом. Для массовой пайки сравнительно мелких деталей применяют печи с сетчатым конвейером или роликовым подом. В этих печах для предохранения деталей от окисления и повышения качества пайки создают специальную газовую атмосферу.

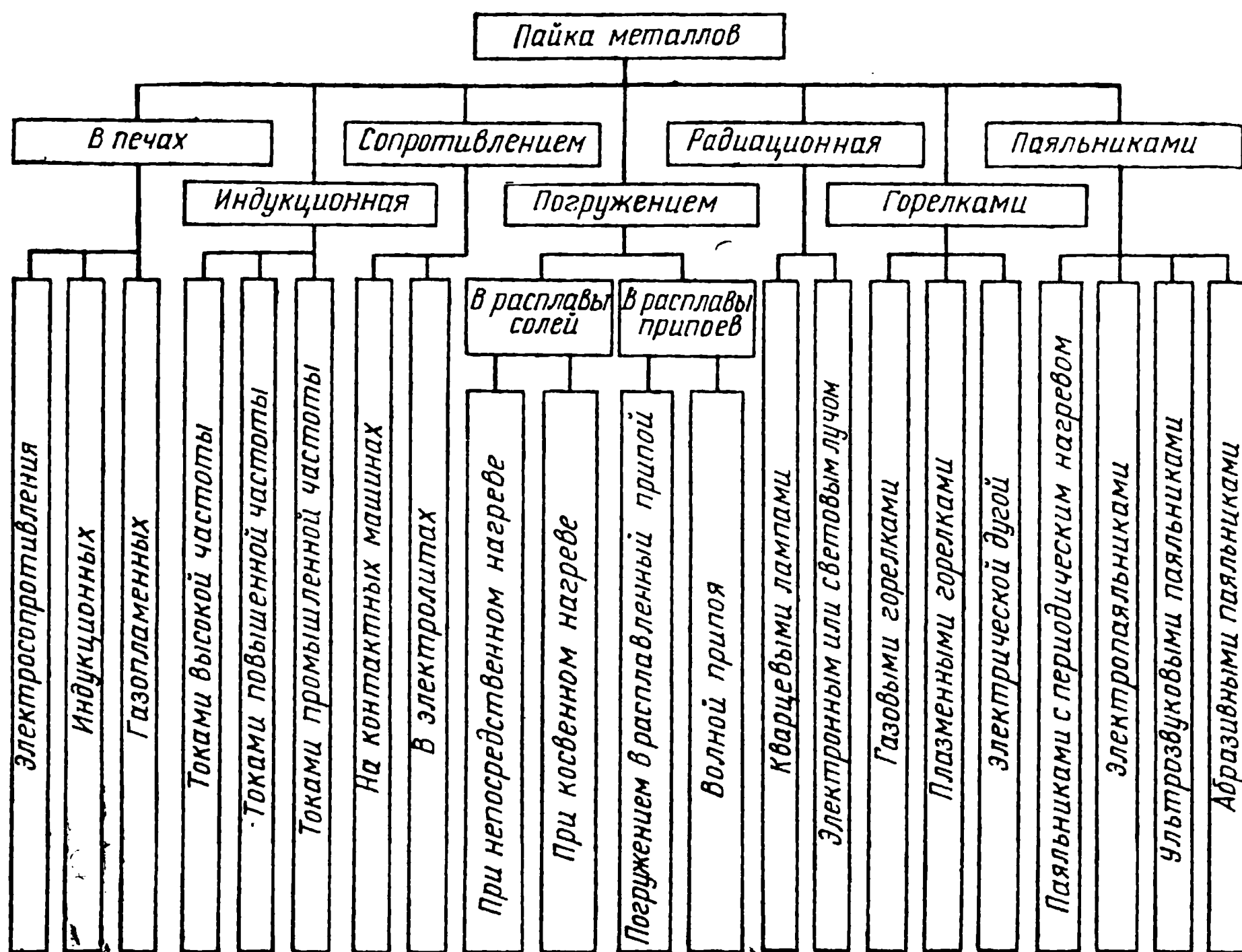


Рис. 10. Классификация способов пайки

Пайка в печах позволяет широко применить механизацию паяльных работ и обеспечить высокую производительность труда и стабильное качество паяных соединений.

Индукционную пайку проводят с нагревом деталей токами высокой, повышенной и промышленной частоты. В этом случае необходимое тепло выделяется за счет тока, индуктируемого непосредственно в подлежащих пайке деталях.

Различают две разновидности пайки с индукционным нагревом: стационарную и с относительным перемещением индуктора или детали. В первом случае длина индуктора должна быть достаточной для нагрева всей зоны пайки и, следовательно, мощность источника питания должна быть большой. Поэтому там, где это возможно, предпочтительнее пайка с перемещением паяемого изделия через неподвижный, одновитковый индуктор. Схема индукционного нагрева приведена на рис. 11.

Пайка сопротивлением происходит за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока через паяемые детали и токоподводящие элементы. При этом соединяемые детали являются частью электрической цепи. Нагрев сопротивлением осуществляется или на контактных машинах, аналогичных сварочным, или в электролитах. Пайка с нагревом на контактных машинах типа сварочных или в контактных клещах имеет большое распространение и применяется при изготовлении тонкостенных изделий из листового материала, а также при соединении тонкостенных элементов с толстостенными.

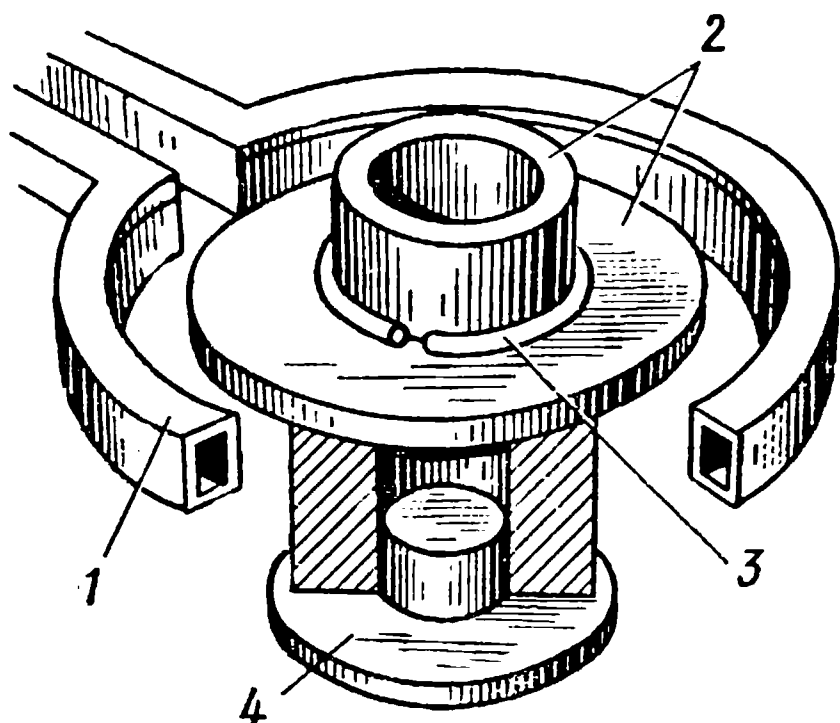


Рис. 11. Схема индукционного нагрева при пайке:

1 — индуктор; 2 — паяемая деталь; 3 — припой; 4 — подставка

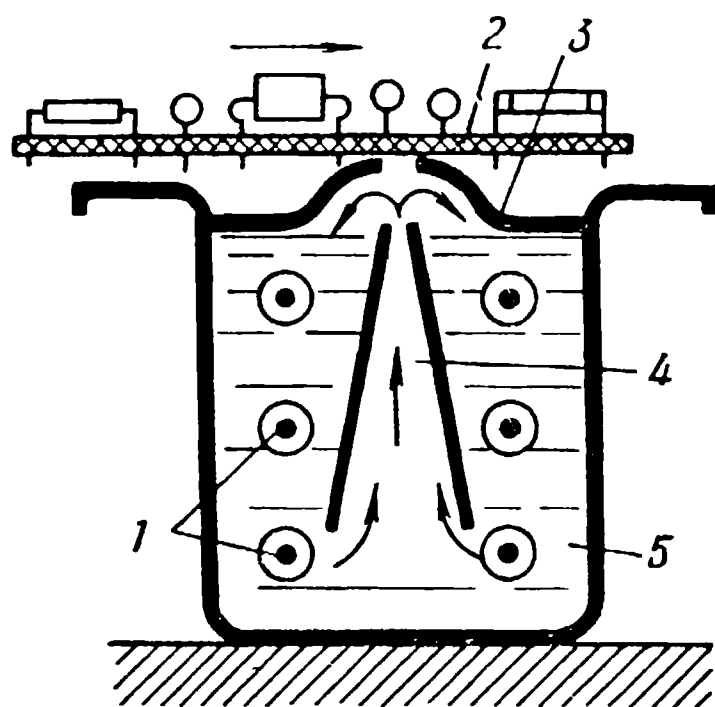


Рис. 12. Схема пайки волной припоя:

1 — электронагревательные элементы; 2 — плата; 3 — волна; 4 — сопло; 5 — припой

При пайке в электролитах тепловой эффект возникает за счет высокого электрического сопротивления водородной оболочки, образующейся вокруг паяемой детали (катода), погруженной в электролит. Пайка в электролитах пока еще применяется мало.

Пайка погружением осуществляется путем нагрева деталей в ваннах с расплавами солей или припоев. При пайке в соляных ваннах нагрев может быть непосредственный и косвенный. В первом случае детали погружают непосредственно в расплавленные соли, выполняющие роль не только источника тепла, но и флюса. Преимущество этого способа — очень высокая скорость нагрева. При пайке в соляных ваннах с косвенным нагревом паяемую деталь, помещенную в контейнер со специальной газовой средой или вакуумом, погружают в соляную ванну. Такой способ пайки обеспечивает несколько меньшую скорость нагрева, но качество поверхности паяных деталей получается более высоким.

При нагреве в расплавленных припоях подготовленную к пайке деталь частично или полностью погружают в ванну с припоем. Этот способ пайки широко применяют при изготовлении автомобильных и авиационных радиаторов, твердосплавного инструмента, а также в радио- и электропромышленности. Пайка в расплавленных припоях подразделяется на пайку погружением в расплавленный припой и на пайку волной припоя (рис. 12). Пайка волной припоя состоит

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

Р а д и а ц и о н н ы й н а г р е в за счет излучения кварцевых ламп, расфокусированного электронного луча или мощного светового потока от квантового генератора (лазера), появившийся лишь в последние годы, позволяет значительно сократить продолжительность пайки и использовать точную электронную аппаратуру для регулирования температуры и времени пайки. При применении лазерного нагрева сосредоточенная в узком пучке тепловая энергия обеспечивает испарение и распыление окисной пленки с поверхности основного металла и припоя, что позволяет получать спаи в атмосфере воздуха без применения искусственных газовых сред. Регулируя тепловложение при лазерной пайке, можно устойчиво получать «бездиффузионный» спай.

При радиационном способе пайки лучистая энергия превращается в тепловую непосредственно в материале припоя и паяемых деталей.

П р и п а й к е г о р е л к а м и местный нагрев паяемых деталей и расплавление припоя осуществляются за счет тепла, выделяющегося в газовых горелках при сгорании углеводородов, в плазменных горелках за счет тепла плазменной струи и тепла электрической дуги косвенного действия. Эти источники нагрева различны по своей природе, но назначение их при пайке одинаковое.

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

Плазменные горелки дают более высокую температуру нагрева и поэтому могут быть перспективными для пайки таких тугоплавких металлов, как вольфрам, тантал, молибден, ниобий. Электрическая дуга находит в пайке ограниченное применение из-за сложности регулирования температуры нагрева паяемых деталей.

В течение многих лет для пайки применяют паяльные лампы, которые по существу являются также газовыми горелками, работающими на жидком топливе. В массовом производстве они не применяются, но их используют для нагрева и пайки в полевых условиях или в ремонтных мастерских.

П а й к у п а я л ь н и к а м и ввиду простоты их устройства и общедоступности очень широко применяют в различных областях техники. При этом способе пайки нагрев основного металла и расплавление припоя осуществляются за счет тепла, аккумулированного в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе пайки подогревается. В том случае, когда тепла, аккумулированного в массе металла паяльника, недостаточно, паяемую деталь предва-

рительно или в процессе пайки подогревают посторонним источником нагрева.

Паяльники делят на четыре группы: с периодическим нагревом, с непрерывным нагревом, ультразвуковые и абразивные. Паяльники с периодическим и непрерывным нагревом чаще применяют для флюсовой пайки черных и цветных металлов при температурах ниже $300\text{—}350^{\circ}\text{C}$.

В ультразвуковых паяльниках колебания ультразвуковой частоты используют для разрушения окисной пленки на поверхности паяемого металла под слоем расплавленного припоя. Паяльники для ультразвуковой пайки могут быть с подогревателем и без подогревателя. Во втором случае для расплавления припоя используют посторонний источник нагрева.

Основное преимущество ультразвуковых паяльников — возможность бесфлюсовой низкотемпературной пайки в атмосфере воздуха. Они нашли применение главным образом для пайки алюминия легкоплавкими припоями.

Абразивные паяльники, как и ультразвуковые, применяют для облуживания алюминия и алюминиевых сплавов без флюса. Окисная пленка в этом случае удаляется в результате трения паяльником по облуживаемой поверхности. Основным достоинством этих паяльников по сравнению с ультразвуковыми является возможность лужения и пайки алюминия и алюминиевых сплавов без применения дорогостоящего оборудования.

Сравнивая рассмотренные способы пайки, следует отметить, что печная, индукционная и пайка погружением являются наиболее высокопроизводительными технологическими процессами. Они могут быть легко механизированы и автоматизированы. Поэтому им следует отдать предпочтение, особенно в массовом и крупносерийном производстве.

В последние годы нашли применение такие способы пайки, как термитная, электронагревательными матами и блоками.

Т е р м и т н а я п а й к а — это способ, при котором нагрев паяемых материалов и расплавление припоя осуществляются теплом, выделяемым при сгорании термитной смеси. Этот способ применяют при соединении стержней, профилей, трубопроводов и т. п.

П а й к а э л е к т р о н а г р е в а т е л ь н ы м и м а т а м и — такой способ пайки, при котором нагрев паяемых материалов и расплавление припоя осуществляются тепловыделяющими элементами, смонтированными в мягких термостойких покрывалах (матах), облегающих паяемое изделие. Электронагревательные маты из огнеупорной керамической ткани, как источник нагрева, применяют при пайке тонкостенных крупногабаритных конструкций; они допускают регулировку нагрева в широком диапазоне температур. Применение их, например, при пайке сотовых панелей позволяет значительно повысить коэффициент полезного действия нагревательной установки по сравнению с нагревом в печи и вдвое сократить цикл пайки.

П а й к а б л о к а м и — это способ, при котором нагрев паяемых материалов и расплавление припоя происходят за счет тепла предва-

рительно нагретых массивных металлических тел (блоков) имеющих внутреннее пространство, обработанное в соответствии с конфигурацией паяемых деталей. Этот способ пайки применяют в тех случаях, когда необходимо провести скоростную пайку при строго дозированном количестве тепла. Все три перечисленные способа пайки имеют пока ограниченное применение.

§ 4. Способы удаления окисной пленки

При всех рассмотренных способах пайки нагрев основного металла и расплавление припоя нужно производить в условиях, способствующих удалению с их поверхности окисной пленки и защите от дальнейшего окисления под действием кислорода воздуха. С этой целью при пайке применяют флюсы, газовые среды, а также физико-механические способы разрушения окисной пленки и самофлюсующие припои. Классификация способов удаления окисной пленки с паяемых металлов и припоя в процессе пайки приведена на рис. 13.

Ф л ю с о в а я п а й к а является наиболее древним, наиболее простым и доступным процессом. Флюсом называют вещество, применяемое в процессе пайки для удаления окисной пленки с поверхности металлов и защиты их от окисления. Паяльные флюсы по составу делят на пять групп: 1) флюсы на основе соединений бора применяют при пайке всех черных и многих цветных металлов; 2) окисные флюсы типа сварочных применяют при высокотемпературной пайке черных металлов. Преимуществом их является высокая коррозионная стойкость паяных соединений; 3) флюсы на основе фторидов применяют при пайке тех металлов и сплавов, для которых боратные флюсы недостаточно активны и вследствие этого не обеспечивают удаления окисной пленки в процессе пайки; 4) флюсы на основе хлоридов более легкоплавки и их применяют главным образом при пайке алюминиевых и магниевых сплавов. Флюсы на основе водных растворов хлористого цинка обладают высокой химической активностью, их применяют для низкотемпературной пайки сталей, никеля и медных сплавов; 5) флюсы на основе канифоли и других органических соединений применяют только для низкотемпературной пайки меди и некоторых сплавов на ее основе.

Флюсы наносят на паяемую деталь и припой в порошкообразном или жидком состоянии, а также в виде паст. Расплавленный флюс при пайке растекается по паяемой поверхности и припою, смачивает их и вступает с ними во взаимодействие, в результате которого удаляется окисная пленка.

Г а з о в ы е с р е д ы, применяемые при пайке, делят на нейтральные, активные и вакуум. Нейтральной средой называется газовая атмосфера, применяемая для защиты паяемого металла и припоя от окисления в процессе пайки. Наиболее типичными представителями нейтральных газовых сред являются инертные газы.

Активной средой называется газовая атмосфера, применяемая для удаления окисной пленки с паяемого металла и припоя и для

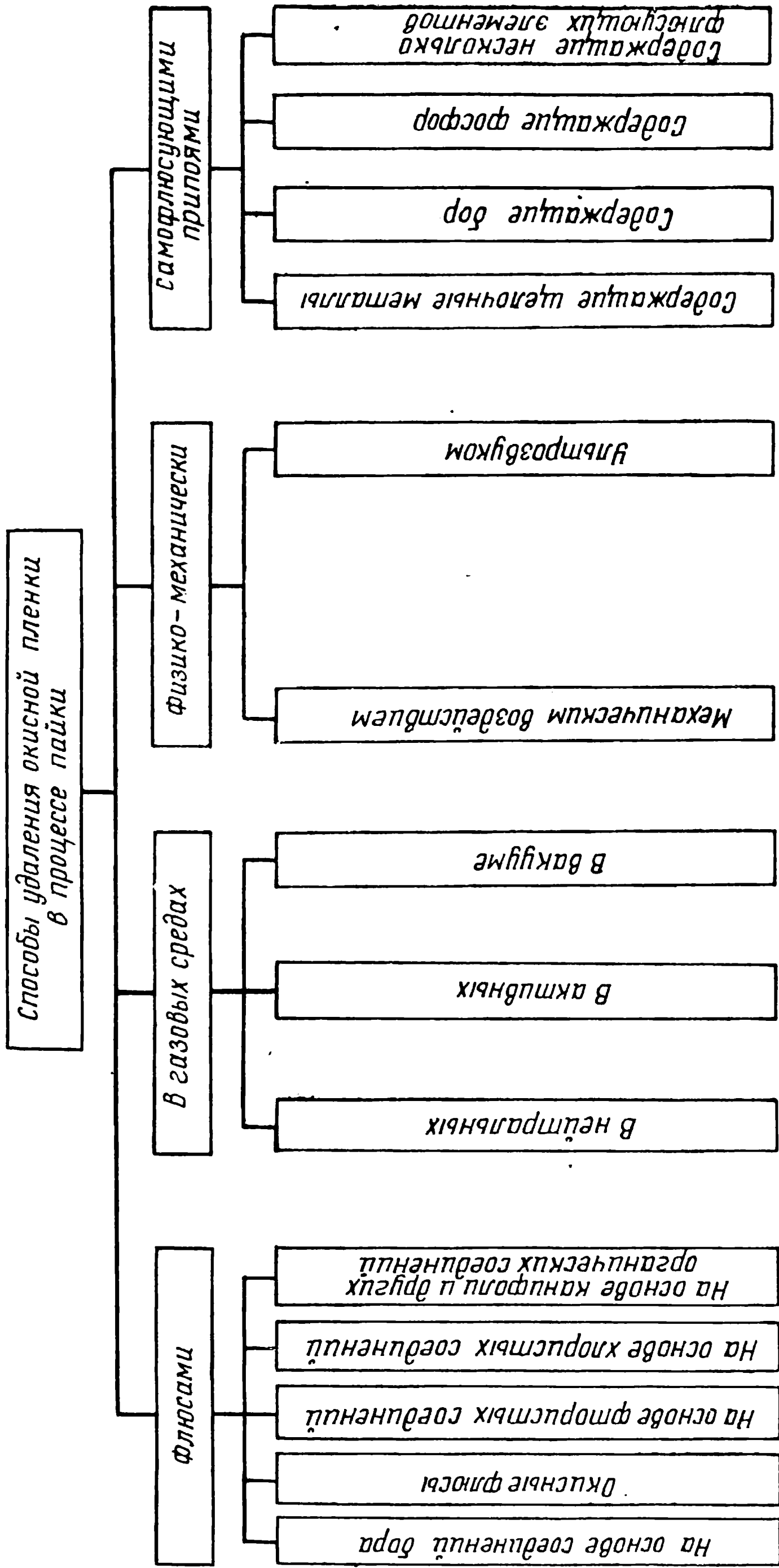


Рис. 13. Классификация способов удаления окисной пленки в процессе пайки

защиты их от окисления в процессе пайки. В качестве активных составляющих таких сред применяют водород и окись углерода. Нейтральные и активные газовые среды, состав которых контролируют и поддерживают постоянным в процессе пайки, называют контролируемыми газовыми атмосферами.

Вакуум применяют при пайке для предупреждения окисления паяемого металла и припоя, а также для удаления с поверхности некоторых металлов окисной пленки. Вакуум создают в пространстве печи или контейнере, в которых производится пайка.

Физико-механические способы удаления окисных пленок в процессе пайки имеют две разновидности. Разрушение окисных пленок может производиться механическим воздействием и ультразвуком под слоем нанесенного на основной металл расплавленного припоя.

Наряду с флюсами и газовыми средами для удаления окисной пленки в процессе пайки применяют самофлюсующие припои. Самофлюсующими называют припои, содержащие компоненты, активно реагирующие с окисной пленкой паяемого металла и припоя и образующие легкоплавкие шлаки, которые, растекаясь по поверхности основного металла и припоя, предохраняют их от окисления.

В самофлюсующих припоях высокой активностью обладают не только сами самофлюсующие компоненты, но и их окислы. По составу и характеру действия в процессе флюсования применяемые в настоящее время самофлюсующие припои можно разделить на четыре группы: припои с щелочными металлами, с бором, с фосфором и с несколькими компонентами. Эти активные компоненты самофлюсующих припоев можно вводить порознь или в сочетании с другими. Литий и другие щелочные металлы вводят обычно в состав серебряных припоев. Фосфор вводят в медные и медносеребряные припои, которые применяются только для пайки меди и ее сплавов, так как со сталью и другими металлами он образует хрупкие соединения. Бор вводят в жаропрочные припои, а вместе с литием — в припои для пайки в сухой газовой атмосфере. Кремний вводят в припои на основе никеля, меди, серебра и золота. Бор, кремний и фосфор вводят в виде лигатуры, литий и другие щелочные металлы подают непосредственно в расплав припоя в конце плавки.

Глава II

ОКИСНЫЕ ПЛЕНКИ И ПРОЦЕССЫ ИХ УДАЛЕНИЯ ПРИ ПАЙКЕ

§ 1. Состав и строение окисных пленок

В атмосферных условиях металлы покрыты окислами. Первично образующаяся на металле окисная пленка может иметь аморфную или кристаллическую структуру. Например, в случае окисления алюминия при комнатной температуре образуется аморфная пленка толщиной 20—45 Å, которая при нагреве становится кристаллической.

Первичная окисная пленка на железе, меди, цинке с самого начала имеет кристаллическое строение. С помощью электронного микроскопа в первичной окисной пленке на железе были обнаружены кристаллы с размерами порядка толщины самой пленки.

Образование аморфных или кристаллических первичных окисных пленок зависит не только от физико-химической природы окисляемого металла, но и от условий ее образования. На одном и том же металле в зависимости от температуры могут образовываться как аморфные, так и кристаллические первичные пленки. Аморфность или кристалличность пленок определяются энергетическими условиями на поверхности и внутри окисных пленок.

Исследования, проведенные на монокристаллах, показали, что в образующейся на металле первичной кристаллической пленке имеются четкие соотношения между ориентацией кристаллов металла и кристаллов пленки. Так, оси кубических решеток в закиси меди Cu_2O и в меди параллельны. Для железа также существуют ориентационные соотношения

между кристаллами металла и окисной пленки. При окислении металлам свойственна тенденция к сохранению в окисных пленках своей собственной атомной структуры. При этом чем тоньше окисная пленка, тем больше сходство в ориентации кристаллов металла и пленки. С увеличением толщины пленки в ее структуре происходят превращения, в результате которых образуются обычные окислы с присущими им параметрами кристаллической решетки и плотностью. Этот процесс часто сопровождается образованием трещин в пленке.

При комнатной температуре в атмосфере воздуха вначале окисление металла идет быстро, но при достижении определенной толщины пленки процесс окисления практически заканчивается. Так, при окислении меди приблизительно через 2 ч толщина пленки достигает $24 \text{ \AA}$ и затем почти не изменяется [15]. После образования первичной пленки дальнейшее окисление определяется скоростью диффузии через нее металла и кислорода. При диффузии металла зоной роста является внешняя поверхность окисной пленки. При диффузии кислорода зоной роста является граница металл—окисная пленка. При соизмеримых скоростях встречной диффузии металла и кислорода зона роста находится внутри окисной пленки. Схема роста окисной пленки в этом случае представлена на рис. 14.

Так как окисные пленки на металлах имеют ионную кристаллическую структуру, обладающую ионной, а также электронной проводимостью, то при диффузии через пленку перемещаются не непосредственно атомы металла, а ионы металла и свободные электроны.

Возможно также образование ионов кислорода на внешней поверхности пленки за счет ионизации проходящими со стороны металла

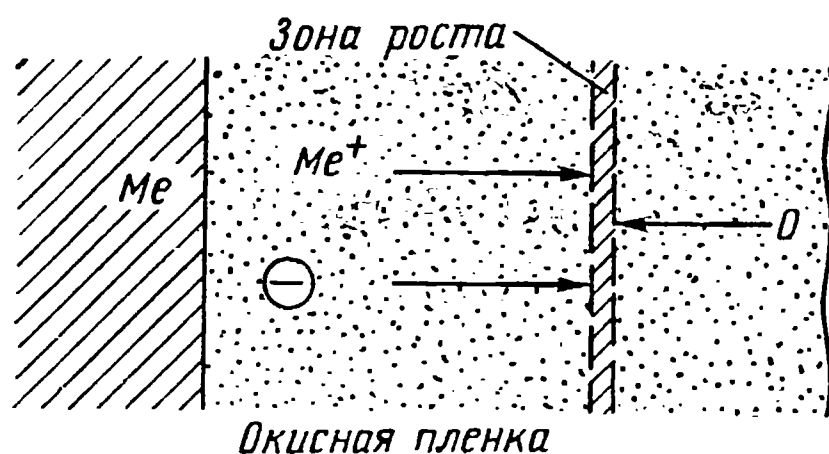


Рис. 14. Схема роста окисной пленки при соизмеримых скоростях встречной диффузии металла и кислорода

электронами. Образующиеся при этом ионы кислорода диффундируют в сторону металла.

В процессе роста окисной пленки не исключена возможность также и атомарной диффузии. Поскольку радиусы ионов металлов значительно меньше радиусов атомов, то можно предполагать, что со стороны металла через окисную пленку в основном движутся ионы и электроны. С внешней же стороны окисной пленки наиболее вероятно движение не ионов кислорода, а атомов, так как радиус аниона кислорода в два с лишним раза больше радиуса его атома [16].

В процессе диффузии ионы металла и кислорода перемещаются путем замещения вакансий, а электроны — путем замещения электронных дырок. При высоких температурах вакансии могут перераспределяться, так как положительный или отрицательный ион, перемещаясь в вакантное место, создает новое положение вакансии. Таким образом, механизм роста окисной пленки на поверхности металла связан с миграцией ионов и вакансий в кристаллической решетке окислов.

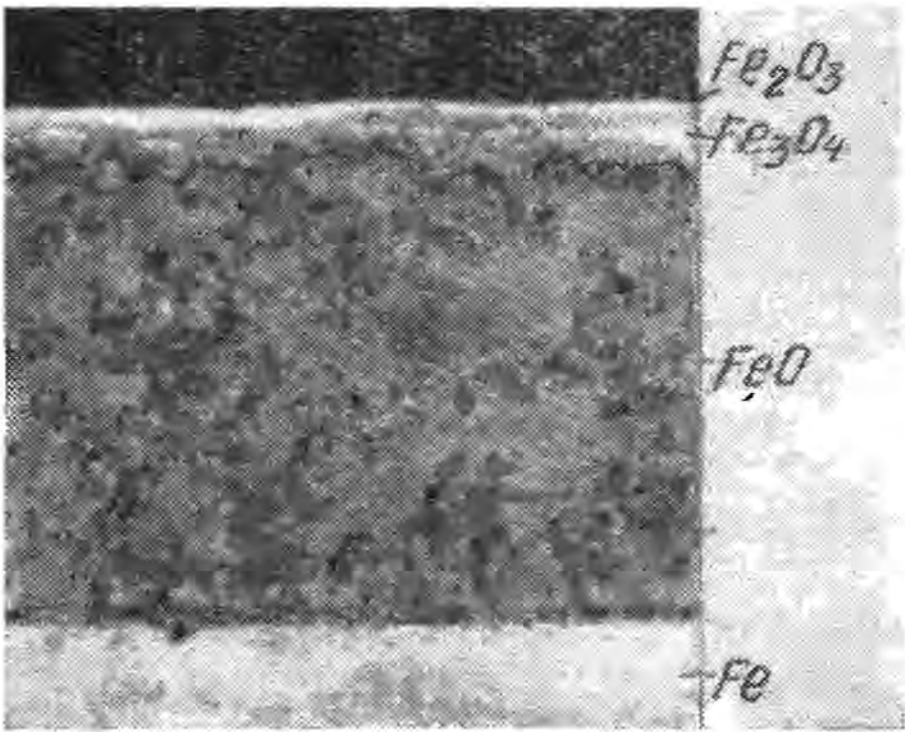


Рис. 15. Микроструктура окисной пленки на железе

при температуре выше 900° С установлено, что кислород диффундирует через окисную пленку к металлу, образуя на границе с ним низшие окислы. В то же время металл диффундирует через пленку, на поверхности которой происходит наслоение высшего окисла. Микроструктура пленки, образовавшаяся после выдержки железа в течение суток в атмосфере воздуха при температуре 625° С, приведена на рис. 15.

В процессе образования окисных пленок закон их роста может быть различным, что в значительной степени зависит от соотношения

Т а б л и ц а 2

Металл	Химический символ	$V_{ок}/V_{Me}$	Металл	Химический символ	$V_{ок}/V_{Me}$
Магний	Mg	0,85	Олово	Sn	1,31
Кальций	Ca	0,69	Вольфрам	W	3,50
Медь	Cu	1,71	Кобальт	Co	1,78
Цинк	Zn	1,57	Никель	Ni	1,64
Кадмий	Cd	1,19	Железо	Fe (FeO)	1,78
Алюминий	Al	1,38	Железо	Fe (Fe ₂ O ₃)	2,10

объема окисла $V_{ок}$ к объему металла V_{Me} , из которого он образовался. Значения отношения $V_{ок}/V_{Me}$ для некоторых металлов приведены в табл. 2.

Если отношение объема окисла к объему металла, из которого образовался окисел, меньше единицы $V_{ок}/V_{Me} < 1$, то образуются не сплошные, а пористые окисные пленки, обладающие слабыми защитными свойствами. Для таких металлов скорость роста окисной пленки определяется линейным законом: $dy/dt = K$ (где y — толщина пленки; t — время окисления; K — константа).

После интегрирования получим $y = Kt + A$ (где A — постоянная

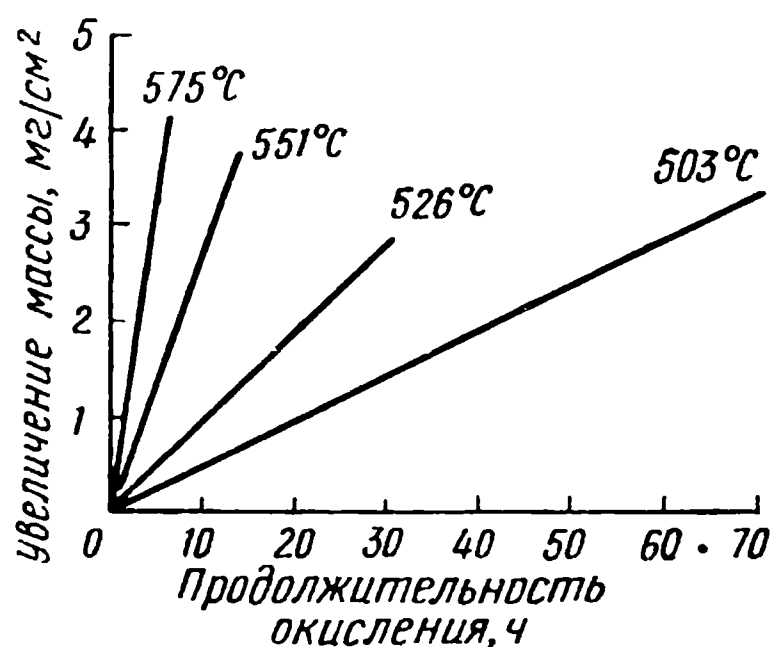


Рис. 16. Линейный закон роста окисной пленки при окислении магния в кислороде при различных температурах

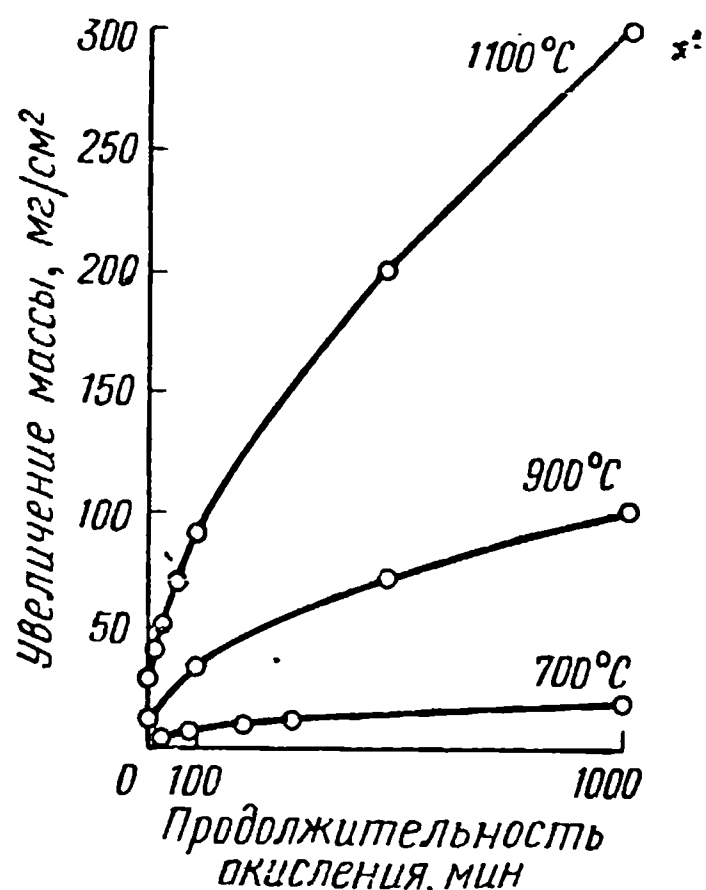


Рис. 17. Параболические кривые роста окисной пленки при окислении железа

интегрирования, характеризующая толщину пленки в начальный момент окисления).

Таким образом, для металлов, не образующих при окислении защитной пленки, скорость роста окисной пленки пропорциональна времени окисления. Линейный характер роста устанавливается через некоторое время после начала окисления, когда пленка достигает некоторой критической величины. Он наблюдается для щелочных и щелочноземельных металлов, а также таких металлов, как ванадий, молибден, вольфрам, образующих окислы, легко испаряющиеся при нагреве. На рис. 16 приведена линейная зависимость, характеризующая закон роста окисной пленки в случае окисления магния при различных температурах.

Металлы, для которых $\frac{V_{ок}}{V_{Me}} > 1$, при окислении образуют сплошной слой окисной пленки. В этом случае с ростом пленки процесс диффузии через нее будет тормозиться, и дальнейший рост пленки постепенно замедляется. Для таких металлов пленка растет по параболическому закону: $y^2 = Kt + A$.

Параболическая зависимость наблюдается при окислении железа, меди, никеля (рис. 17). Как и линейная зависимость, параболический закон роста окисной пленки не соблюдается для начальных стадий окисления, когда пленка еще тонка.

В ряде случаев наиболее правильно рост окисной пленки можно описать зависимостью $y^n = Kt + A$. В частности, n может быть равно трем (кубическая парабола).

Для некоторых металлов наблюдается логарифмическая зависимость роста окисной пленки:

$$y = \ln(Kt).$$

Скорость роста окисной пленки в этом случае определится из соотношения

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K}{e^y},$$

где e — основание натуральных логарифмов.

При окислении на воздухе логарифмическая зависимость роста окисной пленки установлена экспериментально для железа до 375°C ,

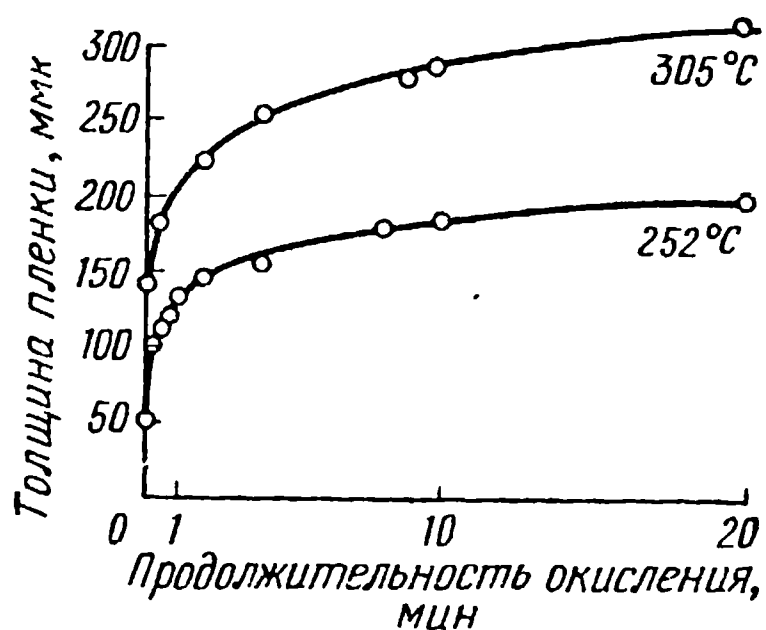


Рис. 18. Логарифмические кривые роста окисной пленки при окислении железа

для меди до 100°C , для никеля до 650°C , для алюминия и цинка от 25 до 225°C . На рис. 18 приведены логарифмические кривые, характеризующие рост окисной пленки при окислении железа на воздухе. Следует отметить, что логарифмическая зависимость роста окисной пленки наиболее характерна в случае окисления металлов при низких температурах.

Скорость роста окисной пленки в процессе окисления зависит от температуры. С повышением температуры скорость увеличивается.

Зависимость скорости роста толщины пленки от температуры можно выразить уравнением

$$\frac{dy}{dt} = Ae^{-\frac{Q}{RT}},$$

где Q — энергия активации процесса;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Следует иметь в виду, что рассмотренные закономерности роста окисной пленки соблюдаются лишь для чистых металлов. Наличие даже следов примесей может сильно изменить свойства поверхности металла и характер реакций его с кислородом [17].

Образующиеся на металлах в результате окисления пленки делятся на тонкие, средние и толстые. Тонкими принято считать невидимые пленки от мономолекулярных до $400\text{ \AA}$, средними $400\text{—}5000\text{ \AA}$ и толстыми — выше $5000\text{ \AA}$ ($0,5\text{ мкм}$). Толщины пленок, образующихся на металлах в зависимости от условий окисления, приведены в табл. 3.

В процессе пайки металлов большое значение имеют не только толщины, но и свойства окисных пленок. Плотные, прочно связан-

Окисляющийся металл	Условия окисления	Толщина пленки Å
Железо (0,04% С)	Выдержка несколько дней в сухом воздухе при комнатной температуре	15—25
Нержавеющая сталь Х18Н9Т	Выдержка на воздухе	10—20
Алюминий	Выдержка при комнатной температуре в сухом воздухе в течение нескольких дней	100
	Нагрев при 600° С в течение 60 ч в атмосфере воздуха	2000

ные с металлом окисные пленки труднее удалить с поверхности металла, что осложняет процесс пайки. Чем менее компактна окисная пленка, чем слабее ее связь с металлом, чем менее устойчива она при нагреве, тем меньше затруднений возникает в процессе удаления ее при пайке.

П р и о к и с л е н и и ж е л е з а кислородом возможно образование соединений в соответствии с диаграммой состояния железо—кислород. Окисная пленка на железе обычно имеет четко выраженный слоистый характер: на границе с металлом образуется закись железа FeO , соответствующая наименьшему содержанию кислорода в окисле, затем следует промежуточный слой закиси-оксида железа Fe_3O_4 и на внешней поверхности пленки — высший окисел Fe_2O_3 . Предполагается, что поверхностный слой металла, находящийся под окисной пленкой, содержит некоторое количество кислорода в виде твердого раствора с металлом, а на границах между слоями окислов имеются промежуточные прослойки, состоящие из смесей или твердых растворов окислов, образующих пленку. Прилегающий к металлу слой закиси железа FeO (кристаллографическое название — вюстит) имеет кубическую решетку по типу каменной соли. Элементарная кристаллическая ячейка вюстита содержит четыре иона железа Fe^{2+} и четыре иона кислорода O^{2-} . Закись железа FeO устойчива только при температурах выше 570° С. При более низких температурах она не образуется, а при медленном охлаждении распадается с выделением металла: $4\text{FeO} \rightarrow \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4$. При температуре 1377° С закись железа плавится.

Закись-окись железа Fe_3O_4 (кристаллографическое название — магнетит) имеет кубическую решетку. В состав элементарной ячейки магнетита входят восемь ионов двухвалентного железа (Fe^{2+}), 16 ионов трехвалентного железа (Fe^{3+}) и 32 иона кислорода (O^{2-}). Магнетит кристаллографически является самостоятельной фазой, а не молекулярной смесью закиси и окиси железа, как это иногда

считают. Он устойчив при всех температурах, начиная от комнатной и до точки плавления железа. При нагреве в окислительной среде магнетит переходит в окись железа $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Этот переход совершается в две стадии. При нагреве до температуры 220°C образуется промежуточная структура окисла $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с сохранением имеющейся кубической шпинельной решетки. Двухвалентное железо при этом превращается в трехвалентное: $2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow 3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

При дальнейшем нагреве до $400\text{—}500^\circ\text{C}$ окисел теряет магнитные свойства и образуется решетка окиси железа $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Окись железа Fe_2O_3 (гематит) имеет ромбоэдрическую структуру. В состав элементарной кристаллической ячейки Fe_2O_3 (гематита), построенной по типу корунда, входят четыре иона железа (Fe^{3+}) и шесть ионов кислорода (O^{2-}). Гематит устойчив в широком интервале температур, но при нагреве выше 1100°C частично разлагается, так как давление диссоциации его близко к парциальному давлению кислорода в атмосфере воздуха. При температуре плавления железа гематит полностью диссоциирует на железо и кислород.

При окислении меди образуются три вида окислов — закись меди Cu_2O , окись меди CuO и полуторная окись меди Cu_2O_3 . Имеются также предположения об образовании в интервале $950\text{—}1050^\circ\text{C}$ соединения типа недоокиси Cu_4O . Окисление меди начинается с адсорбции газа на ее поверхности. Адсорбированные частицы в результате силового поля атомов решетки металла ориентируются определенным образом, при этом связи, соединяющие молекулу кислорода, разрушаются и возникают новые связи с кристаллической решеткой металла.

На основе электронографических исследований установлено, что при комнатной температуре на воздухе происходит образование закиси меди, кристаллизующейся в кубической решетке типа куприта. Кристаллическая решетка закиси меди ориентирована так, что ребра и грани кубической решетки Cu_2O лежат параллельно ребрам и граням кубической решетки меди. Решетка закиси меди образована из взаимнопроникающих решеток гранецентрированного куба (медь) и пространственно-центрированного куба, образованного атомами кислорода. В кристаллах Cu_2O каждый атом кислорода окружен тетраэдрически четырьмя атомами металла. Каждый атом металла находится между двумя атомами кислорода.

Нагрев меди выше 250°C вызывает более интенсивное окисление меди, при этом пленка состоит из смеси закиси и окиси меди. Рост пленки происходит по диффузионному механизму; наиболее вероятно, что при повышенных температурах через пленку диффундируют частицы меди в ионном состоянии, имеющие значительно меньшие размеры. При 300°C и выдержке $5\text{—}10$ мин в атмосфере воздуха медь покрывается цветами побежалости.

Наряду с закисью меди при окислении также образуется полуторная окись меди, которая, как и закись, имеет красный цвет. Кристаллическая решетка ее соответствует решетке закиси меди и отличается от последней несколько иной удельной проводимостью.

Полуторная окись меди неустойчива, она начинает разлагаться при 75°C . При 400°C разложение происходит по уравнению $\text{Cu}_2\text{O}_3 = 2\text{CuO} + 1/2\text{O}_2$.

В интервале $400\text{—}500^{\circ}\text{C}$ и выдержке 5—15 мин окисная пленка на меди двухслойная. К металлу примыкает закись меди, верхний слой пленки, более тонкий, состоит из окиси меди, имеющей почти черный цвет. При $600\text{—}700^{\circ}\text{C}$ слой меди лишь местами покрыт окисью, однако, если при этой температуре увеличить время выдержки, на поверхности образуется сплошной слой окиси. Образованию окиси меди способствует деформация кристаллической решетки металла и загрязнение поверхности металла старым слоем окисла. Окисная пленка в интервале $600\text{—}800^{\circ}\text{C}$ имеет мелкокристаллическую структуру, обладает плохой термической прочностью и плохой связью с металлом. Выше 800°C образовавшаяся окись меди разлагается по уравнению $4\text{CuO} = 2\text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_2$.

В интервале $800\text{—}950^{\circ}\text{C}$ пленка состоит только из закиси меди. Этот интервал характерен несколько более прочной связью пленки с основным металлом. При $950\text{—}1050^{\circ}\text{C}$ окисная пленка приобретает ярко-малиновый цвет, что связано, по-видимому, с образованием твердого раствора меди в закиси меди или соединения Cu_4O . Окисная пленка в этом интервале имеет крупнокристаллическую структуру и наиболее прочно держится на металле. Зависимость толщины пленки от температуры и времени выдержки при окислении меди показана на рис. 19.

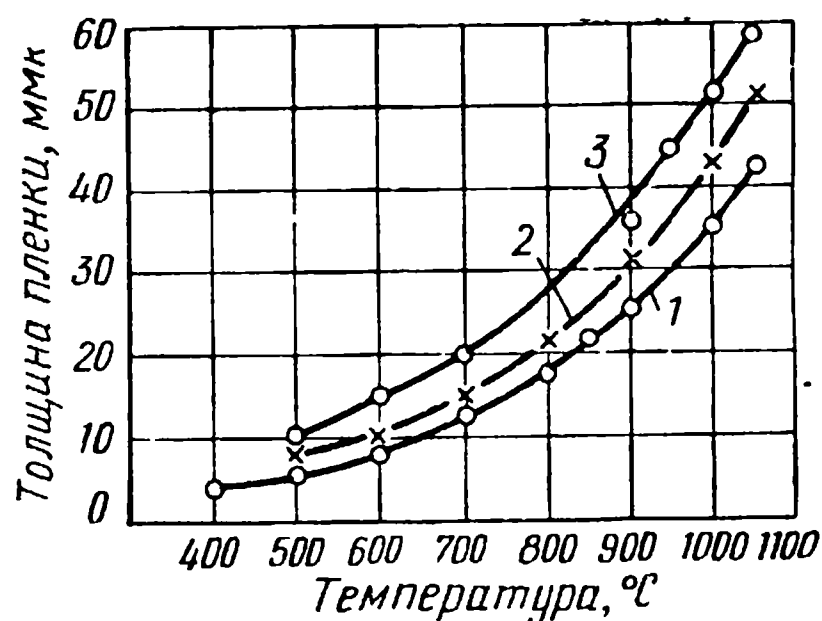


Рис. 19. Зависимость толщины окисной пленки от температуры и времени выдержки:

1 — 5 мин; 2 — 10 мин; 3 — 15 мин

Т и т а н при высоких температурах в атмосфере воздуха окисляется с образованием окисной пленки сложного состава. Поверхностный слой пленки состоит из высшего окисла — двуокиси титана TiO_2 , имеющей температуру плавления 1860°C . Ниже слоя двуокиси расположен слой Ti_2O_3 , а под ним — слой переменного состава. На поверхности металла, как показали рентгенографические исследования, образуется газонасыщенный слой, являющийся твердым раствором кислорода в α -титане. В интервале $800\text{—}1000^{\circ}\text{C}$ внешняя поверхность окисной пленки из белого постепенно становится бледно-желтой. При температуре $1100\text{—}1200^{\circ}\text{C}$ поверхностный слой пленки приобретает оранжево-красный цвет и спекается. На нем появляются темные пятна и характерные блестящие точки. Последние представляют собой хорошо сформировавшиеся кристаллы. Внутренний слой пленки остается белой порошкообразной массой. Зависимость толщины окисной пленки (в мм) от температуры при окислении титана марки ВТ-1 приведена в табл. 4.

При нагреве титана выше температуры аллотропического превращения в насыщенном кислороде слое обнаружены два слоя — примыкающий к окисной пленке небольшой по протяженности слой с повышенным содержанием кислорода (более высокая твердость), соответствующий диффузии в α -Ti, и широкий слой с пониженным содержанием кислорода, соответствующей диффузии в β -Ti.

Окисная пленка на титане в интервале 800—1000° С растет по параболическому закону, при температуре 900° С и длительной выдержке — по линейному, в интервале 1100—1200° С — по кубическому закону, причем чем выше температура, тем раньше начи-

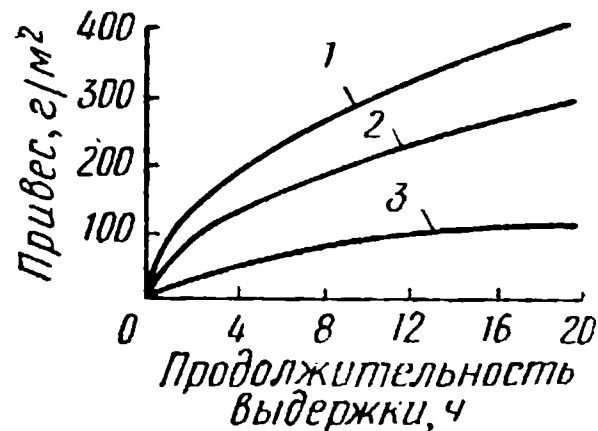


Рис. 20. Зависимость количества поглощаемого титаном кислорода от времени выдержки:

1 — общий привес; 2 — привес за счет образования окисной пленки; 3 — привес за счет растворения кислорода в титане

Т а б л и ц а 4

Температура. °С	Выдержка ч		
	0,5	1	2
900	0,012	0,02	0,03
1000	0,035	0,06	0,10
1100	0,060	0,10	0,15
1200	0,140	0,25	0,32

нается этот переход. Окисная пленка, образующаяся при окислении титана в парах воды при температурах 800—1200° С, состоит только из фазы TiO₂ в модификации рутила;

фаз Ti₂O₃ и TiO не обнаруживается. При этом образующаяся окисная пленка отличается монолитностью по сравнению со слоистой и пористой пленкой, образующейся на воздухе.

При окислении титана одновременно протекают два процесса: образование окисной пленки на поверхности металла и растворение этой пленки в металле. До температуры 300—350° С с заметной скоростью протекает только первый процесс, который описывается логарифмическим законом. Выше 450° С определяющую роль играет процесс растворения. Зависимость количества поглощенного титаном кислорода от выдержки при температуре испытания приведена на рис. 20. По мере повышения температуры скорость растворения окисной пленки в титане, как можно видеть на кривых, возрастает, что может быть использовано для ее удаления в процессе пайки [18].

Н и к е л ь способен давать несколько окислов, однако при окислении на его поверхности образуется только закись никеля NiO, кристаллизующаяся в кубической решетке типа каменной соли.

Электронографические и рентгенографические исследования окисных пленок на никеле показали, что других возможных для никеля окислов, таких как Ni₃O₄, Ni₂O₃, при его окислении не образуется. При легировании никеля хромом в небольших количествах плотность пленки снижается. При содержании хрома порядка 6% и выше плотность пленки на поверхности металла и ее защитные свойства возрастают.

Вводимые в никель легирующие компоненты по-разному влияют на стойкость образующегося сплава к окислению. Влияние добавок легирующих элементов на скорость образования окисной пленки на никеле в атмосфере воздуха показано на рис. 21. Как показывают кривые, многие элементы в малых количествах понижают стойкость никеля против окисления.

При окислении хрома образуются окислы состава Cr_2O_3 и CrO_3 . Окись хрома Cr_2O_3 имеет две модификации: $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$,

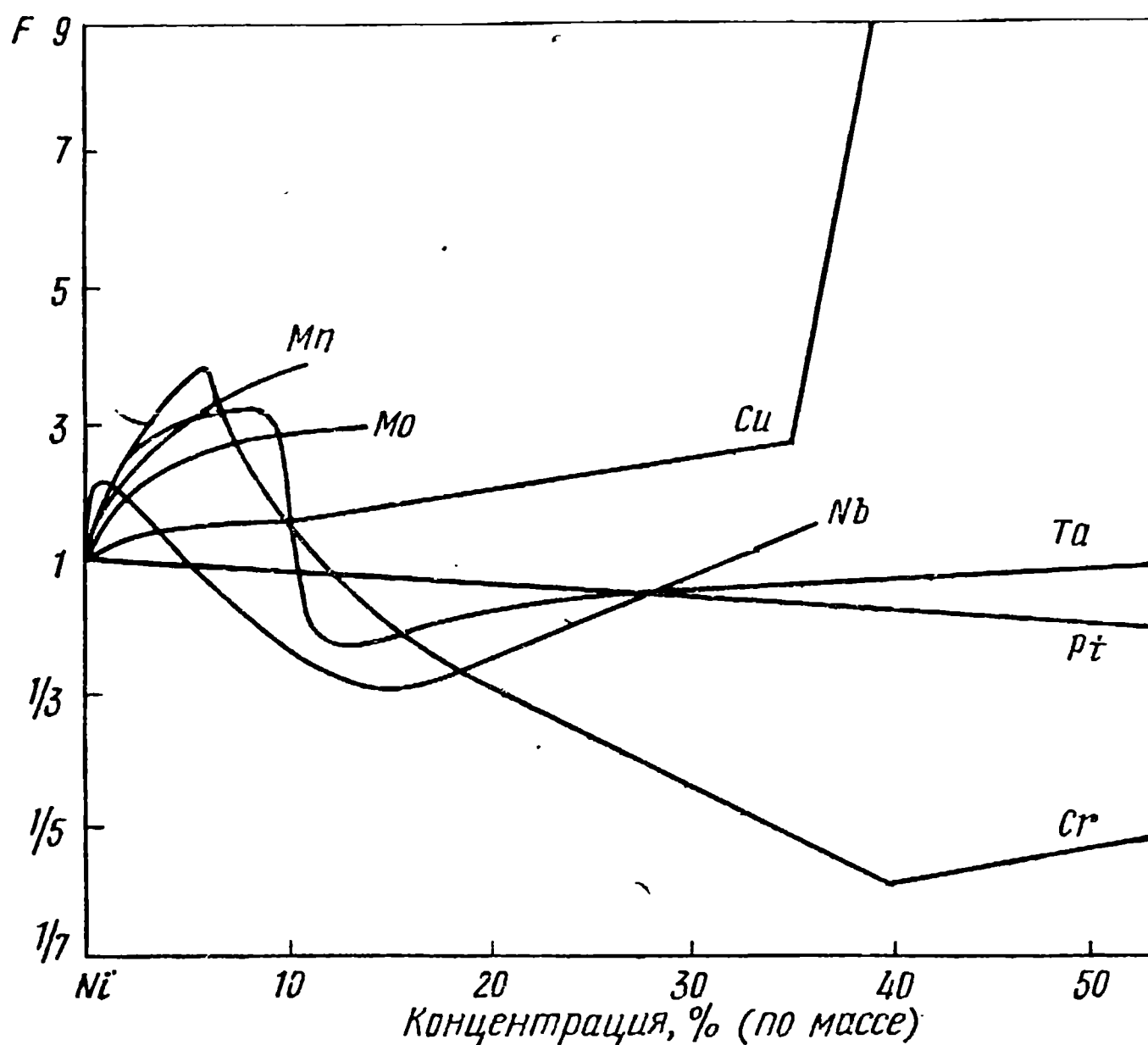


Рис. 21. Влияние добавок легирующих элементов на скорость роста окисной пленки при окислении никеля (F — отношение привеса при окислении сплава к привесу при окислении никеля)

кристаллизующуюся в ромбоэдрической решетке, и $\gamma\text{-Cr}_2\text{O}_3$ в кубической решетке. В окисной пленке на поверхности хрома при окислении на воздухе и в кислороде обычно обнаруживается только окись хрома Cr_2O_3 ромбоэдрической модификации. При окислении на воздухе при температуре $600\text{--}800^\circ\text{C}$ вначале процесс окисления идет быстро, но после образования защитной пленки взаимодействие хрома с кислородом воздуха замедляется. По мере роста пленки уменьшаются ее защитные свойства и ослабевает связь с основным металлом. В термодинамическом отношении окись хрома очень устойчива. Она не диссоциирует даже в вакууме 10^{-6} мм рт. ст. при температуре 1000°C .

Кобальт при окислении в интервале $300\text{--}900^\circ\text{C}$ образует двойной слой окисной пленки: наружный из Co_3O_4 и внутренний из CoO . При нагреве до более высоких температур кобальт окис-

ляется с образованием пленки, состоящей также из двух слоев окислов. Оба эти слоя состоят в основном из закиси кобальта CoO .

Опытами установлено, что внутренний слой получается передвижением кислорода в сторону металла, а наружный слой — передвижением кобальта наружу. Окисел Co_3O_4 приблизительно при температуре 850°C разлагается.

Н и о б и й при нагреве до 330°C окисной пленки не образует. Скорость окисления в этом интервале определяется растворением кислорода в металле. При температурах выше 400°C ниобий окисляется с образованием низкотемпературной модификации окисла $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$, под которым последовательно залегают фазы Nb_2O , NbO и насыщенный кислородом слой металла. Поскольку скорость диффузии кислорода в низших окислах велика, то слои фаз Nb_2O и NbO получаются весьма тонкими, и окисная пленка в основном состоит из слоя $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$. При температурах $830\text{—}900^\circ\text{C}$ происходит медленное превращение низкотемпературной модификации $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$ в высокотемпературную $\beta\text{-Nb}_2\text{O}_5$. При температурах выше 500°C за счет значительной разницы в удельных объемах металла и окисла $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$ происходит растрескивание пленки. При температурах выше 900°C окисление ниобия идет с насыщением металла кислородом и образованием окисной пленки, состоящей из фазы $\beta\text{-Nb}_2\text{O}_5$ и тонких пленок низших окислов.

М о л и б д е н сохраняет металлический блеск при нагреве на воздухе до температуры 200°C . При 300°C он тускнеет. При температуре 600°C на поверхности молибдена образуется прочно сцепленный с металлом слой окисной пленки, которая обычно состоит из трех слоев: наружный слой — трехокись MoO_3 , внутренний переходной слой состоит из окислов MoO_3 и MoO_2 и к металлу прилегает слой двуокиси молибдена MoO_2 . При температуре около 600°C трехокись молибдена начинает улетучиваться. При температуре 770°C скорость образования трехокиси сравнивается со скоростью ее улетучивания. Трехокись молибдена плавится при температуре 795°C , а температура плавления эвтектики $\text{MoO}_2\text{—MoO}_3$ составляет 778°C . Введение в молибден 30% Ni или 20% Co приводит к образованию окисной пленки состава NiMoO_4 или CoMoO_4 , которые имеют защитные свойства до 940°C .

В о л ь ф р а м при нагреве на воздухе до температуры 300°C сохраняет металлический блеск. Дальнейший нагрев приводит к возникновению цветов побежалости. При 600°C на вольфраме образуется иссиня-черная окисная пленка. Нагрев до более высоких температур приводит к образованию желтого или желто-зеленого слоя трехокиси вольфрама WO_3 , слабо связанной с основным металлом. В интервале $700\text{—}1000^\circ\text{C}$ под слоем трехокиси вольфрама образуется тонкая черно-голубая пленка окисла, состав которой не установлен. Предполагается, что она образуется в результате диффузии кислорода в металл. При 850°C трехокись вольфрама начинает улетучиваться.

А л ю м и н и й при взаимодействии с кислородом при комнатной температуре окисляется с образованием первичной пленки толщиной

40—100 мкм. Дальнейшее окисление алюминия тормозится, так как образовавшаяся пленка надежно изолирует металл от кислорода. Для окиси алюминия известны модификации: α , β , γ и др. Модификация α - Al_2O_3 (корунд) имеет ромбоэдрическую решетку, β - Al_2O_3 — гексагональную решетку, γ - Al_2O_3 — кубическую гранецентрированную решетку. Наряду с этим для алюминия известны окислы состава Al_2O — недоокись алюминия и AlO — субокись алюминия, существующие при высоких температурах. Первоначально образующийся на поверхности алюминия в атмосферных условиях окисный слой представляет собой аморфное образование. Умеренное нагревание этого слоя до температур выше 200°C приводит к возникновению модификации γ - Al_2O_3 . В результате взаимодействия с влагой воздуха в окисной пленке на поверхности алюминия могут образовываться гидроокиси.

Магний при взаимодействии с сухим воздухом или кислородом быстро окисляется с образованием рыхлой пленки, состоящей из окиси магния MgO , имеющей кристаллическую структуру. На первых стадиях окисления толщина окисной пленки может достигать 70 Å. Первоначальная пленка при температурах ниже 450°C обладает защитными свойствами, несмотря на то, что удельный объем окиси магния меньше, чем металла. Можно предположить, что в этом случае образующаяся сплошная окисная пленка удерживается на металле в результате растягивающих напряжений. Электронографически показано, что очень тонкие пленки обладают гексагональной структурой, аналогичной структуре магния, и только с увеличением ее толщины она начинает приобретать структуру типа NaCl .

В сплавах магния образование окисной пленки происходит наиболее интенсивно при наличии никеля и меди. Цинк, олово, алюминий, галлий также увеличивают скорость окисления, но в значительно меньшей степени. Свинец, индий, серебро, кадмий и таллий незначительно влияют на скорость окисления магния.

Содержание окислов легирующих компонентов в окисных пленках, образующихся на магниевых сплавах, обычно несколько меньше, чем содержание легирующих компонентов в сплаве. Это связано с тем, что теплота образования окиси магния выше, чем окислов легирующих компонентов, за исключением бериллия. Последний легче окисляется, чем магний, и способствует образованию окисной пленки с более высокими защитными свойствами. При температуре выше 450°C образующаяся пленка утолщается и под действием растягивающих напряжений разрывается, что приводит к окислению металла и дальнейшему росту окисной пленки.

При взаимодействии магния с влажным воздухом образуется гидроокись магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Скорость окисления во влажном воздухе приблизительно в два раза ниже, чем в сухом воздухе, так как удельный объем гидроокиси в 1,74 раза больше, чем магния. Образующаяся во влажном воздухе окисная пленка обладает более высокими защитными свойствами.

Применяемые в качестве припоев металлы и сплавы также имеют на своей поверхности окисную пленку. Нагрев под пайку при недо-

статочной защите может вызвать дальнейшее окисление припоя. Наличие на поверхности припоя в процессе пайки окисной пленки, особенно при слабой активности применяемых для ее удаления средств, приводит к ухудшению условий пайки и свойств паяного соединения. Поэтому для получения качественных паяных соединений необходимы очистка припоя перед пайкой и надежные условия удаления ее в процессе пайки.

В зависимости от состава припоя имеют различную окисляемость. Наибольшей стойкостью при высоких температурах отличаются припоя на никелевой основе, легированные хромом, железом, палладием, кобальтом, медью, кремнием, бором, алюминием. В качестве жаропрочных припоев, работающих при температурах до 600°C , применяют также сплавы на медной основе с большим содержанием никеля.

При легировании основы паемого металла или припоя легирующие элементы по-разному могут влиять на процесс образования окисной пленки. Общие законы образования пленок в этом случае установить трудно, так как компоненты сплавов имеют различное сродство к кислороду, разную скорость диффузии в металле и пленке, разную взаимную растворимость окислов; не известно также влияние растворимости на устойчивость дефектов кристаллической решетки и т. д. Введенный металл может распределяться в окисной фазе, в которой некоторые катионы основного металла замещаются легирующей добавкой. В этом случае скорость окисления может или увеличиваться, или уменьшаться, но закон роста пленки сохраняется. В том случае, когда при введении легирующей добавки в основании пленки образуется новая фаза, возможны более глубокие изменения в процессе окисления, приводящие к изменению закона роста пленки. Если легирующие элементы обладают меньшим сродством к кислороду по сравнению с основным металлом, то они обычно остаются под окисной пленкой в неокисленном состоянии.

Процесс образования окисных пленок на двух- и многокомпонентных сплавах протекает в соответствии с диаграммой состояний взаимодействующих окислов. При этом могут образовываться сложные твердые растворы или эвтектические смеси окислов. Например, в окисных пленках на сплавах никеля с хромом внутри металлической фазы обнаруживаются гранулы окиси хрома Cr_2O_3 , тонкораспределенные в металле. Затем располагается слой с двухфазной структурой — кубическая шпинель NiCr_2O_4 , диспергированная в основном окисле NiO . Внешний слой окисной пленки состоит из чистой окиси никеля NiO . То же происходит и с алюминиевыми сплавами, содержащими магний. С увеличением содержания магния пленка меняется от смеси $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (0,01—0,05 Mg) до чистой окиси магния (выше 1,5% Mg). При содержании в алюминиевом сплаве 0,05—1,5% Mg окисная пленка состоит из смеси MgO и $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

На основе анализа состава и строения окисных пленок можно видеть, что даже при самых благоприятных условиях окисления чистых металлов и сплавов в атмосфере воздуха образующиеся пленки

имеют толщину более 20 Å. Силы взаимодействия атомов металлов между собой практически исчезают на расстояниях до 10 Å, поэтому обеспечить взаимодействие паяемого металла и расплавленного припоя при наличии на их поверхности окисных пленок невозможно. Для этого их необходимо тщательно очистить от окисных пленок и загрязнений. С этой целью перед пайкой производят механическую зачистку или травление поверхности металлов в растворах щелочей или кислот. Однако за время между очисткой и пайкой на поверхности металлов вновь образуется тонкая окисная пленка. Поэтому непосредственно в процессе пайки необходимо удалять окисную пленку не только с паяемого металла, но и с расплавленного припоя, что достигается применением при пайке флюсов, искусственных газовых сред, вакуума, а также физико-механическими способами разрушения окисной пленки.

§ 2. Флюсы и их роль

Процесс взаимодействия твердого паяемого металла с расплавленным припоем может протекать активно только после удаления с их поверхности окисной пленки, которая препятствует образованию между ними металлической связи. Часто окисную пленку удаляют с помощью флюсов.

Одновременно со способностью удалять окисную пленку и защищать основной металл и припой от окисления необходимо, чтобы флюс удовлетворял следующим требованиям: при температуре пайки имел достаточную жидкотекучесть, способствовал формированию шва, не изменял свой состав, в течение всего процесса сохранял флюсующие свойства, легко удалялся после пайки. Остатки флюса не должны оказывать коррозионного воздействия на паяемый металл.

Нанесенный на соединяемые поверхности паяемых металлов и припой флюс при нагревании плавится, растекается, смачивает их и при некоторой температуре, называемой минимальной температурой действия флюса, вступает в химические взаимодействия, в результате чего удаляется окисная пленка. Минимальной температурой действия флюса называется наименьшая температура, при которой флюс вступает в активные химические взаимодействия с окисной пленкой или непосредственно с металлом, обеспечивая смачивание паяемой поверхности припоем. С повышением температуры интенсивность этого взаимодействия усиливается. Верхним пределом температурного интервала действия флюса является температура, при которой существенно снижается его активность в результате испарения отдельных компонентов и начинается окисление основного металла и припоя под слоем флюса. Интервал между минимальной и максимальной температурами действия флюса называется температурным интервалом действия флюса.

Композиция флюсов. В зависимости от физико-химических свойств паяемых металлов и припоя применяют следующие

компоненты флюса: соли, кислоты, окислы, а также вещества органического происхождения. Флюсы могут быть однородными веществами, например тетраборнокислый натрий (обезвоженная бура) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ или хлористый цинк ZnCl_2 , и сложными, состоящими из двух и более компонентов.

Флюсы сложного состава содержат вещества, являющиеся его основой, которые растворяют остальные компоненты флюса и продукты флюсования, а при растекании образуют плотную пленку, защищающую металл от взаимодействия с воздухом. Такой флюс содержит также вещества, способные интенсивно растворять окислы, находящиеся на поверхности основного металла и припоя, и химически активные компоненты, взаимодействующие с окислами металлов или непосредственно с металлами.

Т а б л и ц а 5

Вещество	Плотность г/см ³	Температура, °С	
		плавления	кипения
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	2,37	741	1575
KCl	1,99	768—770	1406
LiCl	2,07	613	1380
NaCl	2,16	800	1467
BaCl_2	3,86	960	1560
CaCl_2	2,15	772	>1600
MgCl_2	2,33	708	1412

В существующих флюсах сложного состава, применяемых для высокотемпературной пайки, основой чаще всего являются устойчивые при нагреве соли или системы солей, например $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; KCl—NaCl; NaCl— BaCl_2 ; KCl—LiCl и др. Свойства некоторых солей, применяемых в качестве основы флюсов сложного состава, приведены в табл. 5.

В боратных флюсах наиболее распространенной основой являются сплавы системы B_2O_3 — Na_2O (B_2O_3)₂, диаграмма состояний которой приведена на рис. 22. Наибольший интерес в этой системе представляют сплавы, содержащие 15—20% борного ангидрида и имеющие сравнительно низкую температуру плавления.

Если флюсы предназначены для пайки при более высоких температурах, то в качестве основы следует брать более тугоплавкие сплавы рассматриваемой системы, содержащие 65—70% борного ангидрида.

Из приведенных в табл. 5 хлоридов наиболее легкоплавкую эвтектику образуют между собой хлористый литий и хлористый калий (рис. 23). Сравнительно низкая температура плавления эвтектики LiCl—KCl обеспечивает хорошую жидкотекучесть и высокие капиллярные свойства флюсов при довольно низких температурах пайки. Эта система солей устойчива также при повышенных температурах, что позволяет производить пайку при длительных выдержках.

Способностью растворять окислы металлов обладают фториды щелочных и щелочноземельных металлов, которые благодаря этому широко применяют в составе флюсов (табл. 6).

Растворяющая способность приведенных фторидов по отношению к окислам различных металлов изменяется в довольно широких пределах, поэтому их выбирают в зависимости от состава и свойств

окисной пленки на основном металле и припое, а также от температуры пайки. Например, окисная пленка на нержавеющей и жаропрочных сталях и сплавах, содержащих наряду с железом такие металлы, как хром и никель, при высокотемпературной пайке хорошо растворяется во фтористом кальции. Окисные пленки на алюми-

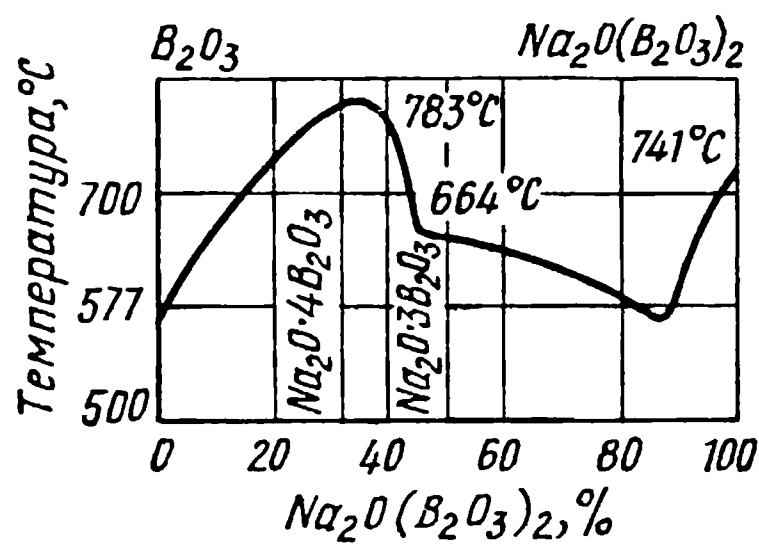


Рис. 22. Диаграмма состояния системы $B_2O_3-Na_2O(B_2O_3)_2$

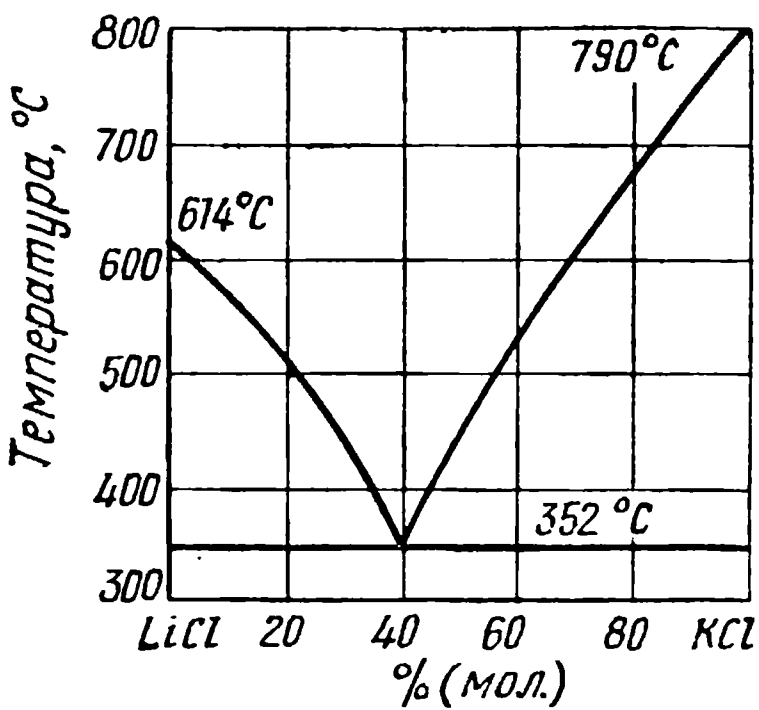


Рис. 23. Диаграмма состояния системы $LiCl-KCl$

ниевых и магниевых сплавах растворяются во фтористом натрии, калии и литии. Эти фториды и вводятся в состав флюсов для пайки указанных металлов. Количество вводимых во флюс фторидов определяют экспериментально.

Как видно на рис. 24, площадь растекания припоя быстро воз-

Т а б л и ц а 6

Вещество	Плотность г/см ³	Температура °C	
		плав- ления	кипе- ния
KF	2,48	857	1505
NaF	2,79	995	1700
LiF	2,30	842	1676
BaF ₂	4,83	1280	2267
CaF ₂	3,18	1403	2500
MgF ₂	3,00	1263	2239

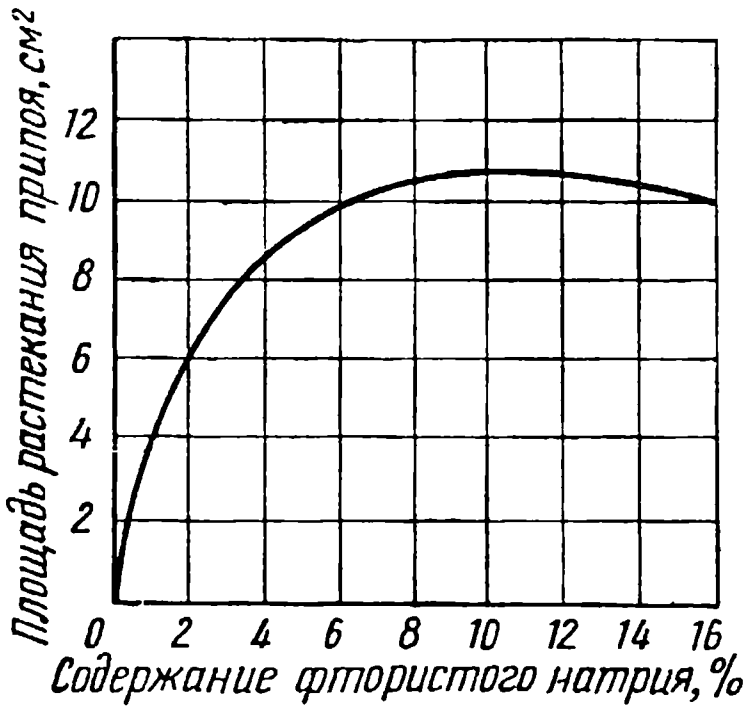


Рис. 24. Зависимость площади растекания припоя марки 34А по алюминию от содержания во флюсе фтористого натрия

растает при содержании фтористого натрия во флюсе до 8%; при дальнейшем увеличении содержания фтористого натрия площадь растекания изменяется мало. Это связано с повышением температуры плавления и снижением жидкотекучести флюса.

Однако растворение окислов во флюсе в зависимости от содержания в нем фторидов — сравнительно длительный процесс, не приводящий к полному удалению окисной пленки. Поэтому во флюсы вводят специальные активные вещества, которые при температуре пайки вступают в химические реакции с окисной пленкой или основ-

ным металлом. В качестве таких веществ применяют соли тяжелых металлов (ZnCl_2 , CdCl_2 , SnCl_2 и др.) и окислы, например B_2O_3 , взаимодействующие с окисной пленкой с образованием легкоплавких комплексов, переводящих ее в шлак. Количество активных компонентов, вводимых во флюс, определяют экспериментально. На рис. 25 показана зависимость площади растекания припоя 34А на алюминии от содержания хлористого цинка во флюсе. Кривая показывает, что площадь растекания припоя до содержания хлористого цинка во флюсе 6—8% возрастает интенсивно, дальнейшее увеличение его содержания уже мало влияет на растекание припоя.

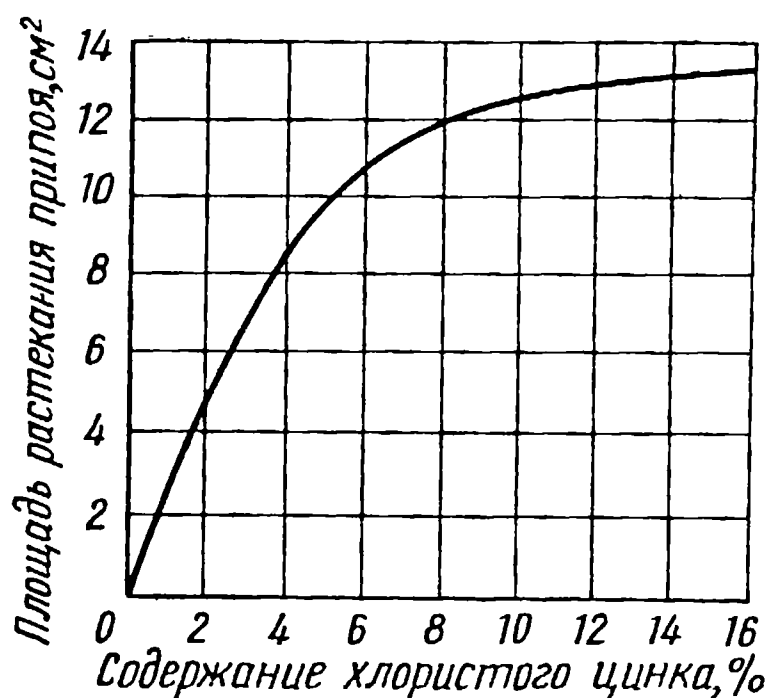


Рис. 25. Зависимость площади растекания припоя марки 34А по алюминию от содержания во флюсе хлористого цинка

Таким образом, в общем случае флюсы состоят из основы, растворителя окисной пленки и активного или основного флюсующего вещества. В ряде случаев отдельные компоненты флюсов выполняют несколько функций или, наоборот, по компонентному составу флюса иногда трудно судить о роли отдельных его составляющих. При высокотемпературной пайке сталей, например, применяют окисные флюсы типа стекла в порошкообразном виде.

В состав стекол входят окислы: SiO_2 , Na_2O , B_2O_3 , CaO , Al_2O_3 и др. В стекла, специально выплавляемые для применения в качестве флюсов, вводят фториды. По составу такие флюсы напоминают сварочные. В расплаве они образуют шлак, являющийся основой флюса; в качестве растворителя окисной пленки используют фториды; роль активного флюсующего вещества выполняют отдельные окислы, имеющие наибольшее химическое сродство к окисной пленке на основном металле и припое.

Флюсы, применяемые при пайке, имеют особую специфику, отличающую их от флюсов, применяемых при плавке и сварке. Особенности эти состоят в том, что паяльный флюс последовательно «работает» на твердой поверхности основного металла одного состава, а затем на жидкой поверхности расплавленного припоя другого состава. Таким образом, паяльный флюс должен обладать флюсующими свойствами как по отношению к основному металлу, так и припою, имеющих различный химический состав и свойства. Это может достигаться или подбором флюсующих веществ, активных к окисной пленке основного металла и припоя, или введением нескольких флюсующих веществ, например в окисных флюсах типа стекла.

Флюс должен взаимодействовать с окисной пленкой на поверхности основного металла и припоя и в жидком состоянии смачивать их. При этом флюс заполняет имеющиеся микропоры и микротрещины в пленке, что обеспечивает хороший контакт с окислами и развитие реакций во всем объеме пленки.

Поскольку на подготовленных к пайке поверхностях деталей толщина окисной пленки обычно составляет несколько микрон, то развитие реакций происходит в узком слое, на границе расплава флюса с основным металлом. Если учесть, что при капиллярной пайке флюс заполняет зазоры в 0,1—0,2 мм, то можно себе представить, в каких ничтожно малых объемах протекает реакция флюсования. В этих условиях исключительно большое значение имеет равномерность нагрева соединяемых поверхностей деталей до необходимой температуры, чистота соединяемых поверхностей, а также высокое качество флюса. При недогреве отдельных мест отсутствует взаимодействие между основным металлом и флюсом и, следовательно, на этих участках сохраняется окисная пленка, что вызывает непропай.

Для обеспечения качественной пайки в расплавленном флюсе не должны содержаться твердые частицы, а также они не должны образовываться в процессе флюсования, так как будут препятствовать затеканию флюса в зазор и вытеснению его из зазора припоем. В процессе перехода окисной пленки в расплав флюса последний должен сохранять свою жидкотекучесть и легко вытесняться расплавленным припоем. Поэтому адгезия расплавленного флюса к основному металлу должна быть меньше, чем расплавленного припоя, что достигается соответствующей композицией флюса. Хорошее вытеснение боридных флюсов расплавленными припоями при пайке сталей связано, например, с влиянием борного ангидрида, который сильно снижает адгезию солевых расплавов при смачивании поверхности железа.

После смачивания основного металла флюсом и удаления с него окисной пленки образуется активная межфазная граница твердый металл — жидкий флюс, которая затем замещается расплавленным припоем в условиях, практически исключающих возможность взаимодействия с атмосферой воздуха, что обеспечивает высокое качество спая.

К л а с с и ф и к а ц и я и с о с т а в ы ф л ю с о в. Применяемые в настоящее время флюсы по составу можно разделить на следующие группы: 1) флюсы на основе соединений бора; 2) флюсы на основе фтористых соединений металлов; 3) флюсы на основе хлористых соединений металлов; 4) окисные флюсы; 5) флюсы на основе канифоли и других органических соединений.

К первой группе относятся флюсы, состоящие из тетраборнокислого натрия, борной кислоты, борного ангидрида, а также флюсы более сложного состава на основе этих веществ.

Тетраборнокислый натрий получают путем обезвоживания гидрата тетраборнокислого натрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (буры). По внешнему виду это бесцветные прозрачные кристаллы. При нагреве до 80° С происходит удаление 80% кристаллизационной воды. Полное обезвоживание наступает при температуре 350—400° С. Тетраборнокислый натрий плавится при температуре около 740° С, однако до 800° С он остается очень вязким, поэтому пайка с применением его в качестве флюса может производиться только при температурах выше 800° С.

Борная кислота H_3BO_3 представляет собой белое кристаллическое вещество, довольно легко растворимое в горячей воде. При нагреве выше $70^\circ C$ борная кислота разлагается. Во флюсы борную кислоту, как правило, вводят вместе с тетраборнокислым натрием.

Борный ангидрид получается путем обезвоживания борной кислоты. При нагреве борная кислота теряет воду, превращаясь последовательно в метаборную HBO_2 и тетраборную $H_2B_4O_7$ кислоты, а также в борный ангидрид B_2O_3 . По своим флюсующим свойствам борная кислота несколько уступает тетраборнокислому натрию.

Тетраборнокислый натрий, борную кислоту и их смеси применяют в качестве флюсов при пайке углеродистых сталей, чугуна, меди, бронз, латуней медноцинковыми и серебряными припоями с температурой плавления выше $800^\circ C$.

Если компоненты флюсов предварительно обезводить, паяные соединения получаются более высокого качества, что объясняется уменьшением вредного влияния на металлы образующихся в процессе флюсования паров воды. Для пайки нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов эти флюсы оказались непригодными, так как не удаляют с их поверхности химически устойчивые окисные пленки, содержащие в своем составе окислы хрома, титана и других активных элементов. Поэтому при пайке легированных сталей и жаропрочных сплавов применяют боратные флюсы сложного состава, в которые вводят в качестве растворителей окисной пленки фториды металлов. Наиболее распространенные флюсы сложного состава на основе боратов приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Флюс	Компоненты флюса	Содержание % (по массе)	Температура пайки, $^\circ C$
№ 200	Борная кислота Тетраборнокислый натрий Фтористый кальций	68—72 19—21 8—10	850—1150
№ 201	Борная кислота Тетраборнокислый натрий Фтористый кальций Лигатура ¹	79—81 13—15 5—6 0,4—0,6	850—1150

¹ Состав лигатуры: 48% Al, 48% Cu; 4% Mg.

Более высокими флюсующими свойствами обладает флюс № 201 благодаря наличию в нем лигатуры. Действие ее основано на том, что при высоких температурах пайки алюминий и магний, содержащиеся в ней, восстанавливают окислы на поверхности основного металла и припоя. Влияние лигатуры на растекание латуни Л62 по нержавеющей стали Х18Н9Т при введении ее в различном количестве во флюс № 201 показано на рис. 26. Образцы, представленные

на рис. 26, а, характеризуют растекание припоя при применении флюса № 201 без лигатуры. Растекание навески припоя на образцах рис. 26, б—е происходило под флюсом № 201, содержащем соответственно 0,5; 1,0; 1,5; 2 и 2,5% лигатуры.

При сравнении площадей растекания припоя видно, что наилучшими флюсующими свойствами обладает флюс, содержащий 1,5—2% лигатуры. Однако оптимальные свойства паяных соединений в сочетании с технологичностью процесса пайки обеспечиваются при содержании лигатуры в количестве 0,4—0,6%.



Рис. 26. Влияние лигатуры Al—Cu—Mg во флюсе № 201 на растекание латуни Л62 по стали X18H9T

При наличии на поверхности основного металла и припоя устойчивых, трудно удаляемых окисных пленок применяют флюсы на основе фторидов. Если во флюсах № 200 и № 201 фтористый кальций, имеющий температуру плавления 1403°C , находится в растворенном состоянии и при избыточном введении выпадает в осадок, то во флюсах на основе фторидов они образуют относительно легкоплавкую систему, поэтому при температуре пайки находятся в расплавленном состоянии (табл. 8).

Т а б л и ц а 8

Флюс	Компоненты флюса	Содержание % (по массе)	Температура пайки, $^{\circ}\text{C}$
№ 209	Фтористый калий (обезвоженный) Фторборат калия Борный ангидрид	40—44 21—25 33—37	600—850
№ 284	Фтористый калий (обезвоженный) Фторборат калия Борный ангидрид	33—37 40—44 23—25	500—850
№ 18В	Фтористый калий (обезвоженный) Борная кислота	40 60	650—850

Наиболее легкоплавким и весьма активным является флюс № 284, который обеспечивает высокие механические свойства паяных соединений. Следующим по активности является флюс № 209, который из-за меньшей стоимости получил большее распространение. Флюс № 18В сравнительно тугоплавок и менее активен, однако он более устойчив при температурах пайки, а также технологичен при его нанесении перед пайкой и удалении после пайки.

Рассмотренные выше флюсы на основе соединений бора и фтористых соединений пригодны для пайки конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей, а также никелевых и медных сплавов серебряными припоями. Однако они совершенно не подходят для пайки алюминиевых и магниевых сплавов. Для этой цели применяют флюсы третьей группы. Основой этих флюсов, как правило, является легкоплавкая эвтектика LiCl—KCl или минерал карналлит. Растворителем окислов обычно является фтористый натрий. В качестве активного компонента чаще всего применяют хлористый цинк. Составы некоторых флюсов для пайки алюминия, магния и сплавов на их основе приведены в табл. 9 [19, 20].

Т а б л и ц а 9

Флюс	Компоненты флюса	Содержание, % (по массе)	Температура пайки, °С	Назначение флюса
34А	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый цинк	54—56 29—35 9—11 8—12	420—620	Для пайки алюминия и его сплавов
Ф320А	Хлористый калий Хлористый литий Фтористый натрий Хлористый цинк	28 42 6 24	420—620	Для пайки алюминия и его сплавов
№ 5	Карналлит плавленный Криолит Окись цинка	89 8 3	425—620	Для пайки магниевых сплавов

Оптимальное содержание хлористого цинка во флюсах для пайки алюминиевых сплавов составляет около 10% (см. рис. 25). Увеличение его содержания до 20% и выше позволяет заметно снизить температуру плавления флюса. Однако температуру активного действия флюса таким путем снизить не удастся. Увеличение содержания хлористого цинка во флюсах для пайки алюминиевых сплавов приводит к снижению коррозионной стойкости паяных соединений из-за повышения содержания цинка в паяном шве, а также к заметному растворению поверхности алюминия (эрозии).

С флюсами 34А и Ф320А можно паять также и магниевые сплавы, однако из-за большого количества хлористого цинка эти флюсы

(особенно Ф320А) вызывают сильную эрозию поверхности магния. Флюс № 5 не имеет этого недостатка.

Для низкотемпературной пайки черных и цветных металлов в качестве флюсов широко применяют водные растворы хлористого цинка. Эти флюсы обладают высокой химической активностью, их применяют в тех случаях, когда имеется возможность полного удаления после пайки остатков флюса. При их применении процесс флюсования протекает интенсивно, припой легко растекается по поверхности металла, образуя достаточно прочное соединение. Однако эти флюсы снижают коррозионную стойкость швов. Тем не менее флюсы в виде водных растворов хлористого цинка широко используют в связи с низкой стоимостью и удобством применения. Активность этих флюсов зависит от концентрации хлористого цинка.

Из приведенных на рис. 27 кривых можно видеть, что увеличивать концентрацию хлористого цинка выше 300 г/л не имеет смысла. Поэтому в существующих флюсах на основе водных растворов хлористого цинка содержание последнего составляет обычно 200—300 г/л. Присутствие в этих флюсах одновременно хлористого цинка и свободной соляной кислоты нежелательно, так как кислота интенсивно растворяет основной металл и ускоряет коррозию. Однако в отдельных случаях, например при низкотемпературной пайке нержавеющей стали, соляную кислоту вводят специально, чтобы повысить химическую активность флюса.

Хлористый цинк часто применяют в смеси с хлористым аммонием NH_4Cl , который усиливает его действие. Смесь этих веществ делает флюсы активными даже при сравнительно низких температурах пайки. Составы и области применения типичных флюсов на основе водных растворов хлористого цинка приведены в табл. 10.

При пайке с применением этих флюсов необходимо тщательно удалять остатки флюсов, особенно содержащих соляную кислоту, так как они вызывают сильную коррозию основного металла в зоне паяного соединения.

Окисные флюсы типа стекла в порошкообразном виде — весьма перспективны для высокотемпературной пайки сталей. Основным достоинством их наряду с высокими флюсующими свойствами является малая гигроскопичность, способность сохранять стабильность при хранении, отсутствие коррозионного воздействия остатков флюса.

Флюсы пятой группы на основе канифоли и других органических соединений применяют при низкотемпературной пайке металлов

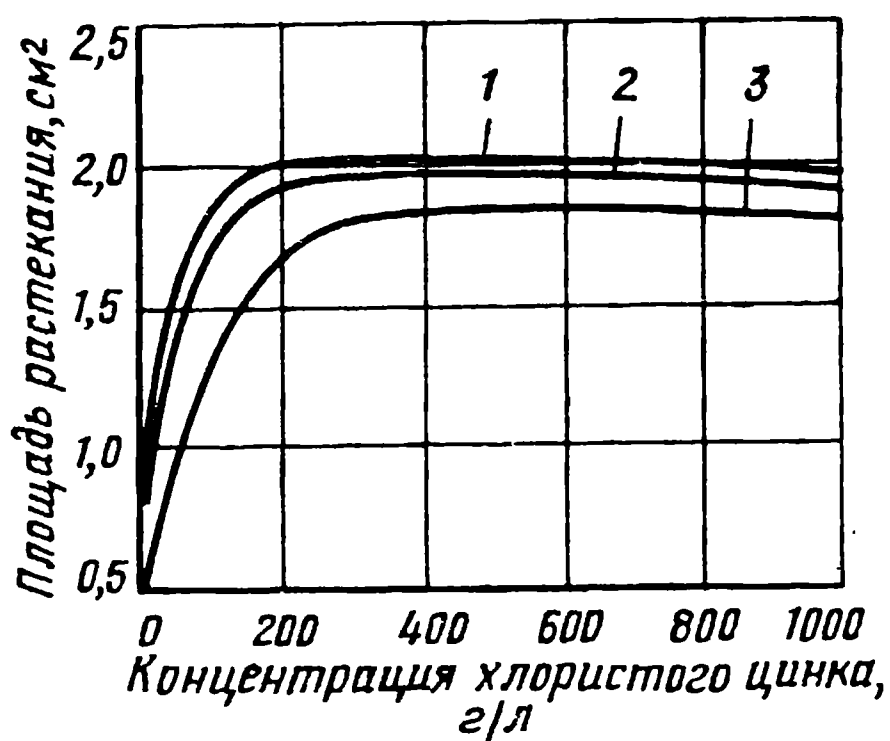


Рис. 27. Изменение площади растекания припоев по стали 08кп в зависимости от содержания в флюсе хлористого цинка:
1 — ПОССу4-6; 2 — олово; 3 — свинец

Компоненты флюса	Содержание % (по массе)	Температура пайки, °С	Назначение флюса
Хлористый цинк Вода	25 75	290—350	Для пайки сталей, меди и ее сплавов
Хлористый цинк Аммоний Вода	18 6 76	180—320	То же
Хлористый цинк Соляная кислота Вода	25 25 50	180—320	Для пайки нержавеющей сталей

в тех случаях, когда не представляется возможным тщательно промыть изделие после пайки. Остатки этих флюсов не вызывают коррозии, но они менее активны в процессе пайки. Иногда в качестве флюса применяют кусковую канифоль, однако гораздо удобнее применять ее растворы в спирте. Составы канифольных флюсов, применяемых для пайки монтажных соединений из меди в электро- и радиоаппаратуре, приведены в табл. 11.

Т а б л и ц а 11

Наименование флюса	Компоненты флюса	Содержание, % (по массе)	Температура пайки, °С
Канифоль	Канифоль	100	150—300
Флюс КЭ	Канифоль Спирт этиловый	25 75	150—300

Для пайки металлов и сплавов, окислы которых плохо удаляются канифолью или ее растворами, применяют канифольные флюсы с добавками активизаторов. Такими активизирующими добавками являются анилин $C_6H_5NH_2$, триэтаноламин $N(CH_2CH_2OH)_3$, солянокислый диэтиламин $(C_2H_5)_2NHNCl$, салициловая кислота $HO-C_6H_4-CO_2H$ и другие вещества, которые не оказывают существенного коррозионного воздействия на паяемые металлы. Для повышения активности в канифольные флюсы иногда вводят также в небольших количествах (до 3%) хлористый цинк и хлористый аммоний. При большем содержании этих коррозионноактивных компонентов остатки флюса могут вызвать коррозию. Составы и области применения некоторых активизированных канифольных флюсов приведены в табл. 12.

Наименование флюса	Компоненты флюса	Содержание, % (по массе)	Температура, °С	Назначение флюса
ЛК-2	Канифоль Хлористый цинк Хлористый аммоний Спирт этиловый	28 3 1 68	280—300	Для пайки меди, ее сплавов, оцинкованного железа и никеля
ЛТИ-120	Канифоль Триэтаноламин Диэтиламин солянокислый Спирт этиловый	20—25 1—2 3—5 68—76	230—330	То же
КС	Канифоль Салициловая кислота Триэтаноламин Спирт этиловый	30 2,8 1,4 65,8	150—300	Для пайки монтажных соединений из меди и ее сплавов

Рассмотренные флюсы на основе канифоли применяются для меди, медных сплавов, никеля и оцинкованного железа. Для низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов эти флюсы непригодны. Для этих целей применяют флюсы, содержащие в качестве активных компонентов борфториды кадмия и цинка. Основой таких флюсов служат обычно высококипящие органические соединения, например триэтаноламин. Состав такого флюса известен под маркой Ф61А: 10% борфторида кадмия, 8% борфторида цинка и 82% триэтанолamina [21].

Механизм флюсования. Ввиду разнообразия составов применяемых при пайке флюсов химизм их действия в процессе флюсования весьма различен. Теория флюсования применительно к пайке почти не разработана. Отдельные гипотезы, базирующиеся на ограниченном экспериментальном материале, лишь приближенно отражают действительную картину протекающих при флюсовании процессов. Согласно существующим представлениям, механизмы взаимодействия активных компонентов флюсов в процессе пайки сводят к следующим:

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

2. Химическое взаимодействие между активным флюсующим веществом и металлом, в результате чего происходит разрушение и постепенный отрыв окисной пленки от основного металла и переход ее в шлак.

3. Адсорбционное понижение прочности окисной пленки под действием расплава припоя и диспергирование (измельчение) ее на частицы коллоидных размеров.

4. Растворение окисной пленки основного металла и припоя во флюсе.

В условиях флюсовой пайки все эти механизмы действия флюса могут проявляться одновременно. На процессы флюсования определяющее влияние оказывает состав основного металла и припоя, что нельзя не учитывать, особенно при содержании в них таких активных компонентов, как хром, алюминий, бор, бериллий. При длительном взаимодействии, например при печной пайке, металлы могут частично растворяться во флюсах, особенно в тех случаях, когда в составе флюса имеются соли основного металла.

Если процесс флюсования при пайке рассматривать схематично, то он протекает в следующей технологической последовательности. При нагреве основного металла происходит постепенное разрушение имеющейся на его поверхности окисной пленки в результате удаления кристаллизационной воды и разложения нестойких соединений. Окисная пленка при этом несколько разрыхляется. После расплавления флюса происходит смачивание им окисленной поверхности основного металла, создаются условия для взаимодействия активных компонентов флюсов с поверхностью основного металла и припоя. Наиболее легко смачивают поверхность окисленного металла органические жидкости, что объясняется их низким поверхностным натяжением. Соли, входящие в состав флюсов, имеют в расплавленном состоянии также сравнительно низкое поверхностное натяжение, что способствует хорошей смачиваемости ими поверхности основного металла и припоя. Смачивание зависит также от величины поверхностного натяжения флюса на границе твердое тело — флюс. Значения поверхностного натяжения для солей, входящих во флюсы, приведены в табл. 13.

Т а б л и ц а 13

Соль	Температура эксперимента, °C	Поверхностное натяжение, эрг/см ²	Соль	Температура эксперимента °C	Поверхностное натяжение, эрг/см ²
Na ₂ B ₄ O ₇	1000	211,9	SnCl ₂	307	97
KCl	780	97	CsF	692	107
NaCl	801	114	LiF	840	255
LiCl	603	140	KF	846	98,4
CdCl ₂	602	77,2	NaF	1010	199,5
BaCl ₂	962	171			

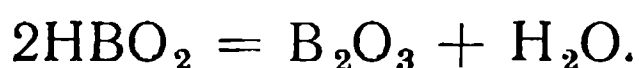
С повышением температуры пайки поверхностное натяжение расплавленных солей снижается, что улучшает условия смачивания. В зависимости от степени окисления основного металла и припоя смачиваемость их флюсом различна. Для железа с увеличением степени окисления смачиваемость его окисным флюсом улучшается.

Наименьший краевой угол смачивания имеется при наличии на поверхности железа гематита Fe_2O_3 , наибольший краевой угол — при смачивании неокисленного железа.

После растекания и смачивания флюсом основного металла происходит диспергирование окисной пленки. Одновременно ввиду неодинаковой растворяющей способности флюса по отношению к окислам различных металлов происходит избирательное растворение ее. Она постепенно разрушается флюсом, становится более пористой с сильно развитой поверхностью. Однако растворение окислов во флюсе протекает медленно и не приводит к нарушению связи между металлом и окисной пленкой. Для этого необходим более активный процесс, вызывающий или перестройку в структуре окисной пленки, находящейся в контакте с расплавленным флюсом, в результате чего нарушается ее связь с основным металлом, или отрыв окисной пленки в результате распространения реакции под слой окисной пленки. В первом случае, когда активное флюсующее вещество взаимодействует с окисной пленкой, процесс флюсования протекает одновременно по всей поверхности основного металла и припоя. Флюсование по этому способу характерно, например, для флюсов, содержащих бораты. Так, тетраборнокислый натрий при флюсовании разлагается с выделением борного ангидрида:



Борная кислота также разлагается с выделением борного ангидрида:



Образующийся при разложении тетраборнокислого натрия и борной кислоты борный ангидрид является активным компонентом флюсов. При флюсовании он воздействует на окисную пленку основного металла и припоя, главным образом химически связывая окислы в комплексы по реакции $\text{MeO} + \text{B}_2\text{O}_3 = \text{MeO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$.

Так, например, при пайке сталей, меди и латуней образуются следующие легкоплавкие бораты: $2\text{FeO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{CuO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, $\text{CuO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ и др.

Бораты более сложного состава, такие как фторборат калия KBF_4 , разлагаются при пайке по реакции $\text{KBF}_4 = \text{KF} + \text{BF}_3$.

Выделяющийся при этом фтористый калий растворяет окислы окисной пленки, а трехфтористый бор вступает с ними в активные химические взаимодействия. Так, например, в случае пайки нержавеющей сталей трехфтористый бор взаимодействует с окисью хрома по реакции $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{BF}_3 = 2\text{CrF}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$.

Борный ангидрид, образующийся в результате этой реакции, может вступать в дальнейшее взаимодействие с окислами, образуя бораты.

Если в процессе флюсования протекает реакция между активным флюсующим веществом флюса и паяемым металлом, то окисная пленка удаляется в основном в результате ее механического разру-

шения продуктами флюсования. Флюс проникает через микропоры и микротрещины в пленке и реагирует с основным металлом. В результате этой реакции частицы окисной пленки отрываются и переходят в шлак. Этому процессу сопутствует частичное растворение паяемой поверхности, поэтому количество активных компонентов, реагирующих непосредственно с основным металлом, должно быть во флюсе строго ограниченным.

В качестве примера взаимодействия активного компонента флюса с основным металлом может служить процесс пайки алюминия с применением флюсов типа 34А, содержащих хлористый цинк. При пайке протекает реакция $2\text{Al} + 3\text{ZnCl}_2 = 2\text{AlCl}_3 + 3\text{Zn}$.

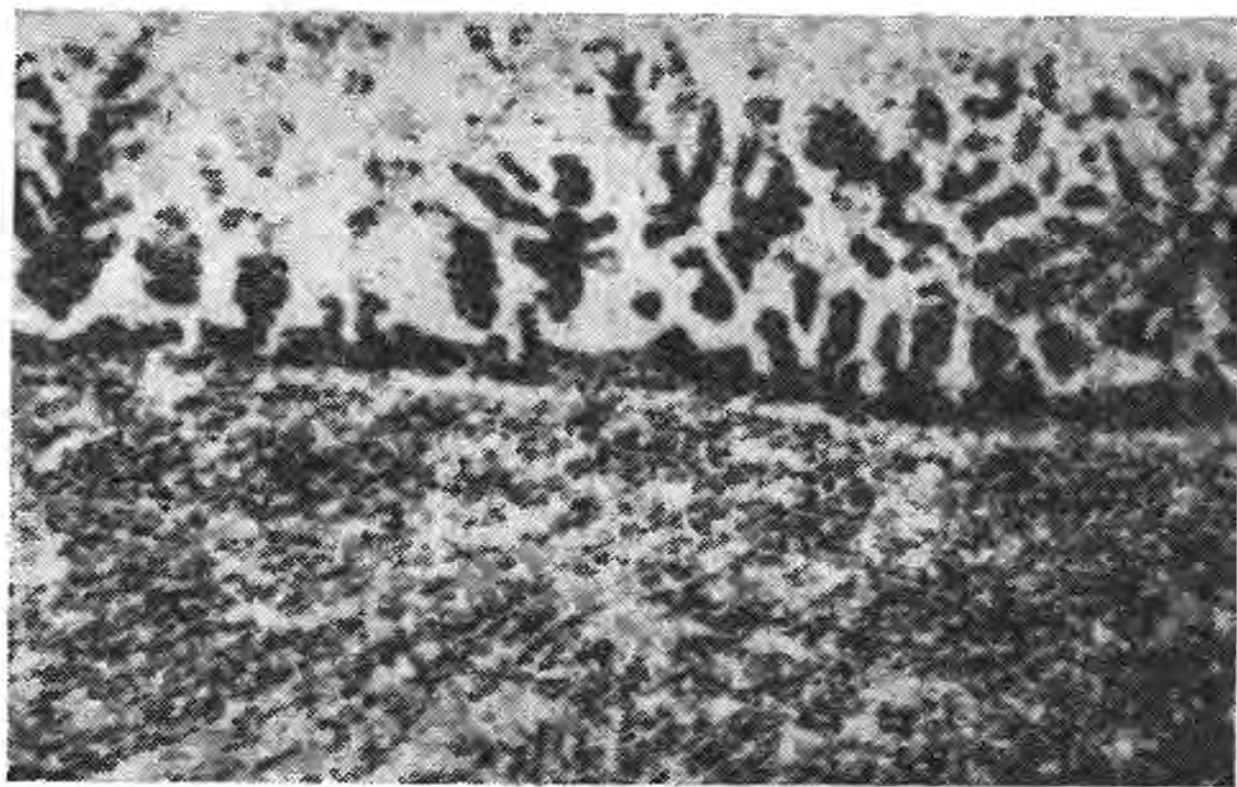


Рис. 28. Микроструктура поверхностного слоя алюминия после взаимодействия с флюсом 34А при температуре пайки, $\times 80$

Образующийся в результате этой реакции хлористый алюминий в момент выделения находится в газообразном состоянии, что способствует механическому разрушению (отрыву) окисной пленки. Металлический цинк, выделяющийся при этой реакции, осаждается в расплавленном состоянии на освобожденную от окислов поверхность алюминия, что облегчает процесс сплавления его с припоем. На рис. 28 видно, что в результате флюсования на поверхности алюминия отлагается довольно значительный слой металлического цинка. Пары хлористого алюминия, выделяющиеся при флюсовании, токсичны, однако они интенсивно растворяются в расплавленном флюсе в процессе пайки, поэтому не оказывают вредного воздействия.

По современным воззрениям, расплавленные соли находятся в ионизированном состоянии, поэтому приведенные выше процессы флюсования следует рассматривать как электрохимические. Впервые на это в 1916 г. указал В. А. Ванюков, показав, что металлургические шлаки представляют собой ионизированные системы.

Электропроводность солей зависит от элементов их структуры. Электропроводны только те расплавы солей, в которых элементами структуры являются ионы. Если такими элементами являются моле-

кулы, то расплавы почти не проводят электрического тока. Ионное строение расплавленных солей подтверждается резким уменьшением их электропроводности при температуре кристаллизации. Электропроводность ионных кристаллов связана с наличием в них неупорядоченных ионов и не занятых мест в узлах кристаллической решетки, а электропроводность окислов во флюсах типа стекла — с наличием свободных электронов и электронных «дырок».

Электрохимический процесс при флюсовании протекает между основным металлом и окисной пленкой. Так, при флюсовании алюминия процесс идет в паре: алюминий (анод) и окисная пленка на нем (катод). Расплавленный флюс является электролитом. На аноде электрический ток поддерживается в результате перехода алюминия во флюс в виде иона, а на катоде — в результате перехода ионов кислорода O^{2-} . Ионы алюминия, отрываясь от поверхности металла, постепенно нарушают связь частиц окисной пленки с металлом. Таким образом, электрохимический процесс вызывает разрыхление окисной пленки, отрыв ее от металла и переход в шлак.

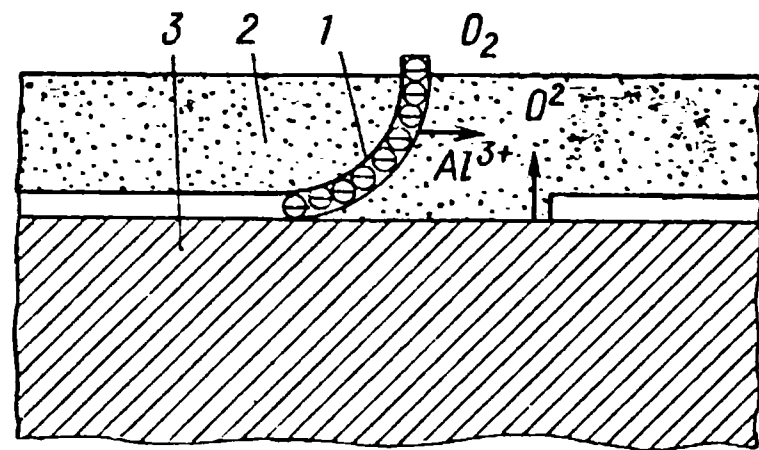


Рис. 29. Схема механизма удаления окисной пленки при пайке алюминия в результате электрохимических процессов:

1 — окисная пленка; 2 — флюс; 3 — алюминий

В результате взаимодействия ионов алюминия и кислорода в расплаве электролита (флюса) образуется дисперсная окись алюминия. Требуемый для протекания этой реакции кислород, постепенно поступающий из атмосферы через пленку расплава флюса, деполяризует катод, поэтому электрохимический процесс во флюсе протекает непрерывно. Схема механизма удаления окисной пленки с алюминия в результате электрохимических процессов представлена на рис. 29.

Рассмотренные выше флюсы применяются при высокотемпературной пайке в состоянии расплавов. При низкотемпературной пайке используют также водные растворы солевых флюсов. Наиболее распространенными из них являются флюсы на основе хлористого цинка. При пайке с этими флюсами вследствие гидролиза образуются пары хлористого водорода, который взаимодействует с окисной пленкой паяемого металла и припоя, переводя окислы в хлориды, легко растворимые во флюсе. При гидролизе протекает реакция $ZnCl_2 + H_2O = ZnO + 2HCl$. Окись цинка обладает флюсующими свойствами, она может взаимодействовать с окислами основного металла по схеме $MeO + ZnO = MeO \cdot ZnO$.

Образующийся хлористый водород взаимодействует с окисной пленкой по реакции $MeO + 2HCl = MeCl_2 + H_2O$.

Хлористый водород, растворяясь в воде, образует соляную кислоту, которая непосредственно взаимодействует с металлами: $Me + 2HCl = MeCl_2 + H_2$.

После испарения воды оставшийся расплавленный хлористый цинк предохраняет поверхность металла от окисления, способствуя тем самым протеканию процесса пайки.

В работах С. В. Лашко указывается на большую вероятность протекания при взаимодействии ZnCl_2 с водой реакции $\text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Zn}(\text{OH})\text{Cl} + \text{HCl}$.

Флюсующее действие применяемых при низкотемпературной пайке канифоли и флюсов на ее основе объясняются способностью органических кислот, содержащихся в ней, растворять окислы некоторых металлов.

Канифоль представляет собой желтовато-красную или темно-коричневую хрупкую массу плотностью $0,96\text{—}1,01 \text{ г/см}^3$, получаемую из смолы хвойных деревьев. В ее составе содержится абиетиновая кислота $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$ и другие органические кислоты, растворяющие окислы меди и некоторых других металлов. При температуре 125°C канифоль переходит в жидкое состояние, а при 300°C разлагается. Нагрев выше 300°C приводит к обугливанию канифоли и потере ею флюсующих свойств.

Механизм действия активных добавок канифольных флюсов изучен мало. Некоторые из них обладают исключительно ценными свойствами. Так, солянокислый анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2\text{HCl}$ при нагреве выделяет хлористый водород, который взаимодействует с окислами основного металла и припоя с образованием легкорастворимых во флюсе хлоридов: $\text{MeO} + 2\text{HCl} = \text{MeCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

При охлаждении после пайки протекает реакция соединения непрореагировавшего хлористого водорода с остатком солянокислого анилина, в результате чего флюс снова становится нейтральным и не вызывает коррозии металлов.

При пайке температура начала действия флюса должна быть ниже температуры плавления припоя с тем, чтобы к моменту его расплавления процесс флюсования прошел достаточно полно. Если температура плавления и температура активного действия флюса будут значительно ниже температуры плавления припоя, то процесс флюсования пройдет преждевременно, а это может привести к окислению основного металла или образованию на его поверхности других соединений еще до момента расплавления припоя.

Пайка с флюсами наиболее распространена и общедоступна, так как ее можно осуществлять в обычных атмосферных условиях без применения дорогостоящего оборудования. Однако область ее применения ограничена ввиду невозможности в ряде случаев полностью удалить остатки флюсов. Поэтому в настоящее время наблюдается тенденция к переходу на бесфлюсовую пайку, осуществляемую в специальных газовых средах или в вакууме.

§ 3. Газовые среды и их роль

Отмеченные в предыдущем параграфе недостатки флюсов вызвали необходимость изыскания других более эффективных способов удаления окисных пленок с металла в процессе пайки. В результате

были найдены искусственные газовые среды, позволяющие производить пайку без флюсов. Такие искусственные среды можно разделить на три основных типа: нейтральные атмосферы, активные атмосферы, вакуум.

Н е й т р а л ь н ы е г а з о в ы е с р е д ы выступают в роли защитной атмосферы. Нейтральным газом, получившим наибольшее распространение, является аргон — одноатомный газ с плотностью $1,78 \text{ кг/м}^3$. Он образуется как побочный продукт при получении кислорода из воздуха. Составы чистого аргона, поставляемого по ГОСТ 10157—62, приведены в табл. 14.

Т а б л и ц а 14

Содержание, %, не более				
Марки аргона	аргона не менее	азота	кислорода	влаги, г/м ³
А	99,99	0,01	0,003	0,03
Б	99,96	0,04	0,005	0,03
В	99,90	0,10	0,005	0,03

Составы аргона выбирают в зависимости от активности паяемых металлов и припоя к кислороду. Чистый аргон всех трех составов применяют при пайке нержавеющей и жаропрочных сталей, вольфрама, титана и других металлов. При пайке титана и его сплавов предпочитается аргон состава А. Для сталей можно применять аргон составов Б и В. Чистый аргон всех трех составов можно применять для пайки без дополнительной осушки и очистки от примесей кислорода. Ввиду высокой стоимости аргона целесообразно в случае печной пайки производить его регенерацию.

Гелий — одноатомный инертный газ плотностью $0,178 \text{ кг/м}^3$. Содержится в природных газах, из которых главным образом и добывается. В качестве примесей в нем бывает небольшое количество углеводородов; кислород и азот практически отсутствуют. Поэтому гелий как газовая атмосфера при пайке обеспечивает высокое качество паяных изделий из большинства конструкционных материалов. Широкого распространения в нашей стране гелий не получил, так как его промышленное производство еще не освоено и стоимость его пока высокая.

Если пайка протекает при сравнительно низких температурах, то в ряде случаев вместо дефицитных аргона и гелия применяют более дешевый газ — азот.

Азот в нормальных условиях является двухатомным газом плотностью $1,251 \text{ кг/м}^3$. При комнатной температуре азот отличается большой инертностью, но при нагреве до высоких температур вступает во взаимодействие со многими металлами. Азот в чистом виде применяют при пайке меди и сталей. В потоке сухого азота окислы меди разлагаются при температуре $740\text{—}750^\circ \text{C}$ вместо 2000°C при нагреве в атмосфере воздуха. Следовательно, бесфлюсовая пайка меди в атмосфере азота возможна при температуре 750°C

и выше. Пайка сталей в атмосфере азота, особенно нержавеющей, происходит при температуре около 1200°C . Процесс пайки протекает примерно так же, как и в аргоне, однако некоторые стали взаимодействуют с азотом с образованием на поверхности твердого азотированного слоя, обладающего высокой хрупкостью. Это обстоятельство ограничивает применение азота для пайки высоконагруженных тонкостенных изделий, особенно подвергающихся вибрационным нагрузкам в процессе эксплуатации. Вместе с тем следует указать на целесообразность использования азота в связи с его низкой стоимостью в качестве газовой атмосферы при пайке в первую очередь сравнительно толстостенных деталей, для которых поверхностное азотирование не оказывает существенного влияния на прочность.

А к т и в н ы е г а з о в ы е с р е д ы. Активные газовые среды, применяемые при пайке, не только защищают металлы от окисления, но и способствуют удалению окисной пленки в процессе пайки. Среди активных сред наибольшее распространение получили водород и различные газовые смеси, содержащие водород и окись углерода. Активные газовые среды делят на восстановительные газовые среды и газообразные флюсы. К восстановительным газовым средам относятся водород, окись углерода и газовые смеси, содержащие эти газы в качестве восстановителей окислов металлов.

К газообразным флюсам условно относят газовые среды, содержащие другие активные компоненты, способствующие удалению окислов металлов в процессе пайки, например трехфтористый бор, фтористый водород, хлористый водород и т. д.

Водород является двухатомным газом, плотность его в нормальных условиях $0,084\text{ кг/м}^3$. В заметное взаимодействие с кислородом водород вступает при температуре 300°C . При нагреве до 700°C водород с кислородом взаимодействует со взрывом. Очищенный от примесей других газов и паров воды водород является одним из лучших восстановителей металлов из окислов, но из-за взрывоопасности его применение ограничено. Поэтому для пайки водород в чистом виде применяют редко и только в печах малого объема. Наиболее целесообразно применять водород в смеси с азотом. Такие смеси значительно дешевле и менее взрывоопасны.

Азотно-водородные смеси, содержащие 8% водорода и менее, не взрывоопасны, но восстановительные свойства их по сравнению с водородом более низкие.

Большое распространение в качестве восстановительной газовой среды при пайке нашел диссоциированный аммиак. Аммиак NH_3 при нормальных условиях имеет плотность $0,77\text{ кг/м}^3$. При нагреве до температуры выше 535°C в присутствии катализатора аммиак разлагается на водород и азот: $2\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + 3\text{H}_2$.

Полученная в результате диссоциации аммиака азотно-водородная смесь содержит 75% водорода и 25% азота по объему. Благодаря высокому содержанию водорода она является прекрасным восстановителем металлов из окислов не только при пайке низкоуглеродистых сталей, но и сталей и сплавов, содержащих легкоокисляющиеся элементы, такие как хром, марганец, кремний и др. Однако высокими

восстановительными свойствами обладает только тщательно осушенный газ. Наличие даже следов влаги вызывает обезуглероживание поверхности сталей и снижает восстановительные свойства. Образующаяся при диссоциации газовая смесь водорода с азотом не должна содержать недиссоциированный аммиак, так как при наличии последнего происходит взаимодействие с кислородом с образованием окиси азота, являющейся катализатором при обезуглероживании сталей.

Недостатком диссоциированного аммиака является его взрывоопасность ввиду значительного содержания водорода. Для понижения содержания водорода диссоциированный аммиак иногда частично сжигают в воздухе или смешивают с азотом. Однако полученные таким путем газовые смеси содержат значительные количества кислорода и паров воды. Поэтому перед пайкой их необходимо тщательно осушать, а также очищать от примеси кислорода.

Наряду с рассмотренными восстановительными газами и газовыми смесями при пайке применяют газовые атмосферы сложного состава, представляющие собой продукты сгорания, образующиеся при сжигании горючих газов с дозированным количеством воздуха. Состав получаемых продуктов сгорания можно регулировать, меняя соотношение горючего газа и воздуха. Сжигание горючих газов может быть с выделением тепла или с поглощением в процессе неполного сгорания. Полученные таким путем атмосферы называют иногда соответственно экзотермическими и эндотермическими. После сжигания горючих газов продукты сгорания осушают и очищают от соединений серы. При недостаточно тщательной осушке газовые среды, особенно экзотермические, приводят к обезуглероживанию поверхности сталей и для пайки непригодны. Степень осушки газа характеризуется точкой росы. Точкой росы называется температура, до которой должен быть охлажден газ, чтобы содержащийся в нем водяной пар достиг насыщения и начал конденсироваться на окружающих предметах.

Более высокими восстановительными свойствами обладают атмосферы, полученные путем сжигания горючих газов с поглощением тепла. При получении таких атмосфер температура катализатора и соотношение газа и воздуха подбирают так, чтобы происходило разложение углеводородов при неполном сгорании. Основными составляющими образующейся при неполном сгорании газовой смеси является водород, окись углерода и азот. Такие газовые смеси, не содержащие влаги, не обезуглероживают сталей в процессе пайки, а, наоборот, оказывают слегка науглероживающее действие. Составы атмосфер, полученных при неполном сгорании городского газа в воздухе, приведены в табл. 15.

Продукты сгорания при неполном сжигании получают более сухими, поэтому при пайке низкоуглеродистых сталей отпадает необходимость применять осушители. Из реторты, где происходит разложение углеводородов, газ можно направлять непосредственно в печь для пайки. Состав и назначение применяемых при пайке восстановительных газовых сред приведены в табл. 16.

Соотношение горю- чий газ: воздух	Химический состав, %					Точка росы °C
	CO ₂	CH ₄	H ₂	CO	N ₂	
1,67 : 1	1,0	1,5	43,2	26,4	27,9	22
1,80 : 1	0,8	1,6	44,7	27,0	26,2	16
2,00 : 1	0,5	1,7	46,5	27,9	23,4	10
2,20 : 1	0,1	2,0	47,3	27,9	22,8	—6
2,50 : 1	0	2,4	48,8	28,1	20,7	—15

Приведенные в табл. 16 газовые атмосферы обычно содержат при-
меси кислорода и паров воды, которые перед пайкой необходимо
тщательно удалять. Осушка газов производится путем пропускания
их через силикагель, алюмогель или фосфорный ангидрид, которые
обеспечивают точку росы соответственно — 40° С; —60° С и —80° С
[23]. При осушке фосфорным ангидридом газ предварительно про-
пускают через силикагель и алюмогель, что удлиняет срок службы
колонки с фосфорным ангидридом. Примеси кислорода из восстано-
вительных атмосфер удаляют путем пропускания газа через погло-
тители — обычно медную стружку. Для тонкой очистки инертных
газов от кислорода, азота и паров воды применяют титановую или
циркониевую губку.

Т а б л и ц а 16

Атмосфера	Химический состав				Назначение
	H ₂	CO	N ₂	CO ₂	
Водород	100	—	—	—	Для пайки сталей и жаропрочных сплавов
Диссоциированный ам- миак	75	—	25	—	Для пайки углероди- стых и низколегирован- ных сталей
Продукты неполного сжигания диссоцииро- ванного аммиака	7—20	—	Ост.	—	Для пайки низкоугле- родистых сталей
Продукты сгорания го- рючего газа	{ 14—15 38—40	{ 9—10 17—19	{ 70—71 41—55	{ 5—6 —	То же Для пайки средне- и высокоуглеродистых сталей

К активным газовым средам относят также газообразные флюсы.
Их применяют как самостоятельные газовые атмосферы или добав-
ляют в нейтральные и восстановительные газовые среды для повы-
шения активности в процессе пайки. В качестве газообразных флю-
сов применяют фтористый водород HF, трехфтористый бор BF₃,
борорганические соединения и другие вещества. Газообразный флюс

получают или в специальном диссоциаторе, из которого его подают к месту пайки, или же исходные продукты, при разложении образующие газообразный флюс, вносят непосредственно в контейнер для пайки. Газообразные флюсы получают из фтористого аммония NH_4F , фторбората аммония NH_4BF_4 , фторбората калия KBF_4 , хлористого аммония NH_4Cl . При неполном распаде фтористого аммония и фторбората аммония протекают реакции: $2\text{NH}_4\text{F} \rightleftharpoons 2\text{NH}_3 + 2\text{HF}$ и $2\text{NH}_4\text{BF}_4 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3 + 2\text{HF} + 2\text{BF}_3$.

Фтористый аммоний полностью разлагается на водород, азот и фтористый водород при температуре $600\text{—}800^\circ\text{C}$. Фторборат аммония полностью разлагается на водород, азот, фтористый водород и трехфтористый бор при $850\text{—}950^\circ\text{C}$. Если происходит неполный распад фтористого аммония и фторбората аммония, то при охлаждении аммиак взаимодействует с фтористым водородом. Образующийся при этом фтористый аммоний осаждается на паяемых деталях или в газовой линии, засоряя ее. Поэтому при получении газообразного флюса из фтористого аммония и фторбората аммония необходимо добиваться их полного разложения.

Фторборат калия полностью разлагается при температуре $800\text{—}900^\circ\text{C}$ по реакции $\text{KBF}_4 \rightarrow \text{KF} + \text{BF}_3$.

Следует отметить, что при пайке с применением фторбората калия высокой флюсующей активностью обладает как сам фторборат калия, так и продукты его распада. В качестве активной добавки в нейтральные и восстановительные газовые среды чаще всего используют трехфтористый бор, который иногда поставляют в баллонах.

При пайке газовыми горелками газообразные флюсы можно добавлять в горючие газы; при этом в зоне пламени создается атмосфера, обладающая флюсующими свойствами. Так, флюс БМ-1, предложенный ВНИИавтогенмашем, подается в газовую горелку из специального флюсопитателя вместе с горючим газом. Пары этого флюса, представляющего смесь метанола с метилборатом, в пламени горелки разлагаются с образованием борного ангидрида, который оказывает на паяемый металл и припой флюсующее действие. Однако при таком способе флюсования проникновение газообразного флюса в зазоры затруднено, в результате чего швы иногда остаются непропаянными.

Рассмотренные газообразные флюсы применяют при высокотемпературной пайке. Процесс низкотемпературной пайки резко активизируется при добавлении к существующим нейтральным и активным газовым средам паров хлористого аммония NH_4Cl . Так, в присутствии хлористого аммония пайка меди оловом в среде азота с точкой росы -70°C протекает при 330°C .

Механизм действия газообразного флюса рассмотрим на примере трехфтористого бора. При температуре пайки трехфтористый бор вступает в реакцию с окислами металлов: $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{BF}_3 \rightarrow 2\text{CrF}_3 + \uparrow (\text{BOF})_3$. При недостаточном количестве трехфтористого бора в зоне пайки протекает реакция $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{BF}_3 \rightarrow 2\text{CrF}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$.

Газообразная фторокись бора легко удаляется. Твердые остатки B_2O_3 и SrF_2 образуют сравнительно легкоплавкий шлак, не препятствующий смачиванию поверхности основного металла припоем.

Основным преимуществом применения при пайке нейтральных и восстановительных атмосфер является отсутствие твердых остатков на паяных деталях, в связи с чем отпадает необходимость промывать их после пайки. Применение газовых сред облегчает также механизацию и автоматизацию процесса пайки.

Вакуум. Вакуум так же, как и активные газовые среды, защищает от окисления и способствует удалению с поверхности металла окисной пленки.

Вакуум создается путем откачки газа насосами из контейнера или печи, в которых производится пайка. Вакуум разделяют на низкий, средний (форвакуум) и высокий. Границей между высоким и средним вакуумом принято считать давление 10^{-4} мм рт. ст. Область давлений ниже 10^{-1} мм рт. ст. относят к низкому вакууму. Низкий вакуум для пайки, как правило, не применяют. Средний вакуум, от 10^{-1} до 10^{-4} мм рт. ст., используют для пайки сталей, бронз и никелевых сплавов. Высокий вакуум крайне желателен для пайки таких активных металлов, как титан, цирконий, ниобий, тантал, но на оборудовании, применяемом для пайки крупногабаритных изделий, он трудно достижим. При отсутствии промышленного оборудования, необходимого для создания высокого вакуума, пайку активных металлов можно производить в среднем вакууме, но при условии предварительной промывки пространства контейнера или вакуумной печи чистым аргоном. Первой операцией такой промывки является создание вакуума 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст., после чего вакуумированное пространство заполняют чистым аргоном, который вновь откачивают до указанного вакуума. В результате этого парциальное давление кислорода, азота и паров воды снижается до значений, соответствующих высокому вакууму, что практически полностью исключает окисление металлов при пайке и обеспечивает получение вакуум-плотных и прочных паяных соединений.

Многократное вакуумирование с последующим напуском нейтрального газа применяют при пайке титановых сплавов. При этом важно установить число откачиваний и заполнений нейтральным газом. Произвольный выбор этой величины вызывает или охрупчивание титана из-за неполной промывки, или излишний расход дорогостоящего инертного газа, который имеет существенное значение при пайке крупногабаритных конструкций.

Для определения оптимального числа промывок $n_{\text{опт}}$ можно принять следующую зависимость между остаточным давлением вакуума P_v , давлением аргона $P_{\text{Ар}}$, концентрацией примеси в вакууме C_0 и аргоне C . Коэффициент f , показывающий допустимое содержание примеси сверх минимального, принимают равным 0,01—0,05:

$$n_{\text{опт}} = \frac{\lg \frac{C_0}{C f_{\text{опт}}}}{\lg \frac{P_{\text{Ар}}}{P_v}}.$$

Пайка в вакууме наряду с высокой прочностью паяных соединений позволяет предупредить охрупчивание нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов ввиду отсутствия возможности образования на их поверхности нитридов и гидридов. Недостатком пайки в вакууме является сравнительная сложность и высокая стоимость оборудования, а также непригодность для нее многих легкоиспаряющихся припоев.

При пайке металлов в нейтральных и активных газовых средах, а также в вакууме основными процессами удаления окисных пленок с поверхности паяемых металлов и припоя являются частичная диссоциация и испарение окислов, а также взаимодействие их с активными компонентами газовых сред.

Д и с с о ц и а ц и я о к и с л о в. Прочность связи элементов в окислах, определяющая возможность их разложения, может быть приближенно оценена по теплотам их образования. Так, окислы благородных металлов имеют наименьшую прочность связи элементов и наиболее легко разлагаются при нагреве. Наоборот, окислы таких металлов, как алюминий, магний, бериллий, имеют очень высокую прочность связи элементов в окислах и диссоциация их протекает наиболее трудно. В сплавах, где поверхностная пленка состоит из многих окислов металлов, имеющих различную устойчивость, прочность связи элементов в окислах пленки может быть оценена по прочности связи элементов в наиболее устойчивых окислах.

По возрастанию сродства к кислороду элементы можно расположить в следующем порядке: Cu, Ni, Co, Mo, Fe, W, Cr, Mn, Si, Ti, Al.

Устойчивость окислов металлов зависит от температуры. При нагреве до определенных температур окислы начинают разлагаться с выделением кислорода. Ниже приведены температуры (°C) полного разложения некоторых окислов металлов на воздухе:

Au ₂ O	250	Cu ₂ O	1835
PtO ₂	300	PbO	2348
Ag ₂ O	300	NiO	2751
HgO	440	FeO	3000
CdO	900	MnO	3500
		ZnO	3817

Как можно видеть, значения температур полного разложения окислов отдельных металлов на воздухе достаточно высоки. Для того чтобы создать условия разложения при более низких температурах, необходимо наряду с нагревом уменьшить парциальное давление кислорода в окружающей металл газовой среде. Это можно достигнуть или заменой воздушной атмосферы искусственной, не содержащей кислорода, или вакуумированием.

Согласно закону действующих масс, константа равновесия обратной реакции между металлом и кислородом $mMe + \frac{n}{2} O_2 \rightleftharpoons$

$\rightleftharpoons Me_m O_n$ определяется из соотношения

$$K_c = \frac{C_{Me}^m C_{O_2}^{\frac{n}{2}}}{C_{Me_m O_n}},$$

где C_{Me} , C_{O_2} , $C_{Me_m O_n}$ — концентрация металла, кислорода и окисла.

Вместо концентраций реагирующих веществ можно подставить пропорциональные им парциальные давления, тогда формула примет вид

$$K_p = \frac{p_{Me}^m p_{O_2}^{\frac{n}{2}}}{p_{Me_m O_n}},$$

где p_{Me} , p_{O_2} , $p_{Me_m O_n}$ — парциальные давления паров металла, кислорода и паров окисла.

При неизменной температуре реакции между металлом и кислородом парциальные давления металла p_{Me} и окисла $p_{Me_m O_n}$ — постоянные величины. Поэтому в общем случае для реакций окисления металлов или разложения их окислов можно записать:

$$K_p = a p_{O_2},$$

где a — константа.

Данное равенство показывает, что при неизменной температуре условия равновесия между металлом

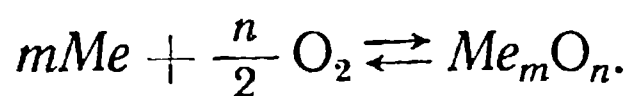
и его окислом определяются парциальным давлением кислорода. Это давление называется давлением диссоциации (упругостью диссоциации) окисла. Зависимость давления диссоциации окисла от температуры определяется формулой

$$\lg p_{O_2} = -\frac{Q}{4,571T} + 1,75 \lg T + 2,8,$$

где Q — теплота диссоциации окисла, отнесенная к молю кислорода;
 T — температура, °К.

На основе этой формулы были построены кривые зависимости давления диссоциации окислов некоторых элементов от температуры (рис. 30).

Каждая из приведенных кривых отражает равновесное состояние реакции



Как показывают кривые рис. 30, при неизменном парциальном давлении кислорода в газовой среде увеличение температуры на-

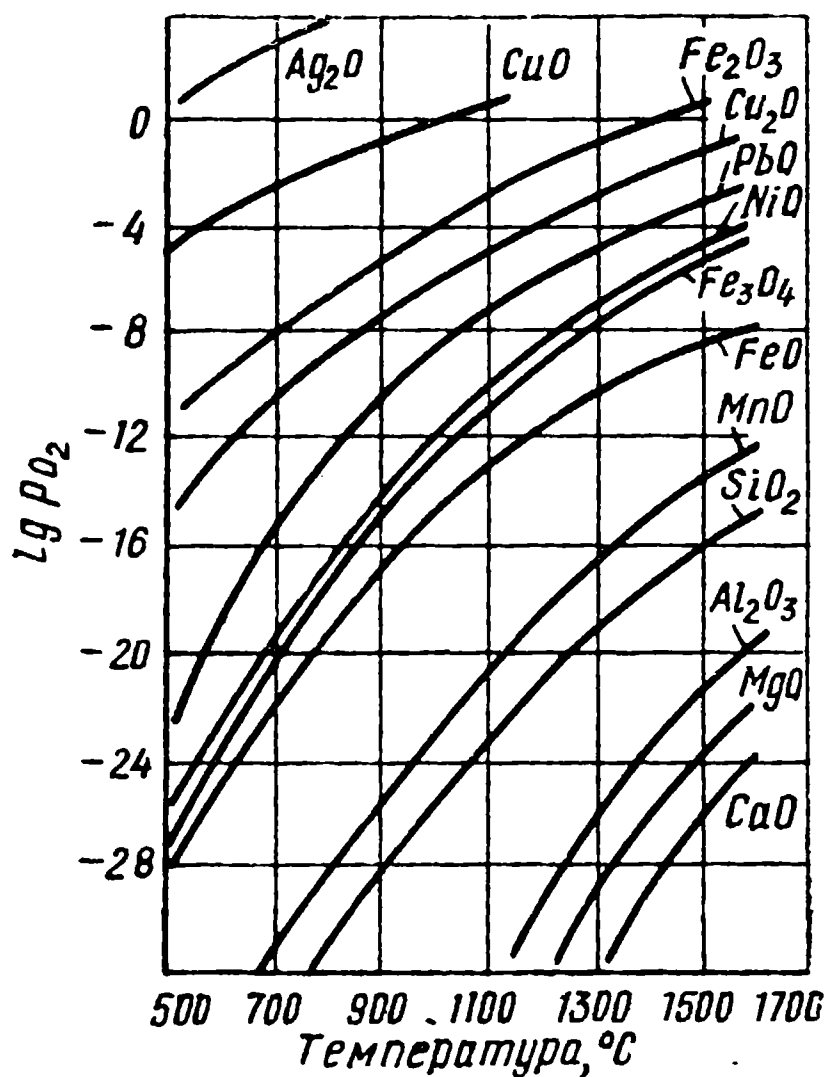


Рис. 30. Зависимость давления диссоциации окислов от температуры

грева смещает равновесие - в сторону диссоциации окисла. При постоянной температуре нагрева и уменьшении парциального давления кислорода будет происходить диссоциация окислов, при увеличении давления — окисление металла. Следовательно, полного разложения окислов металлов при пайке в нейтральных газовых средах можно достигнуть, увеличивая температуру нагрева и уменьшая парциальное давление кислорода в газовой среде.

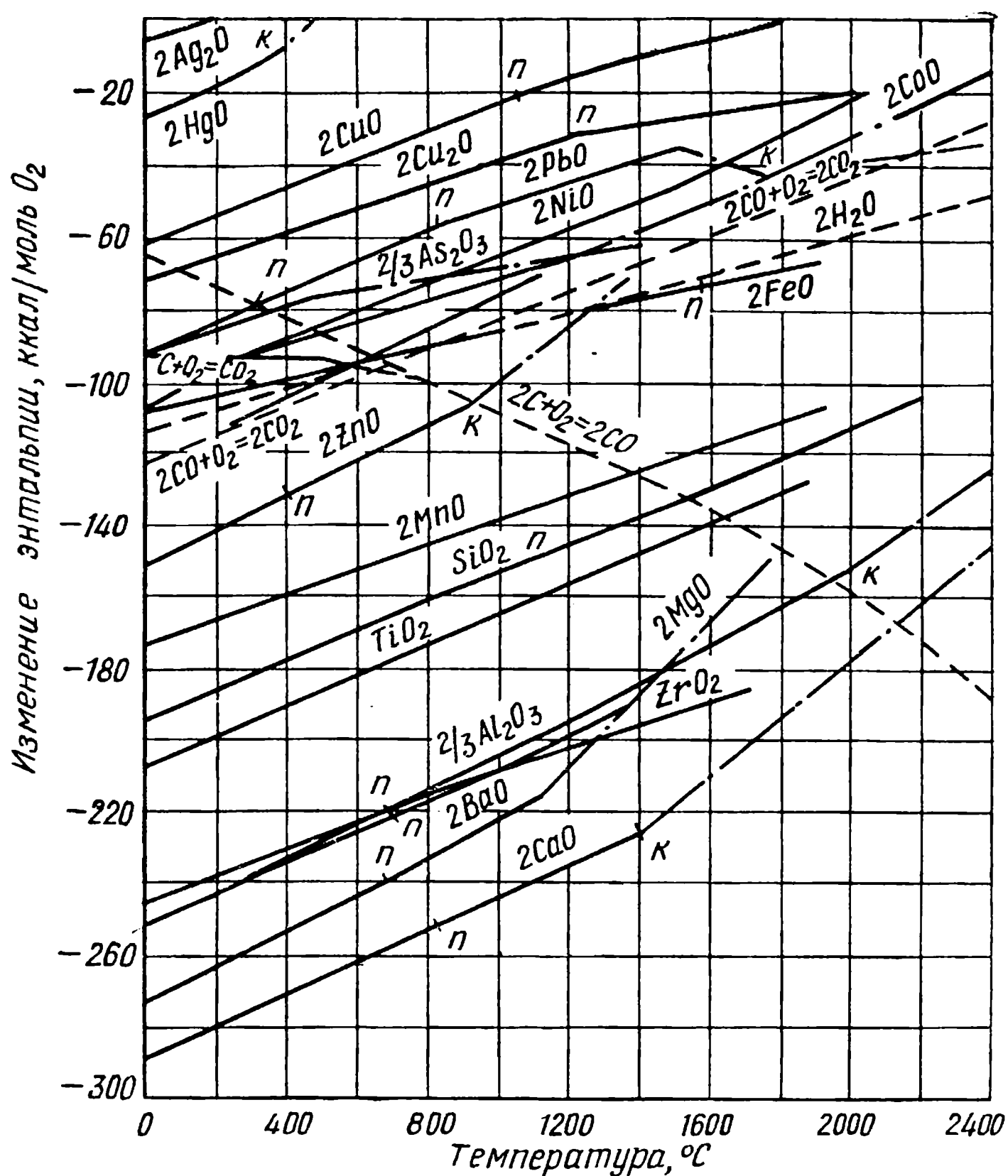


Рис. 31. Зависимость изобарного термодинамического потенциала образования окислов от температуры

Из приведенных кривых можно видеть, что металлы (медь, никель, железо) образуют окислы с высоким давлением диссоциации. Наоборот, окислы кремния и марганца имеют низкое давление диссоциации, и для них достаточно ничтожно малое содержание кислорода в окружающей металл газовой среде, чтобы вызвать образование окислов. Поэтому безокислительный нагрев высоколегированных сталей может быть осуществлен только при очень низком парциальном давлении кислорода в газовой среде или при высоком вакууме.

При изотермическом равновесии в пространстве печи или контейнера, в которых происходит пайка, связь между давлением диссоциации окисла и изобарно-изотермическим потенциалом или свободной энергией Гиббса системы взаимодействующих веществ при постоянном давлении выражается соотношением

$$\Delta Z^{\circ} = 4,576T \lg p_{O_2},$$

где ΔZ° — изменение энергии системы, когда исходные и конечные продукты реакции находятся в стандартных ¹ условиях;

T — абсолютная температура;

p_{O_2} — давление диссоциации окисла, относящееся к парциальному давлению кислорода в газовой среде, равному 1 *at*.

При любом парциальном давлении кислорода p в зоне пайки изменение изобарно-изотермического потенциала или свободной энергии реакции диссоциации окисла ΔZ составит

$$\Delta Z = \Delta Z^{\circ} - 4,576T \lg p_{O_2}.$$

Зависимость изменения свободной энергии образования окислов от температуры приведена на рис. 31. Изменение свободной энергии окислов отнесено к 1 *молю* кислорода, связывающего соответствующее количество металла при давлении газовой среды 1 *at*. В точках плавления (п) и кипения (к) окислов кривые претерпевают излом.

Кривые показывают, что с повышением температуры тепловой эффект образования окислов уменьшается, стремление к взаимодействию снижается, устойчивость окислов падает, а при определенной температуре происходит диссоциация окислов с поглощением тепла.

Для того чтобы вызвать термическую диссоциацию окисла, необходим нагрев до температур, при которых давление его диссоциации было бы несколько выше парциального давления кислорода в нейтральной газовой среде или вакууме, в которых производится пайка. Значения необходимого вакуума для диссоциации окислов некоторых металлов приведены в табл. 17.

Цифры, приведенные в табл. 17, вычислены теоретически. По ним можно видеть, что для железа, хрома и титана температурные условия диссоциации окислов близко совпадают с температурами печной пайки сплавов на основе железа и титана. Однако необыкновенно высокие значения вакуума, которые в условиях пайки совершенно недостижимы, указывают на то, что пайку этих металлов в вакууме осуществить нельзя. Однако при температуре 1100—1200° С пайка сталей и титановых сплавов протекает успешно при среднем вакууме. Отсюда можно сделать вывод, что механизм удаления окисной пленки в процессе пайки при практически достижимом вакууме связан не только с диссоциацией окислов. Известно, что высшие окислы металлов при диссоциации переходят в низшие, которые для ряда металлов при высоких температурах пайки могут диффундировать с поверхности в глубь металла, подготавли-

¹ Стандартными условиями в термохимии считаются температура 25° С и давление 1 *at* в отличие от нормальных условий, когда температура 0° С и давление 1 *at*.

вая таким образом основной металл для смачивания припоем. Ярким примером этого является пайка титана в вакууме 10^{-2} — 10^{-4} мм рт. ст., успешно протекающая при температуре около 1000°C . Это вполне согласуется с данными о том, что окисная пленка титана растворяется в металле при температуре выше 700°C . При пайке возможно испарение некоторых окислов, а также растворение их в расплавленном припое. Приведенный выше механизм удаления окисной пленки в процессе пайки в вакууме относится также и к высокотемпературной пайке в нейтральных газовых атмосферах, тща-

Т а б л и ц а 17

Окисел	Температура °C	Давление при равновесии мм рт. ст.
FeO	1150	10^{-10}
Cr ₂ O ₃	1150	10^{-15}
Cr ₂ O ₃	850	10^{-23}
MnO	1150	10^{-18}
SiO ₂	1150	10^{-19}
TiO ₂	1150	10^{-21}
Al ₂ O ₃	1150	10^{-27}

тельно очищенных от кислорода и других вредных примесей.

Одним из способов снижения парциального давления кислорода в системе при безокислительном нагреве является совместное использование вакуума и паров легкоиспаряемых элементов. Сущность этого способа состоит в том, что в контейнер вместе с паяемым металлом вводят некоторое количество низкокипящего или легковозгоняемого металла и после предварительной откачки воздуха нагревают контейнер. При этом в контейнере остается ограниченное количество кислорода, определяемое внутренним объемом контейнера и остаточным давлением воздуха в нем. В процессе нагревания контейнера остаточный кислород начинает окислять поверхность основного металла, если он не имеет достаточную защитную пленку. Одновременно в пространстве камеры нагрева распространяются пары низкокипящего металла, которые через некоторое время связывают весь свободный кислород, имеющийся в камере. Вакуум способствует ускорению процесса. В камере при этом создается «туман» окислов испарившегося металла, который можно удалить откачиванием.

Поскольку парциальное давление в камере пайки при этом резко снижается, начинается диссоциация окисной пленки на поверхности паяемого металла.

Эффективность этого способа снижения парциального давления кислорода в камере пайки зависит от степени вакуумирования,

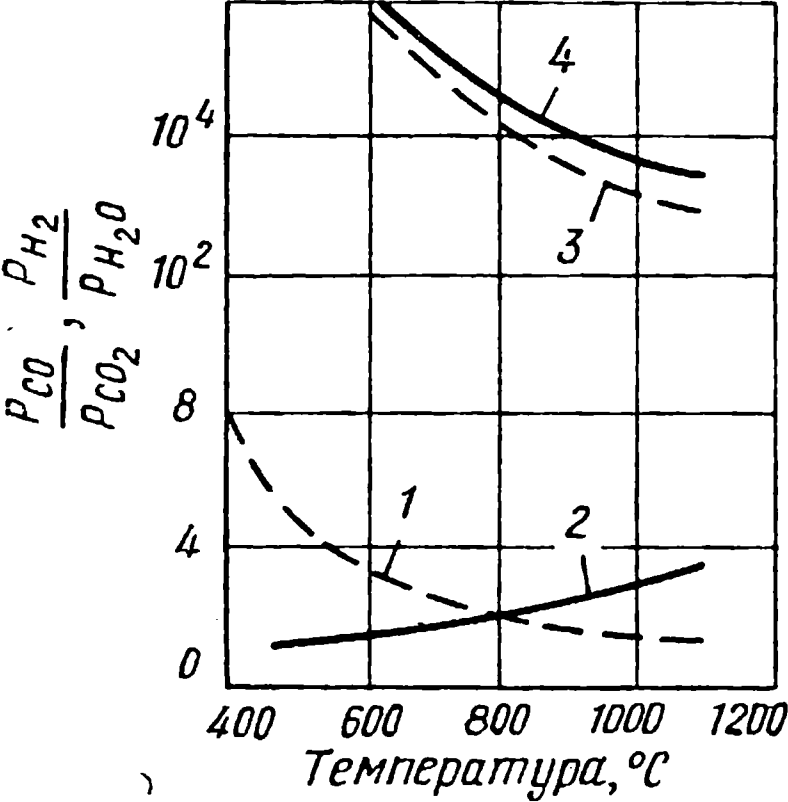


Рис. 32. Кривые равновесия атмосферы H_2 — H_2O , CO — CO_2 с железом и хромом при восстановлении окислов:
1 — железа водородом; 2 — железа окисью углерода; 3 — хрома водородом; 4 — хрома окисью углерода

поскольку от вакуума зависит количество остаточного кислорода в контейнере. Чем меньше кислорода, тем быстрее можно его связать полностью.

В вакууме ускоряется также распространение газообразного металла и, следовательно, «улавливание» молекул кислорода, т. е. вакуум оказывает существенное влияние на кинетику процесса.

В о с с т а н о в л е н и е о к и с л о в. При пайке металлов в качестве восстановителей окисной пленки применяют главным образом водород и окись углерода. Водород обладает более высокими восстановительными свойствами по сравнению с окисью углерода. Проведенные опыты по восстановлению магнетита Fe_3O_4 и гематита Fe_2O_3 при 500°C и давлениях до $0,02\text{ мм рт. ст.}$ показали, что водород восстанавливает их примерно в 20 раз быстрее, чем окись углерода. Восстановление тех же окислов при 800°C дало соотношение скоростей восстановления примерно равным десяти. Причиной такого различия в скоростях восстановления водородом и окисью углерода, по-видимому, является большая адсорбируемость водорода на поверхности окислов по сравнению с адсорбируемостью окиси углерода.

На скорость восстановления окислов металлов при обычном количестве газов-восстановителей основное влияние оказывает количество кислорода, попадающего в камеру пайки из других источников (недостаточная чистота газовой среды, подсос воздуха, выделение адсорбированного кислорода металлом и элементами печи и т. д.), и скорость удаления продуктов восстановления. Если в камеру не будет поступать свежий поток газовой смеси, не содержащей кислорода и продуктов восстановления, то концентрация последних может достигнуть такого предела, что процесс восстановления окислов прекратится и реакция пойдет в обратном направлении с образованием окислов. Даже сравнительно небольшие добавки паров воды и углекислого газа (2—3%), которые не могут повысить интенсивность обратной реакции, т. е. процесса окисления восстанавливаемого металла, вызывают сильное торможение процесса восстановления.

В присутствии паров воды и двуокиси углерода скорость процесса восстановления оказывается практически равной нулю задолго до установления равновесного состава газовой фазы. Так, при 500°C в момент прекращения реакции $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$ содержание паров воды составляет 16%, в то время как равновесное содержание паров близко к 100%.

При восстановлении магнетита окисью углерода реакция $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$ перестает протекать при наличии в газе 25% двуокиси углерода вместо приблизительно 50%, согласно условиям равновесия.

Уменьшение скорости реакции в отмеченных случаях происходит в результате уменьшения количества адсорбированного на поверхности окислов восстановителя. При наличии в газовой среде продуктов восстановления последние, адсорбируясь на поверхности окислов, блокируют активные центры реакции. В результате скорость

восстановления резко снижается, несмотря на то что состав газовой фазы далек от равновесного. При наличии в газовой атмосфере продуктов взаимодействия затрудняется также диффузия паров воды и двуокиси углерода из зоны реакции в газовую фазу. Отрицательное действие продуктов реакции особенно сильно сказывается при зарождении и развитии активных центров реакции, т. е. в инкубационном периоде восстановления. Влияние продуктов реакций восстановления на восстановительные свойства водорода и окиси углерода при взаимодействии с окислами железа и хрома характеризуется кривыми, приведенными на рис. 32. Выше кривых расположена область восстановления, ниже — область окисления. Кривые 1 и 3 показывают, что при восстановлении окислов металлов водородом повышение концентрации паров воды в газовой атмосфере при данной температуре пайки сдвигает реакцию в сторону окисления, и для осуществления безокислительного нагрева в этих условиях температуру необходимо повышать.

При температурах выше 570°C , при которых протекает высокотемпературная пайка железоуглеродистых сплавов, реакция между закисью железа и водородом протекает по уравнению $\text{FeO} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$.

Скорости прямой и обратной реакций, когда одновременно взаимодействуют газы и твердые вещества, зависят не от объемной концентрации твердых веществ, а от площади, по которой происходит реакция. Поскольку при пайке она неизменна и скорость реакции зависит только от концентрации газообразных веществ, то константа равновесия приведенной реакции определяется отношением $K_1 = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$.

При увеличении константы, т. е. при повышении содержания водорода или снижении влажности газовой среды, реакция смещается вправо, в сторону восстановления металла из окислов. При уменьшении константы равновесия, т. е. при повышении содержания водорода или повышении влажности газовой среды, реакция между металлом и газовой средой смещается в сторону окисления. Чтобы обеспечить протекание процесса восстановления окислов металла водородом при повышенной влажности газовой среды, необходимо поднимать температуру в камере нагрева (кривая 1 на рис. 32).

Сравнение кривых 1 и 3, характеризующих соответственно условия равновесия при нагреве железа и хрома, показывает, что для восстановления окислов хрома водородом требуется более тщательная осушка газовой среды или высокая температура нагрева. Поскольку повышать температуру пайки не всегда целесообразно, то для улучшения условий восстановления окислов металлов снижают парциальное давление водяного пара в водороде, т. е. производят тщательную осушку газов.

Если в качестве восстановителя применять окись углерода, то закись железа при температуре выше 570°C будет восстанавливаться по реакции $\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}_2$.

Константа равновесия этой реакции при условиях, аналогичных условиям восстановления металла из закиси железа водородом, определяется отношением $K_2 = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$.

С повышением концентрации углекислого газа при постоянной температуре реакция смещается влево. Для того чтобы возобновить реакцию восстановления железа из окислов, необходимо при уменьшении концентрации окиси углерода не повышать, как это было в случае восстановления водородом, а снижать температуру

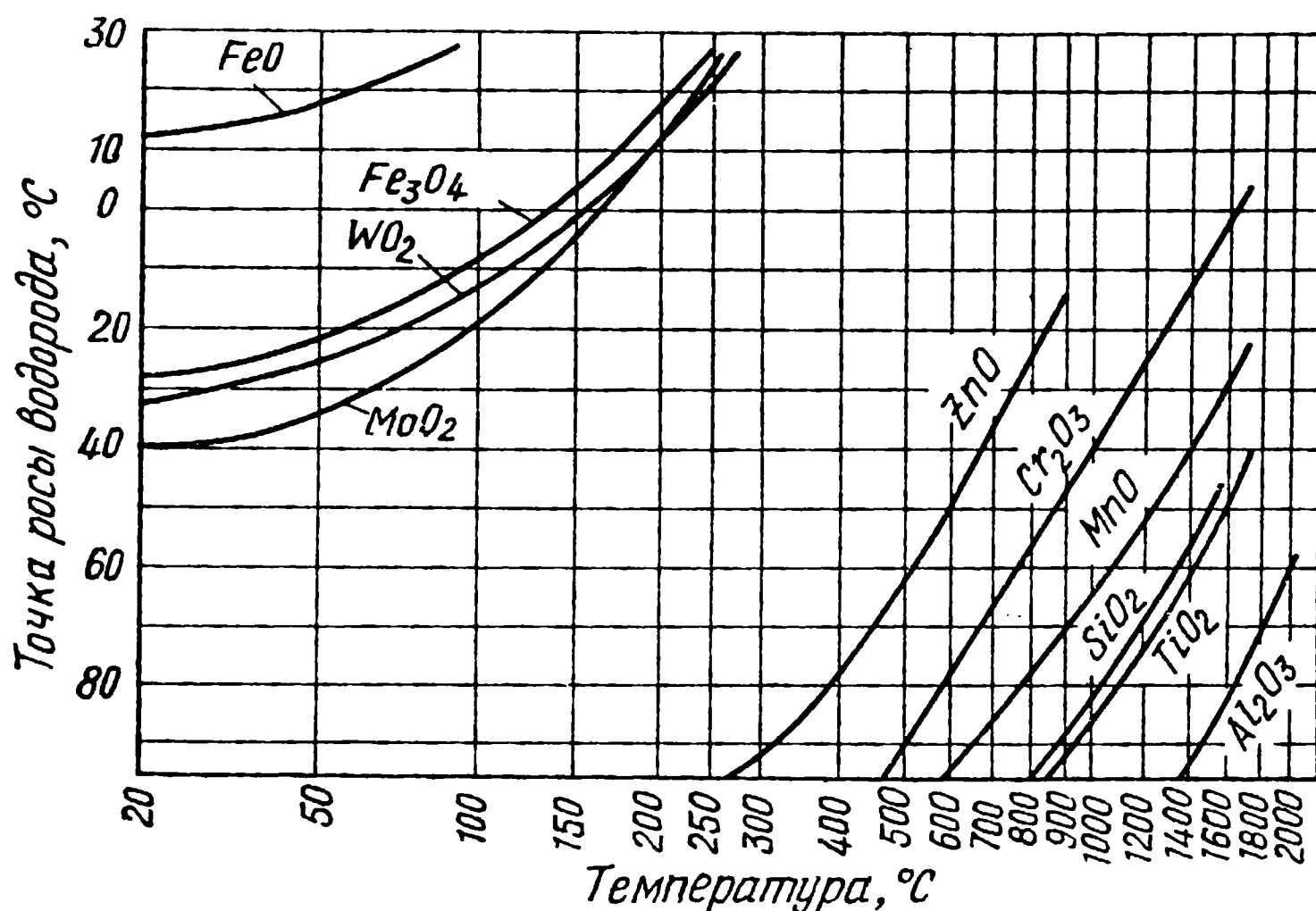
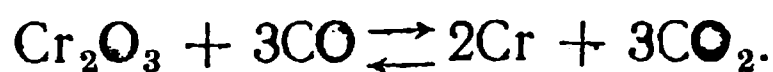
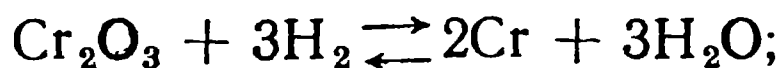


Рис. 33. Зависимость точки росы водорода от температуры обратимых реакций между окислами металлов и водородом

нагрева (кривая 2 на рис. 32). Это является особенностью восстановления окислов железа окисью углерода. Так, при одинаковом соотношении концентраций газов-восстановителей и продуктов восстановления (например, $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O} = 2$ и $\text{CO}/\text{CO}_2 = 2$) и температуре 1000°C в среде водорода восстанавливаются окислы железа, а в среде окиси углерода окисляется железо. Наоборот, при температуре 600°C при тех же соотношениях водородная среда вызывает окисление, а окись углерода — восстановление железа из окислов. По отношению к хрому окись углерода и водород ведут себя одинаково (кривые 3 и 4 на рис. 32).

Восстановление окиси хрома водородом и окисью углерода происходит по реакциям:



Если эти реакции смещаются влево, т. е. в сторону окисления металла, то для создания условий восстановления в обоих случаях

необходимо или повышать температуру нагрева, или снижать содержание в газовой атмосфере паров воды и углекислого газа. Практически парциальное давление водяного пара в газовой атмосфере выражают через экспериментально определяемую точку росы, т. е. температуру конденсации влаги, содержащейся в газе. Кривые зависимости точки росы в водороде от температуры обратимых реакций между окислами металлов и водородом приведены на рис. 33.

Область значений точек росы, расположенных правее кривых, отвечает условиям восстановления металлов из окислов, левее — условиям окисления металлов.

При применении для пайки восстановительных сред, получаемых путем сжигания горючих газов, в них одновременно содержатся водород, окись углерода и продукты их окисления. В этом случае при нагреве происходят сложные взаимодействия как между газовой средой и основным металлом, так и в газовой фазе. Кривая равновесия газовой смеси, содержащей водород, окись углерода и продукты их окисления при взаимодействии с железом, приведена на рис. 34 *. В зависимости от содержания продуктов окисления, т. е. от соотношения $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ и CO_2/CO и температуры, в газовой смеси будут условия или окисления, или восстановления окислов железа.

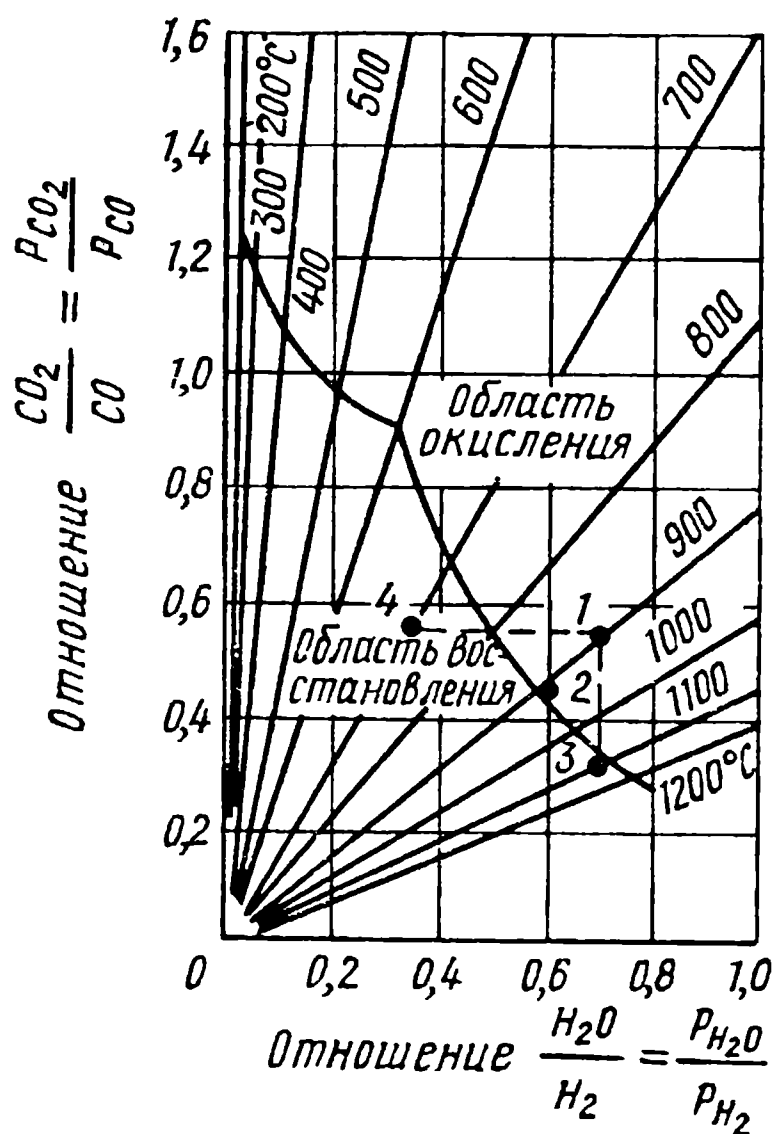


Рис. 34. Кривая равновесия газовой смеси сложного состава при взаимодействии с железом

Интенсивность процесса восстановления железа определяется составом газовой фазы и температурой.

Для оценки влияния состава газовой среды на процесс восстановления рассмотрим условия равновесия между металлом и газовой фазой при различных составах газовой смеси. Точка 1 соответствует такому составу газовой фазы, при котором при температуре 900°C происходит окисление железа. Если снижать содержание продуктов взаимодействия в газовой среде, то при максимально допустимом содержании H_2O и CO_2 условия восстановления при этой температуре могут быть созданы в точке 2, лежащей на линии равновесия. Если в газовой смеси, соответствующей по составу точке 1, снижать содержание только углекислого газа, то соотношение CO_2/CO будет уменьшаться, но условия восстановления могут быть созданы только при повышении температуры, например при 1100°C , что соответствует точке 3. Если в газовой смеси, по составу соответствующей

* Кривая построена без учета влияния на процесс восстановления углерода, который может образовываться в данной среде.

точке 1, снижать только содержание паров воды, то соотношение H_2O/H_2 будет уменьшаться и газовая смесь будет обладать восстановительными свойствами при более низких температурах. Например, при $H_2O/H_2 = 0,35$ газовая смесь будет обладать восстановительными свойствами при $700^\circ C$ (точка 4).

Таким образом, при пайке низкоуглеродистых сталей в газовой среде, содержащей водород, окись углерода и продукты их взаимодействия с кислородом, только одновременная очистка газовой среды от углекислого газа и паров воды повышает ее восстановительные свойства.

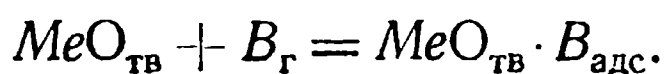
Очистка только от углекислого газа делает атмосферу восстановительной при повышенных температурах. Очистка только от паров воды делает атмосферу восстановительной при более низких температурах, но при этом содержание углекислого газа должно быть не выше определенного предела, например при соотношении $H_2O/H_2 = 0,4$ соотношение CO_2/CO должно быть не более 0,7 [23].

Рассмотренные кривые равновесия характеризуют восстановительные свойства водорода, окиси углерода и газовых смесей, содержащих эти газы, при условии отсутствия в их составе свободного кислорода. При наличии кислорода (что практически всегда есть из-за подсоса воздуха и адсорбированного кислорода) на поверхности паяемых деталей, нагревательных элементов и футеровке печи восстановительные свойства газовых сред ухудшаются.

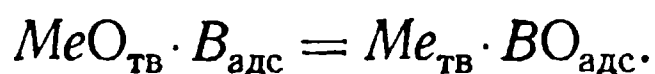
Пайка в восстановительных газовых атмосферах обеспечивает высокое качество паяных соединений, не требующих дополнительной обработки. Производить пайку в газовых атмосферах наиболее целесообразно в условиях массового производства, так как в этом случае наиболее легко механизировать и автоматизировать все процессы.

По современным воззрениям, процессы восстановления включают адсорбцию и десорбцию веществ, разрушение кристаллической решетки окислов и построение решеток, образующихся в процессе восстановления продуктов реакции. Однако в отличие от процессов диссоциации при восстановлении ломка имеющихся в окисной пленке связей и возникновение новых в образующихся продуктах реакции являются результатом не термического разрушения, а взаимодействия с восстановителем. При восстановлении одновременно идет взаимодействие катионов окислов и восстановителя с анионами. Однако отрыв аниона от окислов восстановителем облегчается, так как в процессе этой реакции выделяется энергия связи аниона (кислорода) с восстановителем. Поэтому восстановление окислов происходит при температурах, более низких, чем процессы их диссоциации.

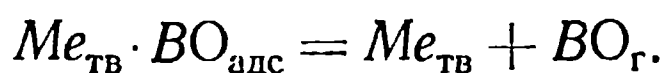
Согласно современной адсорбционно-автокаталитической теории, процесс восстановления складывается из нескольких стадий. Первой стадией восстановления является адсорбция газа-восстановителя (В) на поверхности окисной пленки:



После этого следует отрыв кислорода от окисла и переход его к адсорбированным молекулам восстановителя:



Эта реакция сопровождается образованием новых фаз:



В итоге реакция взаимодействия будет иметь вид:



Последней стадией процесса восстановления является десорбция соединения восстановителя с кислородом с реакционной поверхности.

Адсорбционная природа процесса восстановления характеризуется тем, что с окислами окисной пленки реагируют лишь те молекулы восстановителя, которые вступили с пленкой в определенное взаимодействие. Эти молекулы, оказавшиеся в силовом поле решетки окисла, могут значительно отличаться от находящихся в газообразном состоянии. Под действием силового поля решетки происходит их упорядочение; адсорбированные на поверхности окисла молекулы деформируются вплоть до отрыва отдельных атомов или их групп. В том случае, когда восстановление протекает на границе двух твердых фаз, адсорбированные молекулы восстановителя находятся под воздействием обеих решеток. При этом если проникновение восстановителя по границе фаз затруднено, то может возникнуть поверхностная миграция ионов металла и кислорода окисла, которая в итоге также приводит к взаимодействию кислорода с восстановителем и к восстановлению металла.

Своеобразие химического взаимодействия окислов с восстановителем состоит в том, что граница раздела твердых фаз, т. е. граница между исходной окисной пленкой и восстанавливаемым металлом, в ряде случаев является катализатором, и таким образом, процесс восстановления может стать автокаталитическим.

Процессы восстановления окислов металлов, как показали многочисленные исследования, применительно к окислам железа развиваются ступенчато и зонально. Ступенчатость заключается в том, что высший окисел при взаимодействии с восстановителем последовательно переходит в такой низший, с которым он находится в равновесии согласно диаграмме состояния металл—кислород. В более широкой форме это представление сформулировано академиком А. А. Байковым в следующей форме: восстановление окислов может идти ступенчато или по пути последовательного отщепления кислорода от высшего окисла к низшему по схеме $Me_2O_3 \rightarrow Me_3O_4 \rightarrow MeO \rightarrow Me$, или по пути последовательного отщепления металла от его низшего окисла к высшему: $MeO \rightarrow Me_3O_4 \rightarrow Me_2O_3 \rightarrow O_2$.

В случае восстановления окислов железа при отщеплении кислорода этот принцип может быть записан в следующем виде: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ (при температуре выше 570°C) и $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe$ (ниже 570°C) или в случае отщепления и удаления атомов железа — в виде $FeO \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3 \rightarrow O_2$.

Со ступенчатостью превращений в окислах тесно связана зональность процесса восстановления. Сущность ее состоит в том, что в процессе восстановления газ-восстановитель, проникая в микропоры и микротрещины окисной пленки, восстанавливает ее не по всей толщине одновременно. Если окисная пленка на поверхности металла в начальный момент восстановления не содержит включений металла, т. е. твердой фазы, образующейся в процессе восстановления, то скорость восстановления имеет три периода. Первый период — инкубационный, когда адсорбированные молекулы восстановителя вступают во взаимодействие только с наиболее активными участками окисной пленки. Скорость реакции в инкубационном периоде восстановления низкая. Второй период характеризуется непрерывным возрастанием скорости процесса взаимодействия восстановителя с кислородом окислов вследствие образования и увеличения поверхности раздела исходной и образующейся твердых фаз. В третьем периоде реакционные зоны вокруг отдельных зародышей сливаются. Поверхность, по которой происходит взаимодействие, уменьшается, что приводит к замедлению скорости восстановления [24].

Кроме изложенной выше адсорбционно-автокаталитической теории, ранее существовала двухстадийная теория восстановления окислов, согласно которой сначала происходит диссоциация окислов на металл и кислород и только после этого — взаимодействие восстановителя с кислородом. Но по этой теории оказалось невозможным объяснить механизм удаления окислов при пайке в восстановительных атмосферах. Например, при температурах печной пайки диссоциации окислов железа, хрома и других компонентов окисных пленок на сталях не происходит, в то время как пайка протекает вполне успешно. Противоречия с фактами, наблюдаемыми при восстановлении окислов металлов, заставили отказаться от двухстадийной теории.

§ 4. Физико-механические способы удаления окисных пленок

М е х а н и ч е с к и е с п о с о б ы. Наряду с рассмотренными способами удаления окисных пленок с помощью флюсов и газовых сред в процессе пайки некоторых металлов и сплавов применяют механическое разрушение окисной пленки. Так, при низкотемпературной пайке алюминия для этой цели применяют абразивные паяльники. Сущность этого способа состоит в том, что окисная пленка с паемого металла удаляется с помощью абразивного стержня или круга, спрессованного из смеси порошкообразного припоя и измельченного асбеста (до 10%). При этом способе используют припой с температурой плавления от 75 до 450° С.

Представляет интерес так называемый способ абразивно-кристаллической пайки, при котором применяют припой в жидкотвердом состоянии. Удаление окисной пленки при этом способе про-

изводится твердыми кристаллами припоя, как абразивными частицами, жидкая фаза служит припоем. Исходя из этого, для абразивно-кристаллической пайки применяют припой с широким интервалом кристаллизации.

Окисная пленка удаляется в процессе относительного перемещения паяемого изделия и припоя, для этого или перемещают паяемую деталь вдоль неподвижной ванны с припоем, или делают подвижную ванну. Неподвижные ванны целесообразно применять в том случае, когда можно обеспечить непрерывную подачу паяемого металла, например при лужении фольги и проволоки. Схема лужения в неподвижной ванне представлена на рис. 35.

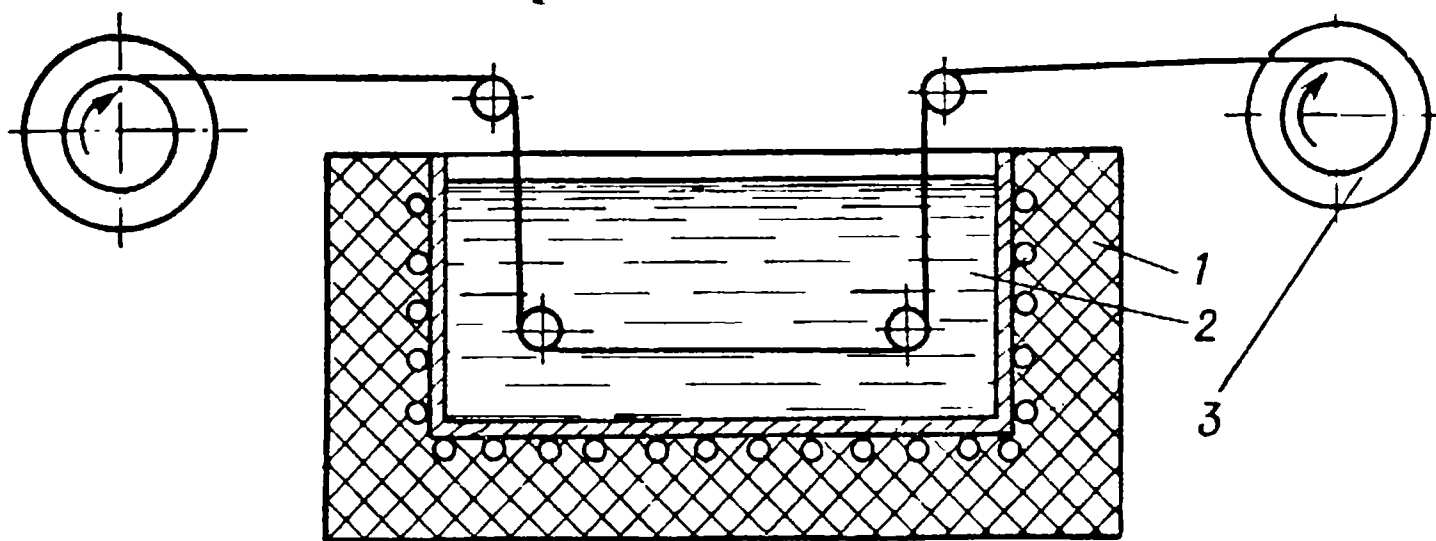


Рис. 35. Схема неподвижной ванны для абразивно-кристаллической пайки: 1 — электропечь с ванной; 2 — расплав припоя; 3 — катушка с облучиваемой фольгой или проволокой

Как можно видеть из схемы, фольга или проволока перематывается с одной катушки на другую и пропускается через расплав припоя, находящегося в жидко-твердом состоянии. В тех случаях, когда детали невозможно облуживать в неподвижных ваннах, применяют ванны вращающиеся или с поступательно-возвратным движением.

В качестве припоев при абразивно-кристаллической пайке применяют сплавы олово-цинк, кадмий—цинк, алюминий—цинк, кадмий—олово. При применении этого способа пайки в припое должно быть определенное соотношение между жидкой и твердой фазами. Если будет избыток жидкой фазы, то процесс удаления окисной пленки с поверхности изделия замедлится и время лужения увеличится. При избытке твердой фазы паяемое изделие в процессе лужения может быть деформировано.

Способ абразивно-кристаллической пайки применяют для бесфлюсового лужения алюминия и его сплавов низкотемпературными припоями [25].

Физические способы. Для разрушения окисной пленки в процессе пайки применяют также ультразвуковые колебания. К ультразвуковым относят упругие колебания и волны с частотой выше 20 000 гц. Для получения ультразвуковых колебаний электрический ток низкой частоты преобразуется в специальном генераторе в ток ультразвуковой частоты и подается на излучатель, являющийся источником ультразвуковых колебаний. В качестве таких источ-

ников используют магнитострикционные и электрострикционные (пьезоэлектрические) излучатели. В магнитострикционных излучателях ультразвуковые колебания возникают в результате способности некоторых металлов и сплавов изменять свои размеры под действием магнитного поля. Такими свойствами обладают никель, кобальт, сплавы никеля с железом и медью, сплавы кобальта с железом, сплавы железа с платиной и др., которые и применяют для изготовления магнитострикционных излучателей, дающих колебания с частотами 500—150 000 гц.

В электрострикционных излучателях колебания возникают в результате способности некоторых веществ изменять свои размеры под действием электрического поля. В качестве электрострикционных излучателей применяют кристаллы таких веществ, как кварц, сегнетова соль, титанат бария, фосфат аммония или калия и др. Электрострикционные излучатели дают колебания частотой от 100 000 гц и выше.

В пайке для получения ультразвуковых колебаний применяют преимущественно магнитострикционные излучатели, так как они позволяют работать при сравнительно высоких температурах. Недостатком их является ослабление магнитострикционного эффекта с увеличением нагрева. Излучатели из железокобальтового сплава позволяют, например, работать до температуры 400° С. Полное исчезновение магнитострикционного эффекта наступает в точке Кюри.

Применение ультразвука для пайки основано на свойстве упругих механических колебаний ультразвуковой частоты при прохождении через жидкости вызывать в них явление кавитации. Под действием ультразвуковых колебаний, излучаемых магнитостриктором, в жидкости образуются продольные волны, вызывающие попеременно то сжатие ее, то расширение. При расширении, если гидростатическое давление упадет до упругости пара или ниже, жидкость окажется растянутой и в ней образуются разрывы или кавитационные пузырьки. Под действием давления при изменении фазы колебания, а также сил поверхностного натяжения разрывы захлопываются. В момент захлопывания пузырьков местные давления в жидкости достигают сотен атмосфер, что вызывает образование сильных ударных волн, под действием которых происходит разрушение твердых тел. Разрушение происходит тем интенсивнее, чем плотнее жидкость, в которой создается кавитация.

При пайке в качестве кавитирующей жидкости применяют расплавы припоев. Под действием ударных волн, происходящих в жидком припое, окисная пленка на поверхности паяемого металла разрушается. Интенсивность кавитации возрастает с уменьшением частоты колебаний, но продолжительное воздействие механических колебаний низких частот вредно для человеческого организма, поэтому для пайки применяются колебания с частотой 16 000—25 000 гц.

В настоящее время при пайке применяют два способа передачи ультразвуковых колебаний:

1. С помощью ультразвуковых паяльников которые ультразвуковые колебания создают в расплаве припоя, нанесенного на основной металл.

2. С помощью ультразвуковых ванн, в которых ультразвуковые колебания передаются расплавленному припою через стенки сосуда при облуживании способом погружения.

Как в первом, так и во втором случае назначение ультразвуковых колебаний — удалить с поверхности основного металла окисную пленку, создав тем самым непосредственный контакт с расплавленным припоем.

Принципиальная схема устройства ультразвукового паяльника представлена на рис. 36. Магнитострикционный излучатель 2, помещенный внутри катушки обмотки возбуждения 3, соединен с высокочастотным генератором 4. Под действием переменного электромагнитного поля, создаваемого генератором, в излучателе генерируются продольные колебания ультразвуковой частоты, которые передаются рабочей части паяльника 1. От рабочей части паяльника колебания передаются расплавленному припою 7, вызывая в нем образование кавитационных пузырьков 5. С целью уменьшения потерь излучатель составляют, подобно трансформаторам, из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Нагрев рабочей части паяльника осуществляется обмоткой 6, по которой пропускают ток низкого напряжения. Иногда ультразвуковые паяльники изготовляют без нагревателя, тогда для расплавления припоя применяют посторонние источники нагрева в виде обычного паяльника, газовой горелки и т. п.

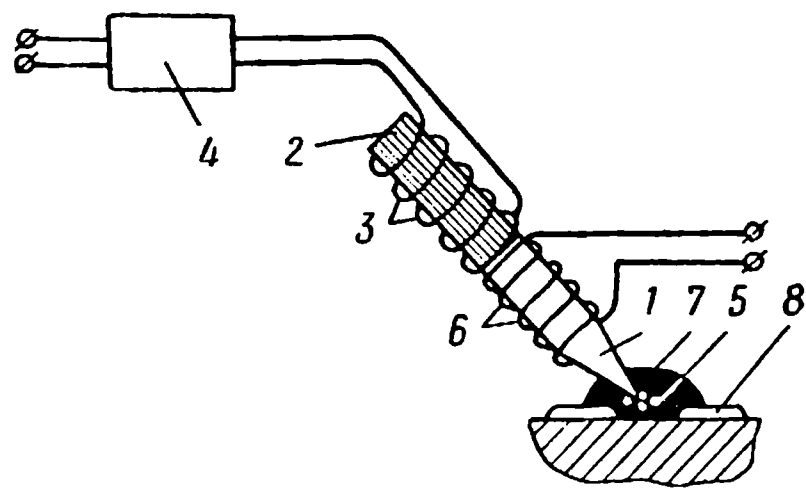


Рис. 36. Принципиальная схема устройства и работы ультразвукового паяльника

Дополнительный нагрев от постороннего источника необходим также при пайке крупных деталей, так как нагрев, получаемый от рабочей части паяльника, в этом случае недостаточен. Разрушение окисной пленки 8 при помощи ультразвукового паяльника происходит очень быстро, приблизительно в течение $1/20$ сек, но в очень узкой зоне, непосредственно расположенной под рабочей частью паяльника. Для облуживания паяльником большой площади необходимо ее обрабатывать постепенно, и в этом случае способ удаления окисной пленки мало эффективен.

Следует отметить, что паяльник нужно перемещать в припое, не касаясь им облуживаемой поверхности, в противном случае эффект будет снижаться, так как кавитация происходит только в жидкой среде. Пайку производят после облуживания каждой из соединяемых поверхностей, которые сжимают, нагревают до расплавления припоя и охлаждают в сжатом состоянии. Отсутствие возможности визуально наблюдать процесс лужения ультразвуковым паяльником приводит к тому, что окисная пленка не всегда полностью

удаляется, в результате чего слой полуды иногда отстает и на облученной поверхности образуются своеобразные пузыри.

Основное преимущество пайки с применением ультразвука — возможность облуживания металлов, а также неметаллических материалов, соединение которых ранее считалось невозможным, или вызывало большие затруднения. Наиболее целесообразно применять ультразвук для пайки алюминиевых сплавов, для которых под действием кавитации при нагреве выше 400°C окисная пленка легко отделяется без разрушения основного металла. При нагреве выше 400°C наряду с окисной пленкой начинает разрушаться и основной металл.

Под действием кавитации легко удаляется окисная пленка на сталях и медных сплавах, но для них применение ультразвука нецелесообразно, так как имеются другие более простые и более эффективные способы. Для магния, бериллия, титана и сплавов на их основе, а также нержавеющей сталей, никрома и алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния кавитационное воздействие на окисную пленку для целей пайки оказалось малоэффективным.

Физико-механические способы удаления окисной пленки практическое применение нашли главным образом при низкотемпературной пайке алюминия, с которого удалить окисную пленку другими способами не удается.

Г л а в а III

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПАЯНОГО ШВА

§ 1. Процессы смачивания и капиллярного течения припоев

Смачиваемостью называется первая стадия физико-химического взаимодействия жидкости с поверхностью твердого тела, результатом которого является растекание ее тонким слоем. От того, насколько хорошо расплавленный припой смачивает поверхность основного металла, зависит прочность, коррозионная стойкость и другие свойства паяных соединений.

Наименьшая температура, при которой расплавленный припой смачивает основной металл, называется нижним пределом температурного интервала смачивания. Верхний предел температурного интервала смачивания лимитируется свойствами припоев сохранять стабильность при нагреве выше температуры ликвидуса и возможностями предупредить окисление их в процессе пайки.

При смачивании атомы металлов сближаются на расстояния менее $10\text{ \AA}$. В поверхностных слоях взаимодействующих металлов, обладающих особыми свойствами, при этом возникают связи, кото-

рые, образовавшись в отдельных местах, очень быстро распространяются по всей площади контакта основной металл — расплав припоя.

Атомы расплавленного припоя, вступившие при смачивании во взаимодействие с твердым основным металлом, образуют монослой, по которому лежащие над ним слои атомов припоя свободно перемещаются в плоскости, параллельной спая, что способствует развитию процесса взаимодействия. Силу F , с которой ион основного металла e_1 и ион расплавленного припоя e_2 притягиваются на расстоянии r при образовании химической связи, определяют по формуле

$$F = - \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}.$$

Энергия μ , получаемая, когда два заряда перемещаются из бесконечности на расстояние a , составит

$$\mu = \int_{\infty}^a -F dr = \int_{\infty}^a \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} dr = - \frac{e_1 \cdot e_2}{a}.$$

Для одновалентных противоположно заряженных ионов $e_1 = -e_2$ освобождаемая при их взаимодействии энергия равна $+e^2/a$.

Тогда освобождаемая энергия на грамм-молекулу:

$$M = N\mu = N \frac{e^2}{r_p},$$

где N — число Авогадро;

r_p — расстояние между ионами, характеризующее равновесие.

При соединении двух ионов с зарядами z освобождаемая грамм-молекулярная энергия составит

$$M = \frac{z^2 e^2}{r_p} N.$$

Количество выделяемой энергии при взаимодействии атомов расплавленного припоя и основного металла характеризует прочность химических связей в зоне спая.

В процессе смачивания основного металла расплавленным припоем две свободные поверхности заменяются одной границей фаз между твердым металлом и расплавом припоя с более низкой свободной поверхностной энергией системы. На этой стадии образования спая основную роль начинают играть квантовые процессы между частицами атомных размеров. Взаимодействие между ними проявляются в притяжении или отталкивании, интенсивность и характер которых зависят от природы металлов и внешних условий процесса. Поскольку при пайке металлов однокомпонентными и многокомпонентными припоями взаимодействие при образовании спая протекает главным образом между разнородными металлами, то при образовании соединений основную роль играют переходы электронов с внешних сфер атомов металлов. Поэтому активность образования соединений между атомами металлов определяется конфигурацией внеш-

него электронного слоя. В том случае, когда он насыщен электронами, атом проявляет большую склонность к захвату чужих электронов. При малом количестве электронов на внешних слоях атома последний легко отдает их при взаимодействии с другими атомами. В ходе взаимодействия атомов основного металла и расплавленного припоя возможна коллективизация электронов и образование металлической связи. Этот процесс также термодинамически выгоден, так как приводит к уменьшению энергии системы в связи с сокращением свободной поверхности.

Рассматривая смачивание паяемой поверхности припоем как процесс, предшествующий взаимной диффузии твердого основного

Т а б л и ц а 18

Припой	Температура плавления припоя, °С	Температура пайки, °С	Перегрев, °С
Олово	231,9	930	698,1
Медь	1083,0	1120	37
Марганец . . .	1250,0	1500	250
Серебро	960,8	1300	339,2

металла и расплавленного припоя, необходимо отметить, что отсутствие общих фаз между ними считалось признаком отсутствия смачивания. Однако установлено [12], что, например, в системах Fe—Ag, Fe—Pb, W—Mn, W—Cu, W—Ag, W—Sn, в которых взаимодействующие металлы не сплавляются и не образуют химических соединений, легкоплавкие металлы указанных пар при определенных условиях смачивают

тугоплавкие и обеспечивают получение паяных соединений. Взаимодействие между ними наступает при определенном уровне термической или другой активации, позволяющей разорвать имеющиеся в поверхностном слое основного металла и припоя связи и образовать новые общие между ними связи. Необходимый перегрев для обеспечения смачивания при пайке вольфрама оловом, медью, марганцем и серебром приведен в табл. 18.

Интенсивность процесса смачивания основного металла расплавом припоя определяется характером реакции жидкости с твердым металлом. Если реакция эндотермическая, то энергия термической активации состоит из собственно активационного барьера и подводимой теплоты, необходимой для протекания реакции. В случае экзотермического взаимодействия после преодоления активационного барьера теплота реакции вызовет скачкообразное развитие процесса смачивания, что наблюдается, например, при смачивании железа оловом и свинцом в среде водорода и алюминием — в вакууме. В этих случаях после соответствующего перегрева происходит скачкообразное растекание расплавленного припоя.

При растекании капли жидкости по плоской поверхности твердого тела условия ее равновесия могут быть выражены в виде равновесия векторов сил поверхностного натяжения в точке на границе трех фаз (рис. 37). Этой границей является периметр смачивания

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

где $\sigma_{1,3}$ — поверхностное натяжение между твердым телом и газовой средой, действующее на каплю по периметру ее основания;

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

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

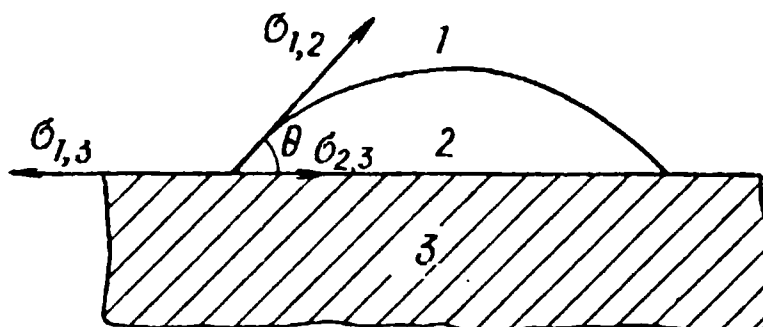
Из этого выражения следует, что

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}.$$

Косинус угла θ , характеризующий смачивающую способность жидкости, называется коэффициентом смачивания.

Рис. 37. Схема равновесия векторов сил поверхностного натяжения капли жидкости на поверхности твердого тела:

1 — газ; 2 — жидкость;
3 — твердое тело



В том случае, если $\cos \theta > 0$ или $\theta < 90^\circ$, жидкость смачивает поверхность твердого тела. Когда же $\cos \theta < 0$ или $\theta > 90^\circ$, жидкость практически не смачивает поверхность твердого тела.

Полное смачивание поверхности твердого тела происходит при $\cos \theta = 1$ или $\theta = 0^\circ$.

Согласно уравнению, смачивание поверхности основного металла расплавленным припоем зависит от его поверхностного натяжения в расплавленном состоянии. Чем оно выше, тем расплавленный припой хуже смачивает основной металл. Ниже приведены значения поверхностного натяжения (эрг/см^2) металлических расплавов вблизи точки плавления.

Металлы, входящие в состав припоев, обладают высоким поверхностным натяжением.

Алюминий	860±20	Олово	525±10
Висмут	380±10	Свинец	410±5
Железо	1210±10	Сурьма	395±20
Кадмий	550±10	Цинк	750±20
Медь	1180±40		

Однако поверхностное натяжение металлов не характеризует однозначно способность их в расплавленном состоянии течь по поверхности твердого металла. Процесс смачивания расплавленным припоем основного металла зависит от соотношения их физико-химических свойств и, в частности, от запаса свободной поверхностной энергии основного металла. Эта энергия твердого металла определяет величину возникающих при пайке сил взаимодействия с припоем и является косвенным показателем активности протекающих между ними процессов. Значения свободной энергии поверхности некоторых металлов в твердом состоянии приведены в табл. 19.

Металл	Темпера- тура, °С	Свободная поверхност- ная энергия эрг/см ²	Металл	Темпера- тура, °С	Свободная поверхност- ная энергия эрг/см ²
Железо . . .	{ 20 1400 1050 20	3959	Алюминий	20	1909
Медь		2070	Магний . . .	20	704
Вольфрам . .		1430	Цинк	20	859
		6814			

По современным взглядам, природа сил смачивания электро- магнитная [26], поэтому характер взаимодействия в контакте основ- ной металл — расплавленный припой, в конечном счете, опреде- ляется величиной и знаком электромагнитных сил поверхностей

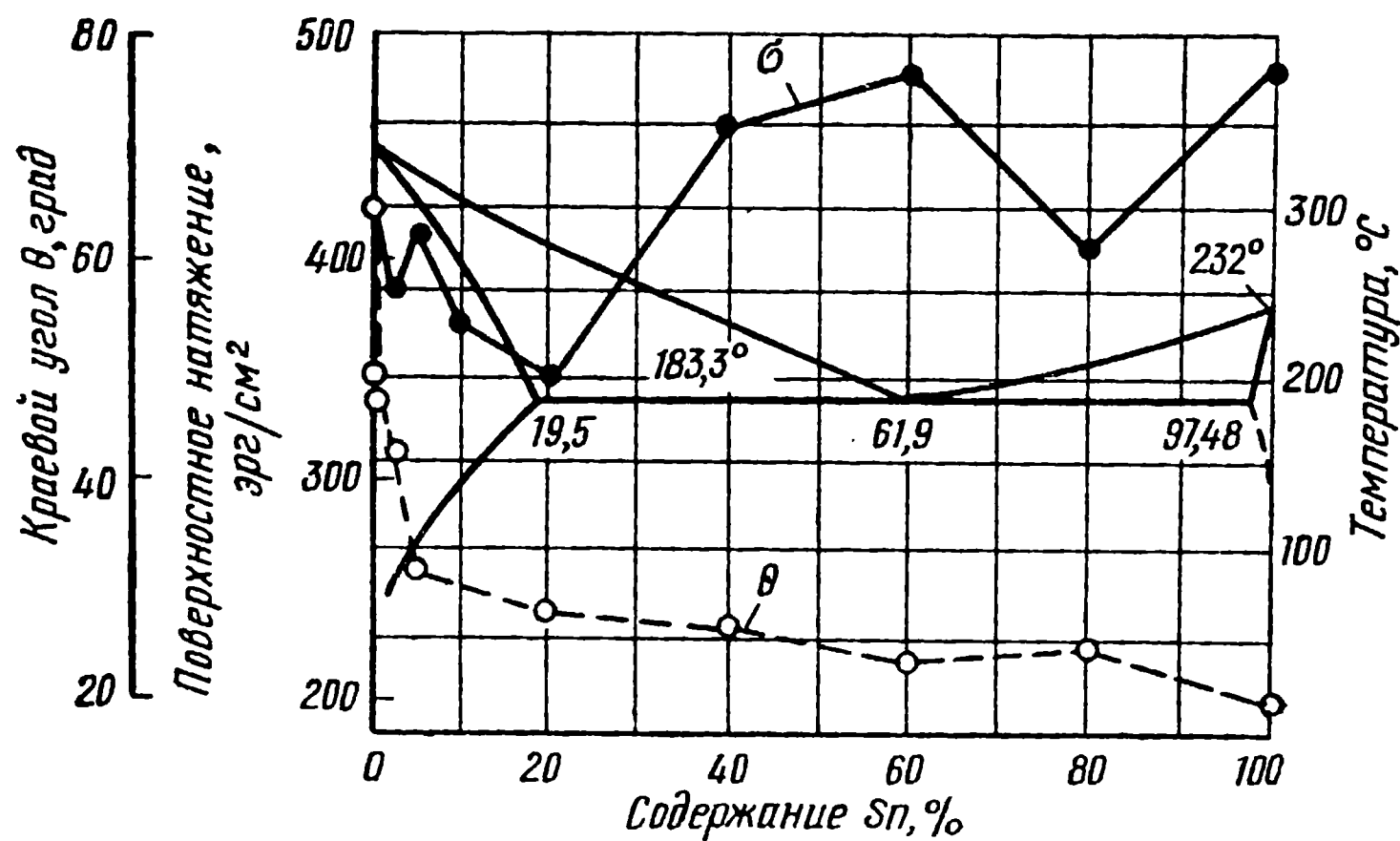


Рис. 38. Значения угла смачивания сплавов системы олово—свинец на стали ШХ15 в сопоставлении с поверхностным натяжением этих сплавов

расплавленного и твердого металлов. Однако это взаимодействие в настоящее время количественно не оценивается, поэтому только по значению поверхностного натяжения расплавленного припоя и поверхностной энергии основного металла определить характер влияния этих сил на смачивание не представляется возможным. Поэтому при анализе явлений смачивания при пайке рассматривают всю совокупность физико-химических свойств припоя и основного металла, а также условия пайки. Это тем более необходимо, так как прямой зависимости между поверхностным натяжением и смачивающей способностью припоев нет.

На рис. 38 приведены значения угла смачивания расплавленными припоями системы олово—свинец стали ШХ15 и поверхностного натяжения сплавов этой системы, из которых можно видеть, что наименьшему значению поверхностного натяжения не соответствует

наименьший угол смачивания. Основное значение в данном случае имеет фазовый состав припоя, с изменением которого меняются условия взаимодействия компонентов припоя с основным металлом. Так, при эвтектическом соотношении олова и свинца, несмотря на максимальное значение поверхностного натяжения, краевой угол смачивания имеет малое значение. Наоборот, с увеличением в сплавах содержания свинца, несмотря на более низкие значения поверхностного натяжения, краевой угол смачивания непрерывно растет.

От смачивающей способности припоев зависит способность их растекаться по поверхности паяемого металла. Растекание расплавленного припоя по поверхности основного металла определяется многими факторами. Механизм растекания связан с взаимодействием расплава припоя и его парообразной фазы с основным металлом, с поверхностной диффузией расплавленного припоя, с его капиллярным течением в поверхностном слое основного металла и т. д. При растекании все эти факторы сочетаются в зависимости от соотношения физико-химических свойств припоя и основного металла, а также условий пайки.

Наряду с характером взаимодействия в контакте основной металл—припой на растекание значительное влияние оказывают вязкость расплава припоя и жидкотекучесть. Особое значение жидкотекучесть приобретает, когда припой имеет широкий интервал кристаллизации, а пайка им происходит при температурах, лежащих ниже температуры ликвидуса. Наличие в расплаве в этом случае твердой фазы, строение выпадающих кристаллов, характер их расположения могут резко изменять жидкотекучесть припоя. Наряду с условиями и прежде всего температурой пайки вязкость припоев зависит от сил взаимодействия между компонентами расплава и от его атомной структуры. Увеличение числа сильных связей ведет к росту вязкости; слабые связи вызывают уменьшение вязкости.

Растекание расплава припоя по поверхности основного металла, как и всякой жидкости по поверхности твердого тела, определяется соотношением сил адгезии припоя к поверхности основного металла и когезии, характеризуемой силами связи между частицами припоя.

Работа адгезии определяется свободной поверхностной энергией, освобождающейся при смачивании твердого тела жидкостью: $A_a = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}$.

Полное растекание припоя по поверхности основного металла происходит при краевом угле $\theta = 0$, при этом из условия равновесия капли жидкости на поверхности твердого тела имеем $\sigma_{1,3} = \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2}$.

Подставив $\sigma_{1,3}$ в уравнение работы сил адгезии, получим $A_a = 2\sigma_{1,2}$.

Введя в первоначальное равенство значение $\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}$, из условия равновесия капли жидкости на поверхности твердого тела получим работу адгезии в случае, когда краевой угол смачивания не равен нулю: $A_a = \sigma_{1,2} (1 + \cos \theta)$.

Когезия частиц припоя оценивается работой, необходимой для разрыва жидкости и образования двух новых поверхностей: $A_k = 2\sigma_{1,2}$.

Растекание капли расплава припоя по основному металлу будет происходить, если работа адгезии к поверхности металла будет равна или больше работы когезии частиц припоя. Разность между ними называют коэффициентом растекания:

$$K = A_a - A_k = \sigma_{1,2}(1 + \cos \theta) - 2\sigma_{1,2} = \sigma_{1,2}(\cos \theta - 1),$$

где K — коэффициент растекания;

A_a — работа адгезии;

A_k — работа когезии.

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

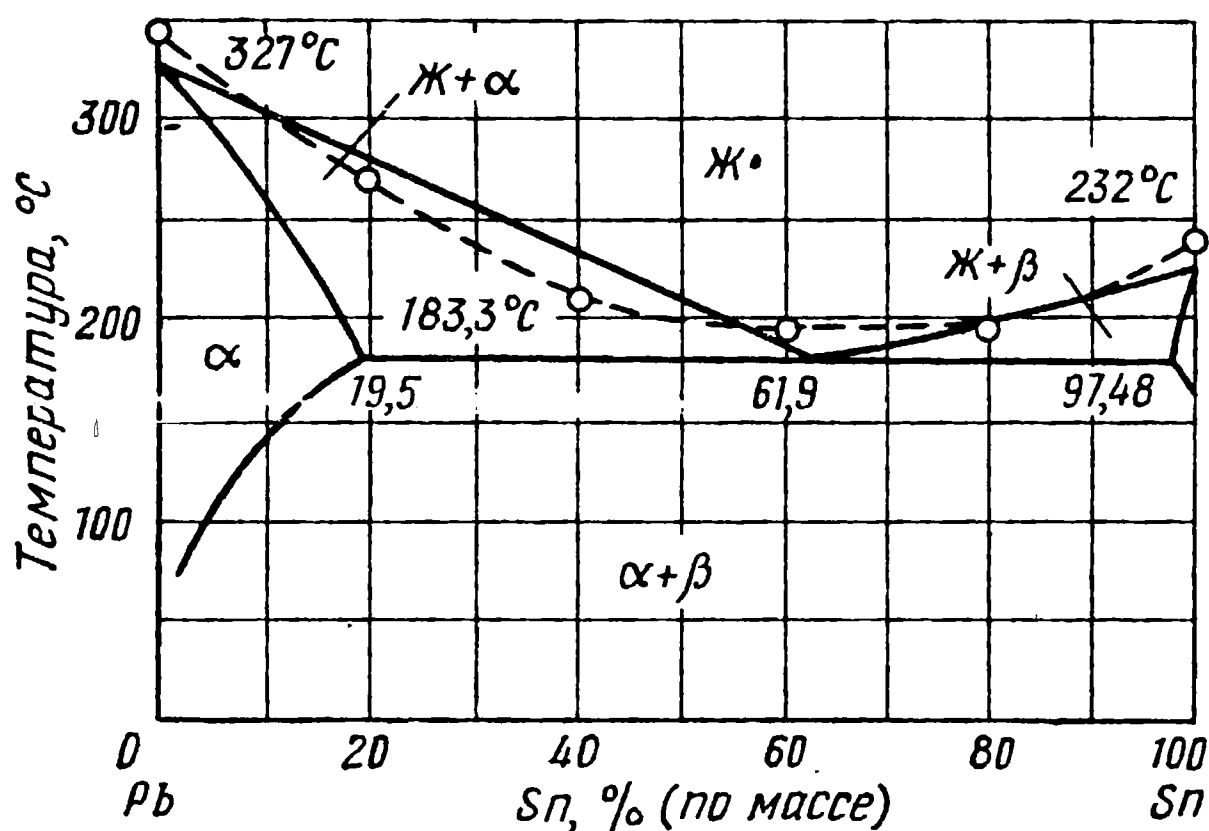


Рис. 39. Зависимость минимальной температуры растекания припоев системы свинец—олово от состава

Минимальная температура, при которой припой смачивает паяемую поверхность твердого металла и растекается по ней, для чистых металлов и эвтектических сплавов соответствует температуре плавления или превышает ее на несколько градусов. Для припоев сложного состава эта температура находится в интервале между солидусом и ликвидусом. Такая закономерность хорошо иллюстрируется на рис. 39, на котором пунктирной линией нанесены минимальные температуры растекания припоев системы сплавов Pb—Sn. Минимальная температура поверхности основного металла, необходимая для обеспечения растекания припоя, лежит ниже температуры пайки. Приблизительно ее можно принять равной 0,8 от температуры начала плавления припоя [27].

Таким образом, коэффициент растекания определяется поверхностным натяжением припоя и краевым углом смачивания основного металла. Зависимость между растеканием припоя по основному металлу и его поверхностным натяжением имеет сложный характер. Так, для сплавов свинец—олово в интервале от 50 до 70% Sn поверх-

ностное натяжение при температуре плавления постепенно уменьшается по линейному закону. Растекаемость же сплавов свинец—олово при флюсовании 50%-ным раствором хлористого цинка по стали приблизительно при той же температуре имеет максимум при эвтектическом, а по меди при доэвтектическом содержании олова как при малом, так и при значительном перегреве в процессе пайки.

С повышением температуры нагрева для чистого олова площадь растекания приблизительно остается постоянной, однако для сплавов свинец—олово эвтектического состава растекаемость растет, если перегрев не превышает $40\text{—}50^\circ\text{C}$. Дальнейший перегрев сплава ведет к снижению растекаемости, что связано с усилением химического взаимодействия между припоем, флюсом, основным металлом и окружающей газовой средой.

На растекаемость припоев большое влияние оказывает их компонентный состав. Например, легирование припоев системы медь—золото палладием обеспечивает полное смачивание при меньшем перегреве. Аналогичное влияние оказывает легирование палладием серебряных припоев (рис. 40).

Растекание припоя по основному металлу при пайке в отдельных случаях происходит в два этапа. Первый соответствует быстрому растеканию под действием сил поверхностного натяжения, второй характеризуется медленным растеканием. Такое вторичное растекание имеет место, например, при пайке меди припоями, содержащими от 30 до 70% Sn, т. е. наиболее распространенными оловянно-свинцовыми припоями ПОС30, ПОС40, ПОС61. Иногда во втором этапе площадь, образованная растекшимся припоем, может несколько уменьшаться или вторичное растекание совершенно прекращается. Такое обстоятельство связано с физико-химическими свойствами взаимодействующей пары и температурой. Так, припой ПОС40 при температуре 250°C имеет характерное вторичное растекание, при 300°C оно полностью отсутствует. При пайке в вакууме растекание припоя зависит от степени разрежения.

Согласно существующим взглядам, удаление окисной пленки с поверхности основного металла и припоя в вакууме находится в прямой зависимости от степени вакуумирования. При постоянной температуре равновесие между металлом и его окислом определяется парциальным давлением кислорода. Если парциальное давление кислорода в зоне пайки меньше равновесного при данной температуре парциального давления кислорода, образующегося при разложении окисла, то последний будет удаляться с поверхности основного металла и припоя. Таким образом, с повышением степени вакуумирования при постоянной температуре парциальное давление кислорода

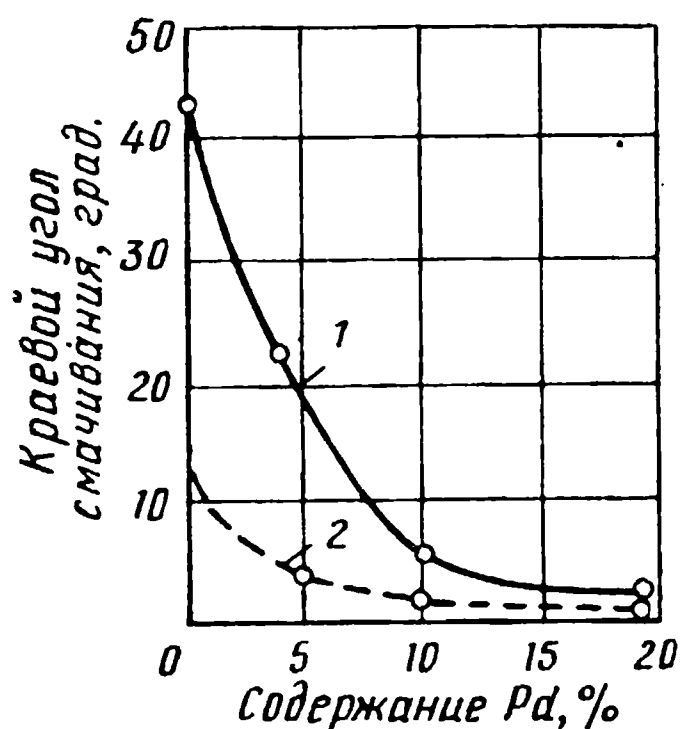


Рис. 40. Зависимость краевого угла смачивания от содержания палладия в припое:

1 — в водороде; 2 — в аргоне

в камере пайки будет снижаться, что должно способствовать диссоциации окислов и улучшению условий смачивания основного металла расплавленным припоем. Результаты экспериментов по определению влияния степени вакуумирования на начало и площадь растекания свидетельствуют о другом.

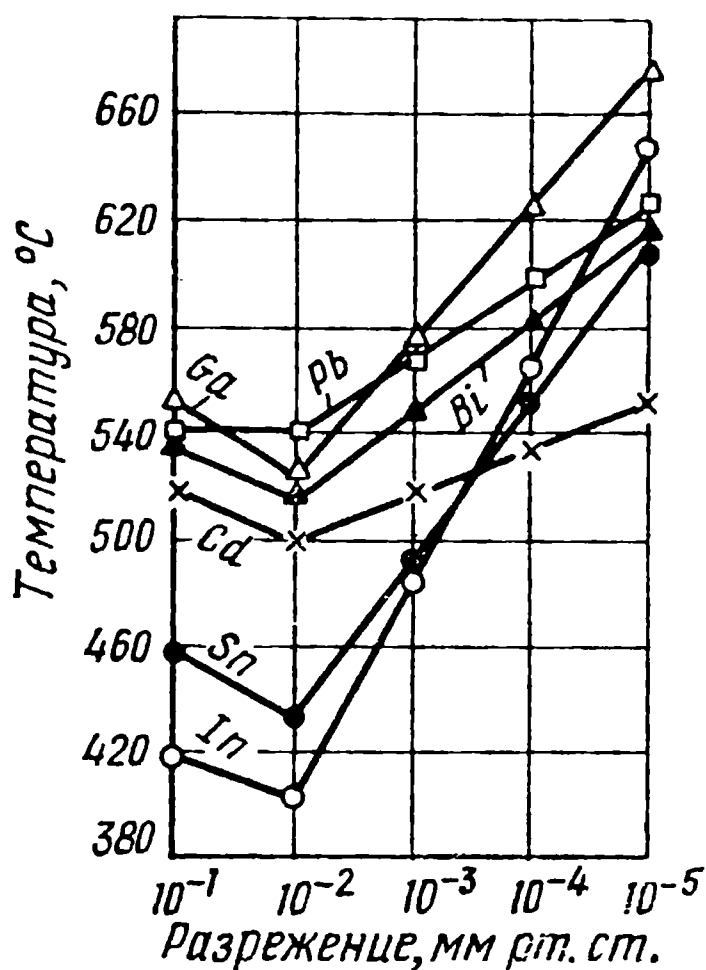


Рис. 41. Зависимость температуры начала растекания припоев по меди от разрежения в камере пайки

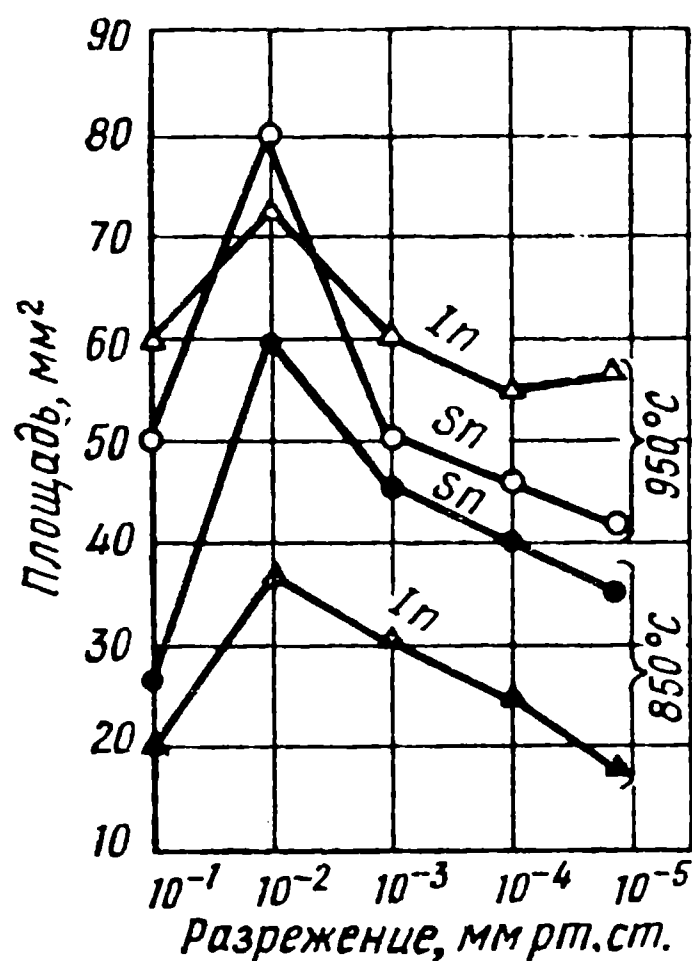


Рис. 42. Площадь растекания припоев по меди в зависимости от разрежения в камере пайки

Зависимость температуры начала растекания галлия, индия, олова, кадмия, свинца и висмута по меди от степени вакуумирования приведена на рис. 41, из которого видно, что наименьшая температура растекания для всех металлов, применявшихся в качестве припоев, соответствует разрежению $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. При снижении и повышении степени вакуумирования температура начала растекания возрастает.

Площадь растекания припоев по меди при разрежении $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. (рис. 42) также максимальная. При растекании припоев по железу и никелю наблюдается аналогичная закономерность. Одновременно отмечается, что разрежение в камере пайки, соответствующее наибольшей площади растекания припоя, обеспечивает наилучшие условия удаления окисной пленки с основного металла.

На рис. 43 приведена микроструктура зоны спая в случае пайки предварительно окисленного железа Армко медью при разрежении $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Как видно, окисная пленка отделяется от поверхности основного металла в виде сплошного слоя. Если же пайку производить в тех же условиях, но при разрежении $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., то окисная пленка диспергирует.

Применение в качестве основного металла серебра, окислы которого разлагаются в атмосфере воздуха уже при 200°C , показало,

что площадь растекания припоев по нему не зависит от разрежений в камере пайки (рис. 44).

При вакуумировании камеры пайки по аргону, т. е. при заполнении ее после вакуумирования аргоном с последующей откачкой, растекание припоев не зависит от разрежения (рис. 45).



Рис. 43. Граница основной металл — зона сплавления при пайке предварительно окисленного железа Армко медью в среде водорода, $\times 600$

Минимальная температура смачивания и наибольшая площадь растекания припоев зависят от остаточного кислорода, который определяет характер взаимодействия с окисной пленкой и расплавом припоя [28]. Интересно заметить, что наибольшей площади растекания припоев по основному металлу соответствует и несколько более высокая прочность паяных соединений.

На процесс смачивания и растекания припоя существенно влияют технологические факторы, такие как способ удаления окисной пленки в процессе пайки, характер предшествующей механической обработки, режим пайки и др. Так, при флюсовой пайке наряду с удалением окисной пленки с паемого металла и припоя флюсы действуют как поверхностно активные вещества, снижая поверхностное натяжение расплавленных припоев, что способствует улучшению смачивания паемой поверхности. При применении активных или нейтральных газовых сред наряду с удалением окисной пленки может происходить взаимодействие примесей, содержащихся

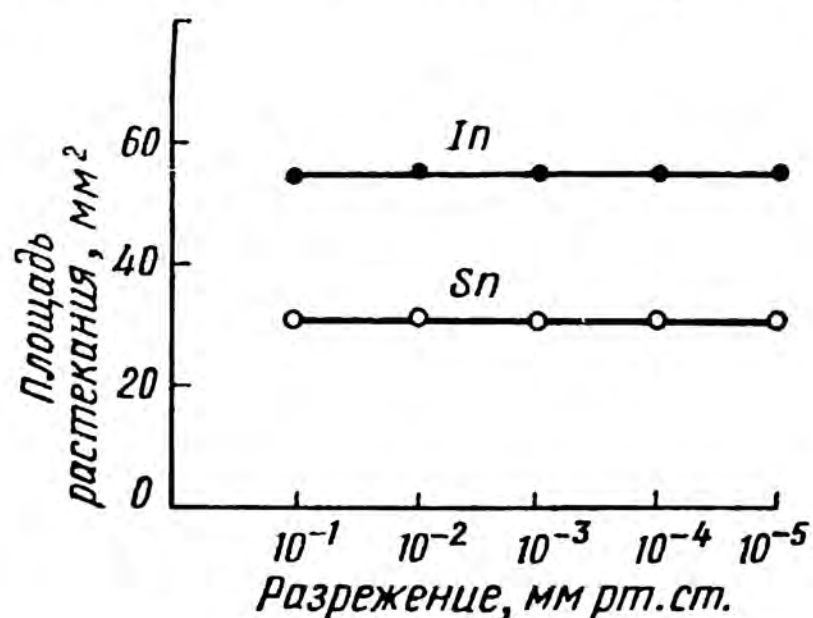


Рис. 44. Зависимость площади растекания припоев по серебру от степени вакуумирования в камере пайки при температуре 500°C

в газовой среде, с основным металлом и припоем. При наличии в газовой среде кислорода, углерода, серы, а также других элементов они взаимодействуют с металлами, образуя на их поверхности соединения с неметаллической связью, препятствующие взаимодействию расплавленного припоя с основным металлом, что ухудшает смачивание.

На процессы смачивания значительно влияют вид механической обработки основного металла, способ очистки перед пайкой, режим пайки и др. Так, полированные с применением паст поверхности плохо смачиваются расплавленными припоями, что объясняется загрязнением поверхности остатками пасты. После электрохимиче-

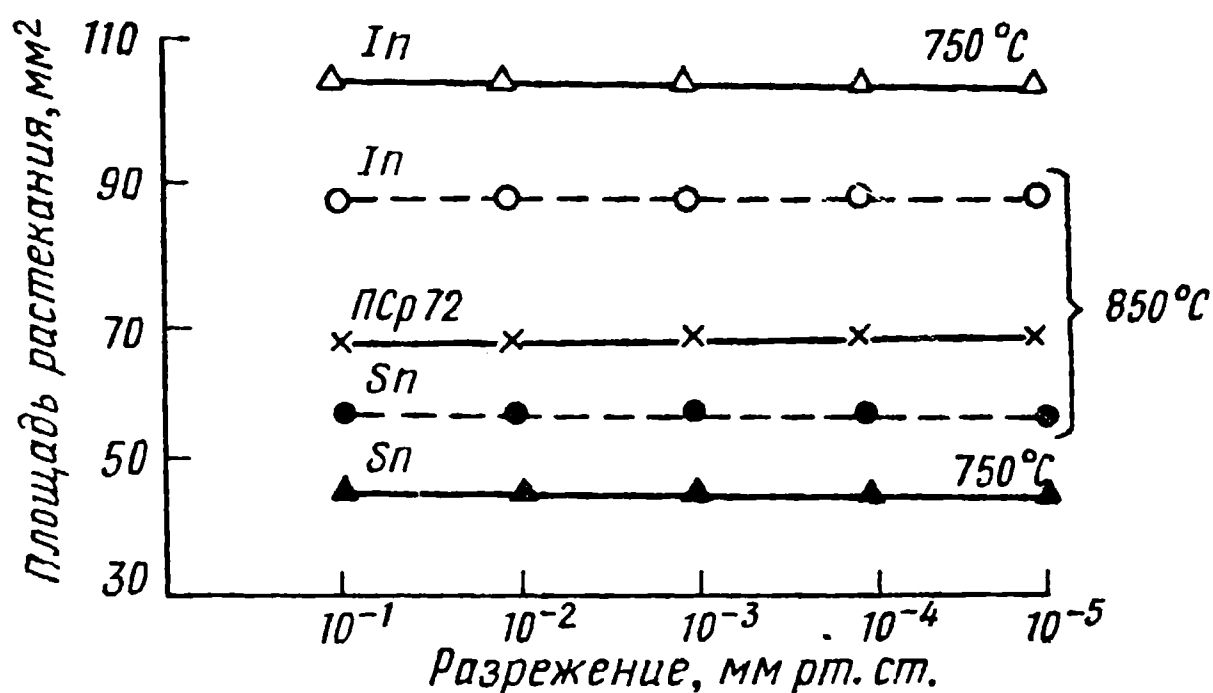


Рис. 45. Площадь растекания припоев по меди при вакуумировании камеры пайки «по аргону» в зависимости от степени разрежения

ской полировки смачивание поверхности металлов припоями протекает легко. Детали, обдутые песком, смачиваются припоями удовлетворительно, но оставшиеся на поверхности частицы кремнезема могут привести к некоторому снижению прочности паяных соединений. Дробеструйная обработка не ухудшает условий смачивания и растекания припоев. Шлифованные поверхности хорошо смачиваются расплавленным припоем. Даже небольшие количества загрязнений и окислов резко изменяют свободную поверхностную энергию на границе твердый металл—припой и ухудшают смачиваемость, поэтому тщательная очистка поверхности перед пайкой имеет очень большое значение.

При пайке необходим равномерный нагрев соединяемых металлов до определенной температуры. Если отдельные участки соединяемых поверхностей металла окажутся нагретыми ниже температуры пайки, то не будет обеспечено равномерное смачивание паяемой поверхности расплавленным припоем.

Капиллярное течение припоев. Растекание жидкостей и смачивание ими поверхности твердого тела, сопровождающееся увеличением поверхности, происходит в результате некомпенсированности энергии поверхностей твердого и жидкого металлов. При этом совершается работа, затрачиваемая на преодоление сил

поверхностного натяжения. Эта работа совершается разностью давлений между вогнутой и выпуклой сторонами поверхности смачивающей жидкости и может быть определена, исходя из изменения свободной энергии при перемещении элемента этой поверхности. Рассмотрим условия равновесия такого криволинейного элемента, изображенного на рис. 46. Пусть нормали в точках a и b элемента рассматриваемой поверхности пересекаются в точке O_1 , образуя угол φ_1 , а нормали в точках b и c пересекаются в точке O_2 , образуя угол φ_2 . Тогда площадь прямоугольного элемента $abcd$ будет равна произведению сторон $S = ab \cdot bc$. Под действием разности давлений между вогнутой и выпуклой сторонами поверхности элемента точки a , b , c и d переместятся по нормальям на расстояние δ_n соответственно в положение a' , b' , c' , d' , образуя элемент с площадью S_1 . Площадь нового элемента можно выразить через углы φ_1 и φ_2 :

$$S_1 = \left(ab + \delta_n \frac{ab}{R_1} \right) \left(bc + \delta_n \frac{bc}{R_2} \right);$$

$$\varphi_1 = \frac{ab}{R_1} \text{ рад}; \varphi_2 = \frac{bc}{R_2} \text{ рад}.$$

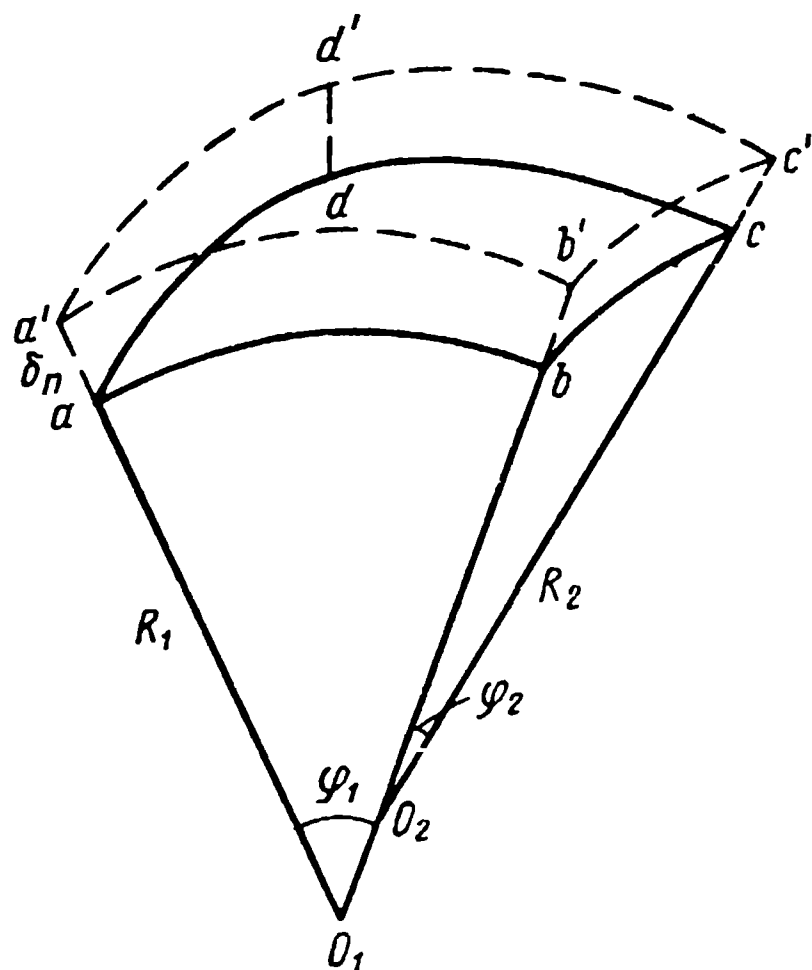


Рис. 46. Элемент криволинейной поверхности жидкости

Пренебрегая малыми величинами второго порядка, получим

$$S_1 = ab \cdot bc \left(1 + \frac{\delta_n}{R_1} + \frac{\delta_n}{R_2} \right).$$

Приращение поверхности рассматриваемого элемента жидкости при перемещении составит

$$\Delta S = S_1 - S = ab \cdot bc \cdot \delta_n \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Тогда работа преодоления сил поверхностного натяжения будет равна

$$A = \sigma_{1,2} \Delta S = \sigma_{1,2} ab \cdot bc \delta_n \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

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

С другой стороны, эта работа может быть выражена через разность давлений между вогнутой и выпуклой сторонами поверхности рассматриваемого элемента:

$$A = (p_1 - p_2) ab \cdot bc \cdot \delta_n,$$

где p_1 — давление с вогнутой стороны;
 p_2 — давление с выпуклой стороны.

Никакие другие силы, кроме сил молекулярного взаимодействия, в увеличении поверхности элемента жидкости не участвуют, поэтому оба выражения работы преодоления сил поверхностного натяжения можно приравнять:

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

откуда

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

Данное выражение является первым уравнением капиллярности (формула Лапласа). Из него следует, что поверхностный слой жидкости, имеющий кривизну, оказывает добавочное давление по сравне-

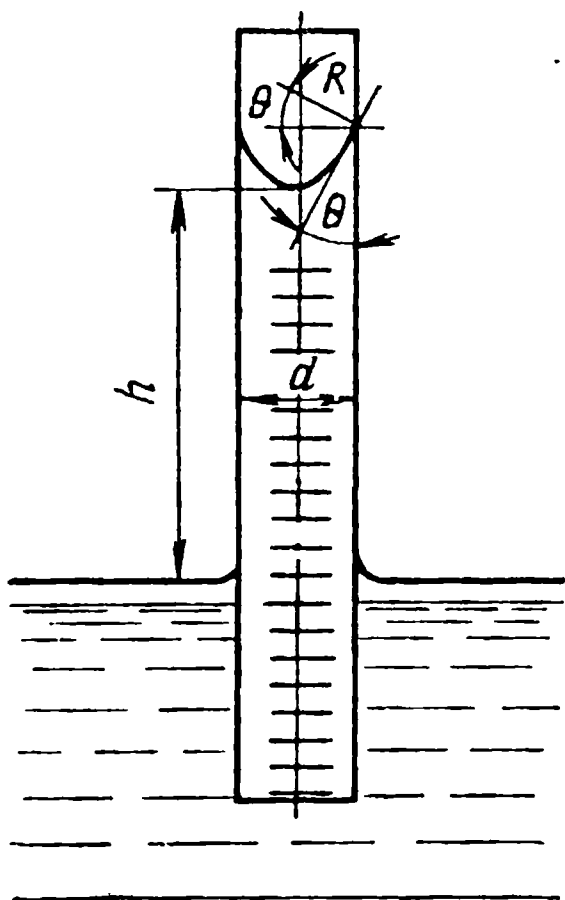


Рис. 47. Схема поднятия жидкости по капилляру

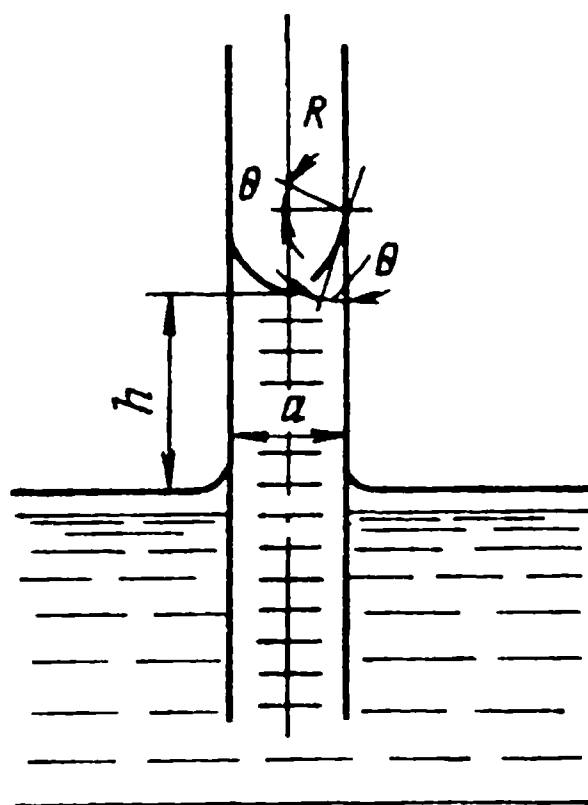


Рис. 48. Схема поднятия жидкости между параллельными пластинками

нию с тем, которое он испытывает при наличии плоской поверхности. Этим добавочным давлением главным образом обусловлены все капиллярные явления не взаимодействующих с твердыми материалами жидкостей.

Избыточное давление $p_1 - p_2$ может быть выражено через высоту столба жидкости над заданным уровнем и ее плотность. Например, если жидкость течет по капилляру диаметром d (рис. 47), то высота ее поднятия над заданным уровнем поверхности ванны, согласно первому уравнению капиллярности, будет определяться разностью давлений $p_1 - p_2$ между вогнутой и выпуклой сторонами поверхности мениска. При малом диаметре капилляра свободная поверхность жидкости будет иметь форму сферы, тогда

$$R = \frac{d/2}{\cos \theta}.$$

Угол θ зависит от величины поверхностного натяжения и называется краевым углом или углом смачивания.

Подставив полученное значение радиуса мениска в первое уравнение капиллярности, получим

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{\cos \theta}{d/2} + \frac{\cos \theta}{d/2} \right) = \frac{4\sigma_{1,2} \cos \theta}{d}.$$

Но разность давлений $p_1 - p_2$ будет уравновешиваться столбом жидкости высотой h , тогда

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

или

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

где ρ — плотность жидкости;

g — ускорение силы тяжести.

Следовательно, высота поднятия жидкости в капилляре прямо пропорциональна ее поверхностному натяжению и смачивающей способности и обратно пропорциональна диаметру капилляра и плотности.

В случае капиллярного течения жидкости между двумя параллельными пластинками высоту подъема определяют из тех же соотношений (рис. 48). Если расстояние между пластинами a мало, а ширина достаточно велика, то поверхность жидкости в зазоре примет форму цилиндра, для которого

$$R_1 = \frac{a/2}{\cos \theta}, \text{ а } R_2 = \infty.$$

Тогда высоту подъема жидкости, согласно первому уравнению капиллярности, можно определить из соотношения

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left(\frac{\cos \theta}{a/2} + \frac{1}{\infty} \right),$$

или после преобразования

$$p_1 - p_2 = \frac{2\sigma_{1,2} \cos \theta}{a}.$$

Разность давлений $p_1 - p_2$, как и в случае капилляра круглого сечения, будет уравновешиваться столбом жидкости высотой h , тогда

$$h\rho g = \frac{2\sigma_{1,2} \cos \theta}{a}$$

или

$$h = \frac{2\sigma_{1,2} \cos \theta}{a\rho g}.$$

Таким образом, высота капиллярного поднятия жидкости в зазоре между двумя параллельными пластинками в 2 раза меньше, чем в капилляре круглого сечения.

Течение расплавленных припоев в реальных условиях по сравнению с идеальными имеет следующие особенности:

1. В процессе заполнения зазора припоем происходит взаимодействие его с основным металлом и окружающей средой, что приводит к увеличению вязкости расплава и, следовательно, к нарушению исходных условий течения.

2. Расплав припоя сложного состава при течении в зазоре избирательно взаимодействует с основным металлом, что вызывает перемещение частиц в направлении, перпендикулярном потоку.

Компоненты основного металла также избирательно взаимодействуют с расплавленным припоем.

3. В случае термического или концентрационного переохлаждения, а также взаимодействия с основным металлом происходит образование в расплаве и в зоне спаев отдельных кристаллов, что

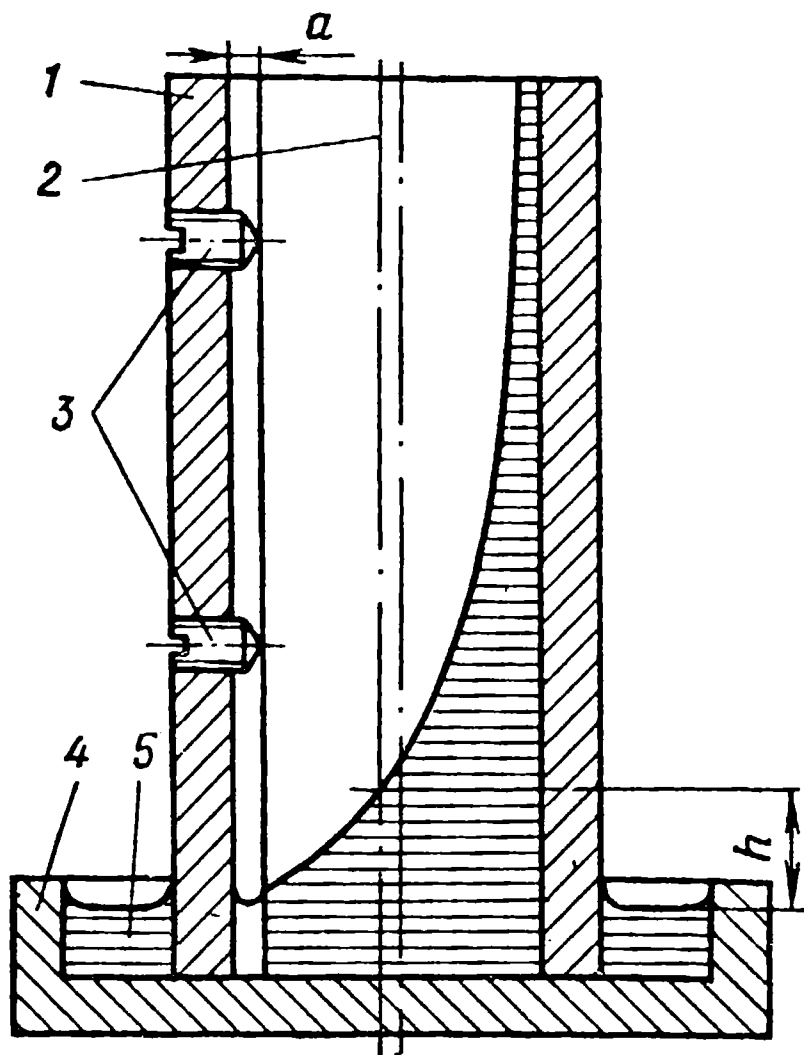


Рис. 49. Приспособление для исследования капиллярного течения расплавленных припоев:

1 — втулка; 2 — стержень; 3 — винты;
4 — чаша для расплава припоя; 5 — расплав припоя

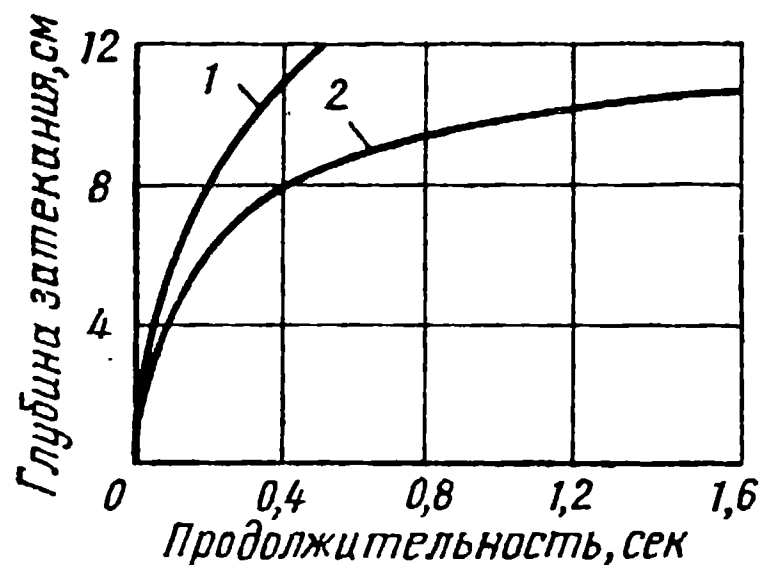


Рис. 50. Зависимость глубины затекания при горизонтальном и вертикальном расположении швов

нарушает общую закономерность течения припоя в зазоре.

Кроме этого, течение расплавленного припоя в зазоре зависит от характера предшествующей механической обработки, состояния поверхности основного металла, величины и равномерности зазора, способа удаления окисной пленки и т. д. Так как влияние всех этих факторов теоретически учесть трудно, то на практике высоту поднятия припоя h в зазоре определяют на основе экспериментов в виде зависимости $h = f(a)$ (где a — величина зазора).

Поскольку такая методика определения капиллярных свойств припоев трудоемка, в каждом отдельном случае требуется проводить эксперименты, что связано с большими неудобствами при конструировании паяных изделий, то была получена зависимость, экспериментально учитывающая все указанные выше факторы (рис. 49):

$$a_{м. д} = \frac{a}{2} \left[1 - \cos \frac{57,3 (\pi r - b h^n)}{r} \right],$$

где $a_{м, д}$ — Максимально допустимый зазор;
 a — максимальный зазор в приспособлении;
 r — радиус стержня;
 h — высота поднятия припоя, соответствующая максимально допустимому зазору;

b и n — коэффициенты, определяемые экспериментально.

Значения коэффициентов b и n , учитывающих форму кривой контура несмачивания стержня расплавом припоя для пайки стали Ст.3 при $a = 1$ мм и $r = 20$ мм, приведены в табл. 20.

На течение расплавленного припоя в зазоре наряду с величиной зазора большое влияние оказывает расположение изделия при пайке. При одном и том же зазоре при горизонтальном расположении шва обеспечивается затекание припоя на большую глубину. На рис. 50 приведена зависимость глубины затекания медного припоя между стальными пластинками, собранными с зазором 0,25 мм, в случае горизонтального 1 и вертикального 2 расположения швов [22]. Горизонтальный шов заполняется припоем на значительно большую глубину.

Т а б л и ц а 20

Припой	Температура пайки, °С	b	n
Медь МБ	1130	7,36	0,27
ВЗМИ-49	1140	5,07	0,37
Латунь Л62	1000	7,13	0,29

§ 2. Процессы диффузии и растворения при пайке

Диффузией называется процесс перемещения частиц в направлении убывания их концентрации. В результате диффузии происходит выравнивание состава вещества и равномерное заполнение им всего объема. Процессы диффузии свойственны газообразным, жидким и твердым веществам. Диффундировать могут как разнородные вещества, так и частицы однородного вещества в пределах своего объема.

Существуют два вида диффузии: самодиффузия и гетеродиффузия, или химическая диффузия. Самодиффузией называют тепловое перемещение атомов в чистых металлах, а также атомов металла-растворителя в твердых растворах. В некоторых случаях к самодиффузии относят перемещение атомов любого компонента системы при отсутствии градиента концентрации. Гетеродиффузией или химической диффузией называют перемещение в веществе чужеродных растворенных атомов при наличии градиента концентрации. Если гетеродиффузия связана с образованием новых фаз, то такая диффузия называется реакционной.

Диффузия в твердых веществах протекает очень медленно. Если сложить попарно куски разнородных металлов, то даже при условии хорошего контакта и приложения внешнего давления следы заметной диффузии при комнатной температуре наблюдаются через месяцы и даже годы. Однако с повышением температуры процессы диффузии заметно усиливаются. При высокотемпературной пайке расплавленный припой может находиться в контакте с основным металлом от

нескольких секунд до нескольких часов. За это время диффузионные процессы получают различное развитие. Так, при пайке меди серебряным припоем ПСр45 при выдержке 10—20 сек ширина диффузионной зоны составляет 1,5—2 мкм.

Механизм диффузии в металлах состоит в том, что при определенных условиях атомы или ионы смещаются из своих положений в узлах кристаллической решетки и могут перемещаться по всему объему. В этом разупорядоченном состоянии они приобретают избыточный пространственный заряд по сравнению с упорядочен-

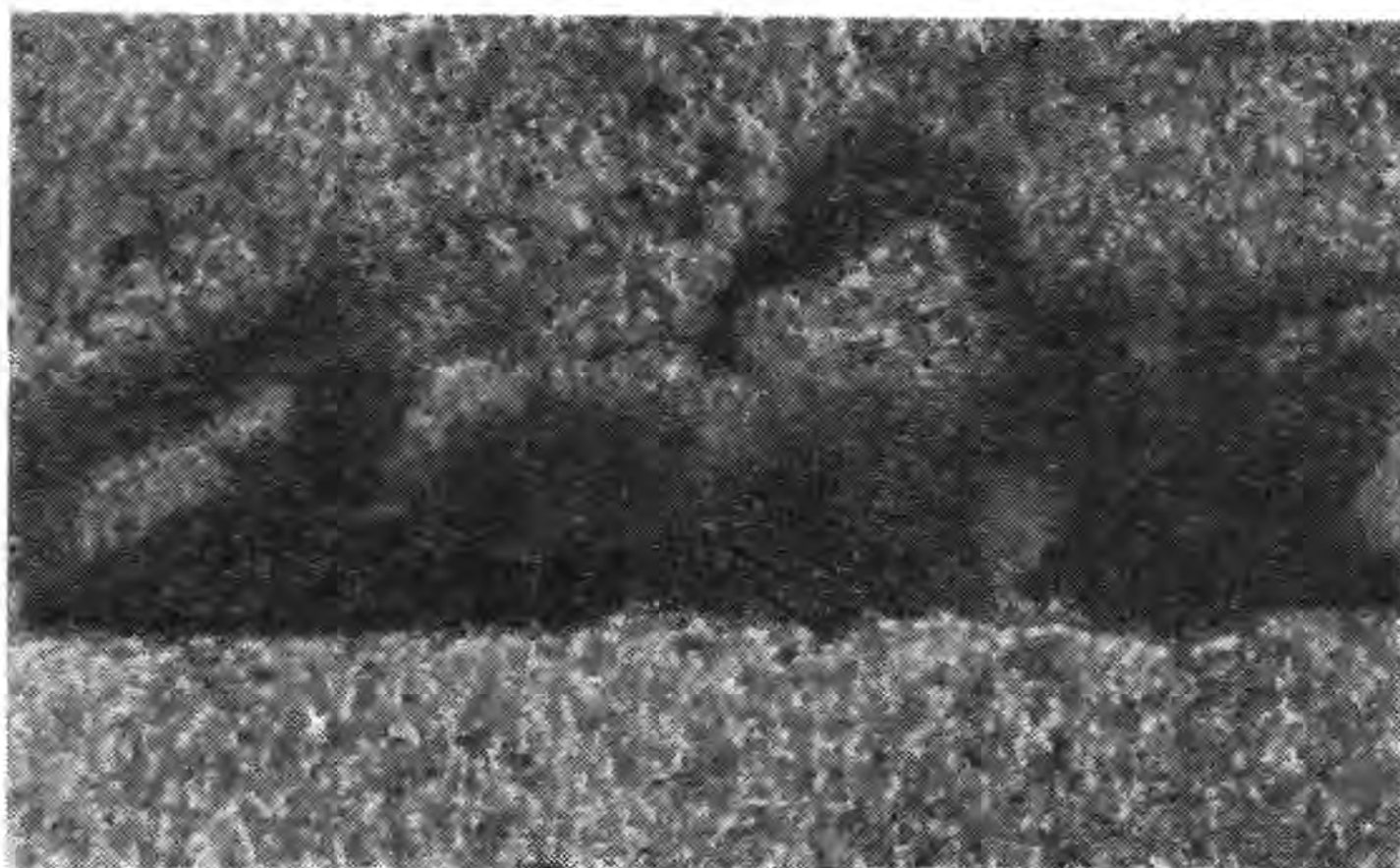


Рис. 51. Микроструктура шва при пайке вольфрама марганцем в среде водорода. Температура пайки 1500°C , выдержка 1 мин, $\times 1150$

ной системой. В результате возникают силы взаимодействия разупорядоченных атомов или ионов с упорядоченной решеткой, под действием которых они и перемещаются в металле. При перемещении атомы или ионы могут двигаться путем заполнения вакансий, через междоузлия, а также путем обмена местами. В настоящее время принято считать, что диффузия через вакансии имеет преобладающее значение для целого ряда технически важных металлов, в частности таких, как железо, медь, никель, вольфрам, цинк, олово. Механизм диффузии через междоузлия также имеет большое значение в металлах и сплавах [30].

В твердых металлах диффузия может происходить по поверхности (поверхностная диффузия), по границам зерен (границная диффузия) и в объеме отдельных зерен (объемная диффузия). Ввиду разного энергетического состояния металла в этих неодинаковых условиях диффузия будет иметь также различное значение. Диффузия по поверхности и границам зерен преобладает в тех случаях, когда растворимость припоя в основном металле мала.

На рис. 51 приведена микроструктура шва при пайке вольфрама марганцем, которые обладают ничтожно малой растворимостью (не сплавляются). Как видно из микроструктуры, отдельные зерна

вольфрама в результате диффузии марганца и ослабления связи по границам зерен отрываются и переходят в расплав припоя. Следует иметь в виду, что наряду с диффузией расплава по границам зерен на разрушение основного металла, контактирующего с припоем, значительное влияние оказывает адсорбционное понижение прочности и диспергирование вольфрама.

При значительной растворимости припоя в основном металле диффузия по границам зерен становится малозаметной. Следует иметь в виду, что одновременно с протеканием диффузии по границам зерен происходит диффузия и в объеме зерна, и только при достаточно низ-

ких температурах считается, что эти процессы протекают обособленно. Схема диффузии по поверхности, границам и в объеме зерен представлена на рис. 52. Диффузия по границам зерен в некоторых случаях протекает одновременно с растворением диффу-

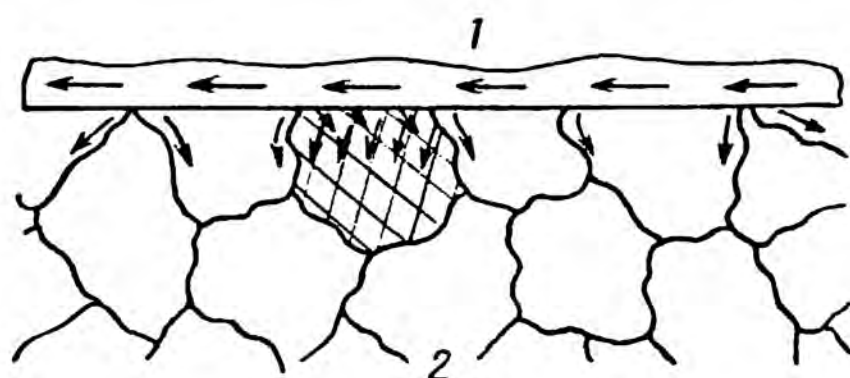


Рис. 52. Схема диффузии припоя в основном металле:

1 — припой; 2 — основной металл

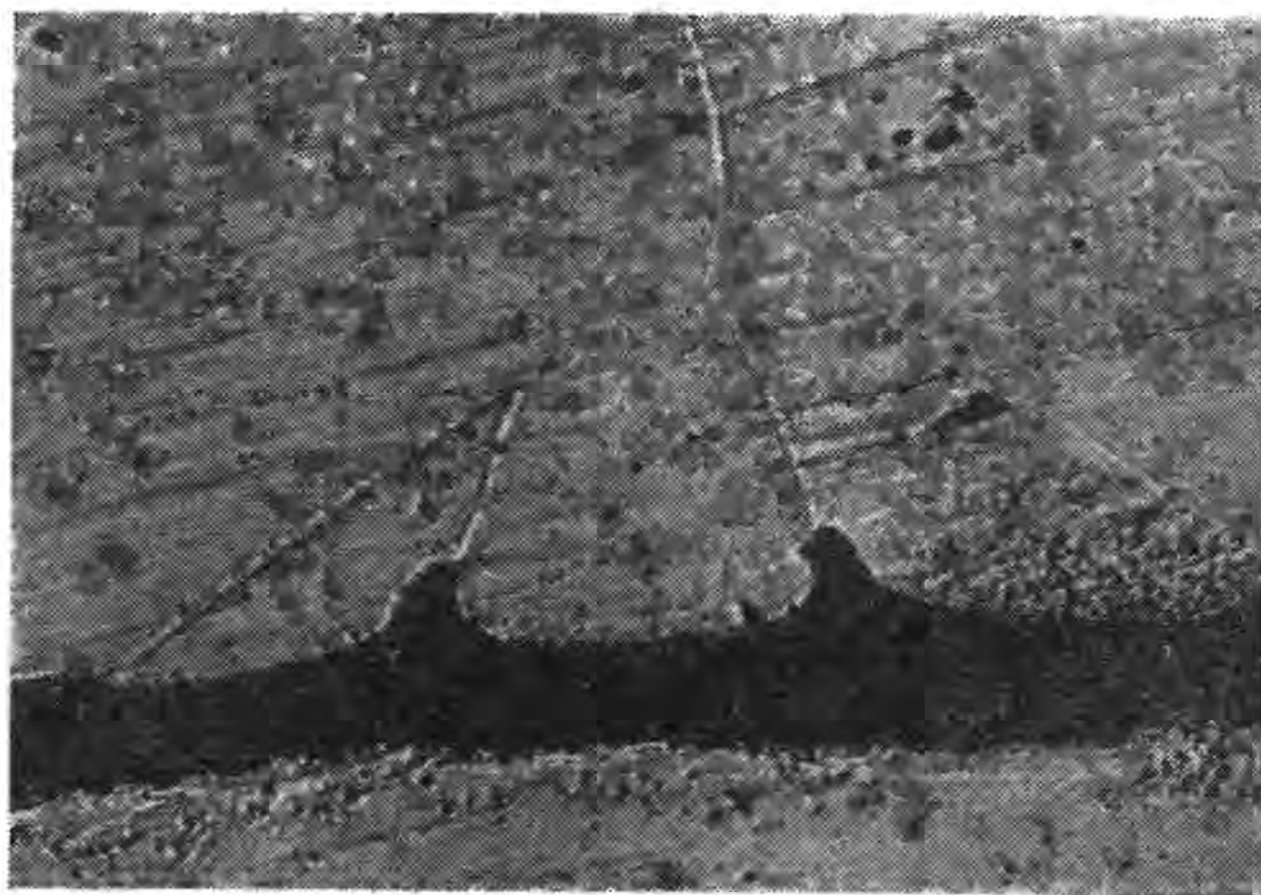


Рис. 53. Микроструктура шва при пайке никеля церием в среде водорода при температуре 1220°C , выдержка 1 мин, $\times 400$

зионной зоны, приобретая характер миграции расплавленного припоя в основной металл (рис. 53). Значительное проникновение припоя по границам зерен отрицательно сказывается на прочности паяных соединений.

При взаимодействии твердой и жидкой фаз в условиях нагрева до высоких температур и удаления с основного металла и припоя окисных пленок одновременно с диффузией атомов припоя происходит растворение твердого металла в жидком и проявляется адсорбционное понижение прочности, приводящее при определенных зна-

чений к диспергированию. Выделить эти процессы из общей совокупности явлений, протекающих на межфазной границе, не представляется возможным, однако в зависимости от природы взаимодействующих металлов и режима пайки те или иные процессы являются преобладающими. Если основной металл и припой обладают ограниченной или непрерывной растворимостью в твердом состоянии, то взаимодействие на границе твердой и жидкой фаз можно рассматривать как растворно-диффузионный процесс, кинетика которого складывается из нескольких стадий. В результате смачивания основного металла расплавом припоя между ними возникает физический

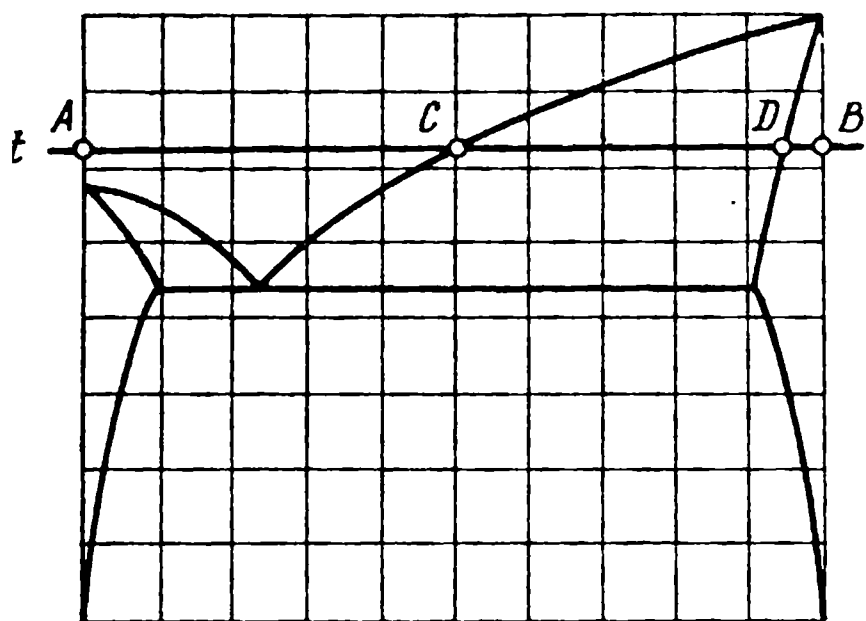


Рис. 54. Схема диаграммы состояния металлов, образующих ограниченные твердые растворы

контакт, что является необходимым условием дальнейшего развития процессов взаимодействия. Одновременно со смачиванием происходит массоперенос основного металла в расплавленный припой, в результате чего состав его изменяется, пока не достигнет равновесной концентрации (рис. 54), соответствующей пересечению изотермы температуры пайки с линией ликвидуса (точка С).

В процессе растворения одновременно может идти диффузия из жидкости в твердую фазу, но поскольку скорость растворения

твердого металла в жидком значительно выше, чем диффузия в твердой фазе, то диффузионный слой на поверхности основного металла не образуется¹. С приближением состава зоны сплавления к равновесной точке С скорость растворения замедляется, значение диффузии из жидкой фазы в твердую в этом случае повышается. Поэтому начинает образовываться диффузионный слой при наиболее активной диффузии по границам зерен. Если выдержка при температуре пайки достаточна для достижения в шве равновесной концентрации жидкой и твердой фаз, то жидкая компонента шва будет иметь состав, соответствующий пересечению изотермы с ликвидусом, а граница основного металла — зона сплавления — с солидусом диаграммы состояния. Если нагрев при пайке будет прекращен до момента достижения в шве равновесной концентрации жидкой фазы, то средний состав зоны сплавления не будет соответствовать точке С.

Необходимо отметить, что растворно-диффузионные процессы при высокотемпературной пайке в отдельных случаях протекают с очень высокими скоростями. Как можно видеть на рис. 55, содержание серебра в центральной части зоны сплавления при пайке серебра эвтектикой серебро—медь без выдержки превышает равновесную концентрацию в жидкой фазе даже без учета того, что наиболее бога-

¹ При образовании контактно-реакционного спая первой стадией формирования шва является диффузия в твердой фазе.

тый серебром твердый раствор при кристаллизации выделялся на поверхности основного металла (согласно диаграмме состояния, при 800°C содержание серебра в центральной части зоны сплавления должно составлять $\sim 77\%$).

После достижения равновесного состава в шве образуется двухфазная область, в которой концентрация жидкой фазы постоянно отвечает точке C . Концентрация твердой фазы на границе фаз достигает равновесной, когда происходит насыщение припоем диффузионной зоны или начинается изотермическая кристаллизация выделяющегося из расплава зоны сплавления твердого раствора, по составу соответствующего точке D .

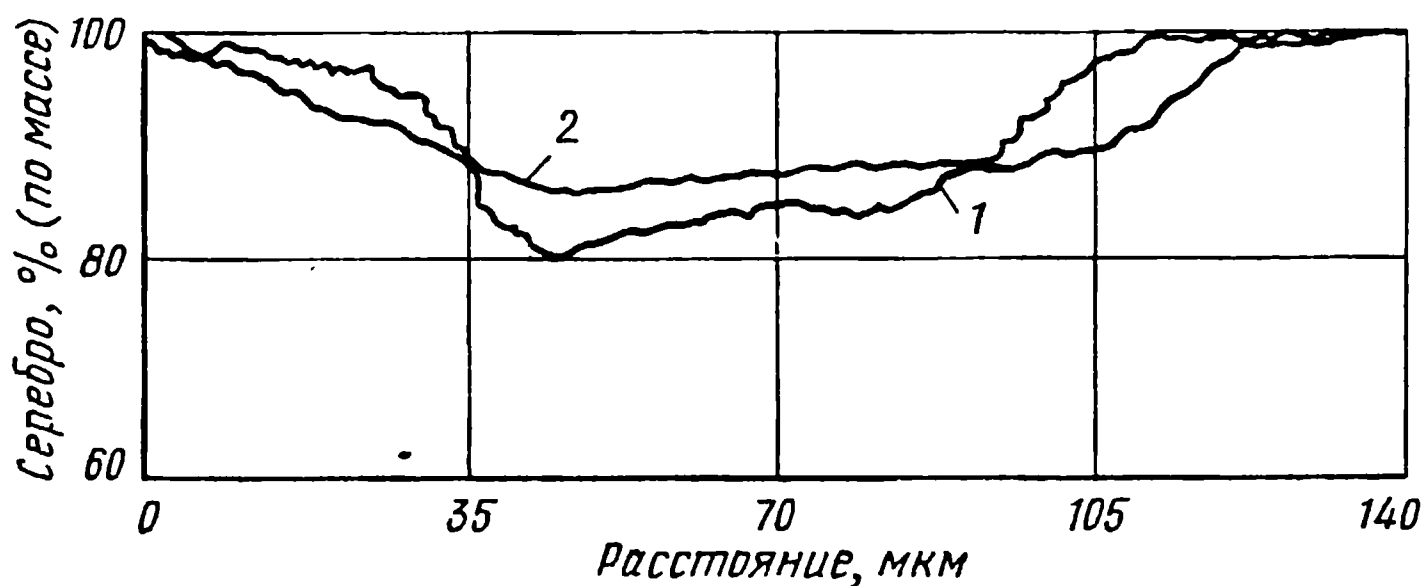


Рис. 55. Распределение серебра по ширине шва при пайке серебра припоем ПСр72. Температура пайки 800°C :

1 — без выдержки; 2 — выдержка 1 мин

Поскольку количество жидкой фазы в соединительном зазоре весьма ограничено, а количество твердого основного металла можно считать бесконечным, то достигнутое равновесие будет неустойчивым и должно рассматриваться как текущий этап в процессе взаимодействия твердой и жидкой фаз. Поэтому с увеличением выдержки при температуре пайки равновесие будет смещаться в сторону получения во всем объеме взаимодействующих металлов состава, соответствующего насыщенному твердому раствору (точка D). Кинетика этого процесса после достижения равновесного состава жидкой и твердой фаз определяется диффузией. Припой диффундирует в основной металл, вследствие чего жидкость пересыщается основным металлом. При определенном пересыщении происходит выделение из нее на поверхность основного металла твердого раствора. Процесс этот будет протекать до тех пор, пока в шве не израсходуется вся жидкость и не произойдет полная изотермическая кристаллизация. В результате состав наиболее легкоплавкого сплава в шве будет отвечать солидусу равновесной диаграммы состояния (точка D).

Однако равновесие в системе основной металл—шов при температуре пайки и в этом случае не достигается. Будет происходить процесс диффузионного выравнивания состава шва и при очень длительных выдержках он приблизится к составу основного металла.

В итоге процесс взаимодействия основного металла с расплавленным припоем при образовании растворно-диффузионного спая условно можно разграничить на три стадии (см. рис. 54):

I — интервал концентрации $A—C$, когда ведущим процессом является растворение основного металла в расплавленном припое;

II — интервал концентраций $C—D$, когда между составами жидкой (C) и твердой (D) фаз имеется динамическое равновесие. На этой стадии протекает процесс изотермической кристаллизации в шве;

III — интервал концентрации $D—B$, когда жидкости не осталось и протекает диффузия в твердой фазе.

Если паяемый металл и расплавленный припой образуют между собой химические соединения, то в процессе пайки могут выделяться интерметаллические соединения. В зависимости от природы основного металла и режима пайки образование интерметаллических соединений возможно в жидкой фазе при определенной концентрации растворенного основного металла в расплаве припоя или в результате реакции на твердой поверхности основного металла.

Если основной металл и расплавленный припой могут давать между собой несколько интерметаллических фаз, то на границе с твердым металлом возникает несколько слоев. Последовательность их возникновения будет зависеть от условий равновесия между образующимися фазами и расплавом припоя. Первой образуется фаза, наиболее богатая легкоплавким металлом и находящаяся с ним при данной температуре в равновесии. Возникновение остальных фаз происходит в результате взаимодействия первой фазы с основным металлом.

Физико-химическая природа и строение реакционных фаз, возникающих на границе основной металл—припой, зависят от внешних условий процесса и в первую очередь от температуры. Если первично образовавшаяся фаза не самая богатая легкоплавким компонентом, то она взаимодействует не только с твердым основным, но и с расплавленным припоем. Такое взаимодействие имеется, когда на границе основной металл—расплавленный припой протекает непосредственная химическая реакция. При этом фаза, образующаяся первой, не является наиболее легкоплавкой в данной системе, т. е. не находится в равновесии с расплавленным припоем и природа ее не определяется условиями равновесия. Примером неравновесных с жидким металлом фаз могут служить системы: медь—цинк, серебро—кадмий. Основную роль при образовании таких фаз начинают играть другие факторы и, в частности, теплота образования. Поэтому при таком взаимодействии в первую очередь возникают фазы, имеющие максимальную теплоту образования.

Возникновение неравновесных фаз на границе основной металл—расплавленный припой приводит к тому, что процесс растворения сильно замедляется, так как интерметаллическое соединение затрудняет доступ жидкого металла к твердому.

Образование интерметаллов, распределенных в виде отдельных изолированных кристаллидов по всему объему зоны сплавления, наблюдается при взаимодействии металлов, образующих устойчивые

химические соединения, которые в свою очередь могут вступать в эвтектическую реакцию с основным металлом. При дисперсной форме распределения интерметаллида в шве паяные соединения получаются более прочными. В тех случаях, когда интерметаллические соединения располагаются в виде непрерывной прослойки, паяные швы имеют пониженную прочность и пластичность.

Образование слоя интерметаллического соединения по границе основной металл—припой можно видеть на рис. 56, на котором

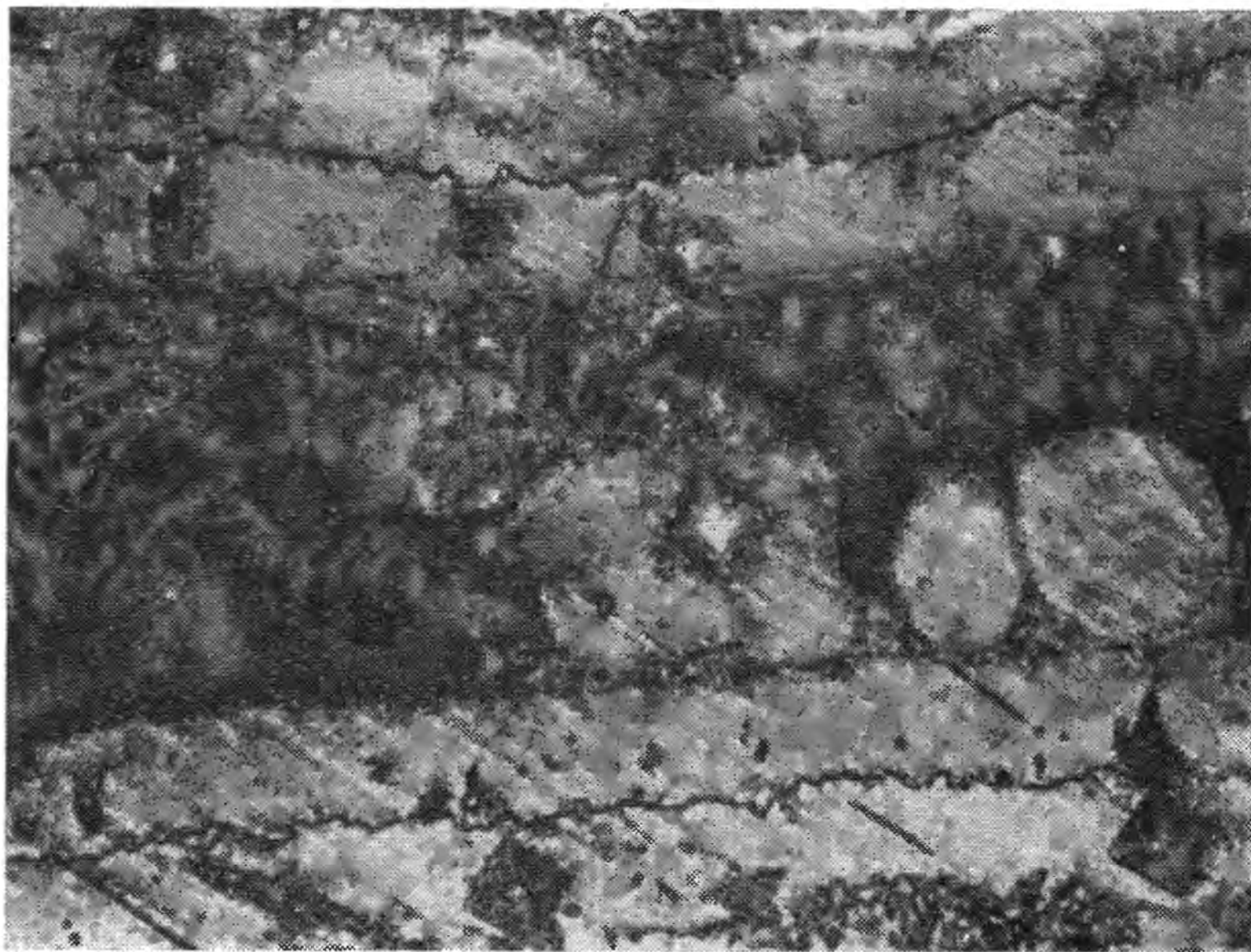


Рис. 56. Микроструктура шва при пайке стали Ст.3 эвтектикой медь—фосфор в среде водорода. Температура пайки 980°C , выдержка 0,5 мин, $\times 600$

приведена микроструктура шва в случае пайки стали Ст.3 эвтектикой медь—фосфор. По размеру отпечатков алмазной пирамиды прибора микротвердости можно видеть, что слои интерметаллида Fe_3P , прилегающие к основному металлу, имеют значительно большую по сравнению с другими участками шва твердость.

Следует иметь в виду, что образование интерметаллидных фаз возможно при пайке, если продолжительность взаимодействия основного металла и припоя превышает время ретардации диффузионных процессов. При меньших выдержках интерметаллиды в шве не образуются. Дифрактограмма спая при пайке железа оловом без выдержки приведена на рис. 6. Несмотря на то что в этой системе возможно образование нескольких интерметаллидов, в зоне спая они отсутствуют.

Количественная оценка диффузии. В современных теориях к изучению разновидностей диффузии подходят,

с одной стороны, феноменологически, не принимая во внимание атомную структуру тел, а с другой — рассматривают конкретную атомную модель (микроскопические теории).

Феноменологическая теория, исходящая из предположения, что диффузия протекает в результате градиента концентраций, была разработана Фиком, взявшим за основу уравнения теплопроводности, выведенные Фурье. Уравнения Фика являются простейшими в описании процессов диффузии при постоянной температуре. Они не учитывают механизм перемещения атомов диффундирующего элемента. Фик исходил из гипотезы, что в изотропной среде количество диффундирующего вещества m , проходящее в единицу времени через единицу площади поперечного сечения, пропорционально градиенту концентрации, измеряемому по нормали к этому сечению [31]:

$$m = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где C — концентрация диффундирующего вещества;

D — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом диффузии;

x — координата.

Так как концентрация диффундирующего вещества характеризуется количеством его в единице объема, то D измеряется в $\text{см}^2/\text{сек}$. Коэффициент диффузии определяет, с какой скоростью система может выравнять свою концентрацию. Он равен плотности потока, выравнивающего концентрацию в системе при единичном градиенте концентрации. Коэффициентом диффузии определяется кинетика процесса диффузии. Значение данного коэффициента находят преимущественно экспериментальным путем.

В случае нестационарного потока скорость накопления диффундирующего вещества в данном элементарном объеме определяется разностью между приходящим и выходящим потоками за единицу времени. Если возьмем две единичные плоскости на расстоянии dx , то поток через первую плоскость выразится согласно первому закону:

$$m = -D \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Через вторую плоскость:

$$m + \frac{\partial m}{\partial x} = -D \frac{\partial C}{\partial x} + \left[-\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right].$$

Принимая во внимание, что $m = -D \frac{\partial C}{\partial x}$, получим:

$$\frac{\partial m}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right).$$

Поскольку $\frac{\partial m}{\partial x}$ равно скорости изменения концентрации диффундирующего вещества с обратным знаком $\left(-\frac{\partial C}{\partial t} \right)$, то

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right).$$

Приняв коэффициент диффузии D постоянным, получим второй закон Фика в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}.$$

В изотропной¹ среде при наличии диффузии, протекающей в объеме вещества в трех измерениях, получим:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right).$$

Если среда анизотропна, то коэффициенты диффузии в различных направлениях будут различными, и второй закон Фика примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2},$$

где D_x , D_y , D_z — коэффициенты диффузии соответственно по осям x , y , z .

Первое уравнение Фика относится к стационарному потоку. Оно справедливо, когда градиент концентрации $\partial C / \partial x$ достаточно мал и изменение его происходит только вдоль потока. Второе уравнение описывает нестационарный поток, когда концентрация диффундирующего вещества в ограниченной области меняется по времени.

Для практических целей оказалось более удобным выведенное из второго закона диффузии уравнение, действительное для растворов, далеких от предела насыщения:

$$C_x = C_0 \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right) \right],$$

где C_x — концентрация диффундирующего элемента на глубине x от поверхности;

C_0 — концентрация элемента на поверхности.

Выражение $\Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right)$ представляет собой интеграл функции ошибок Гаусса и определяется по таблицам, если известны значения величин, заключенных в скобки. На основе этого уравнения можно вычислить коэффициент диффузии, когда C_x и C_0 определены экспериментально.

Коэффициент диффузии зависит от температуры. Эта зависимость выражается уравнением

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right),$$

где D_0 — коэффициент (предэкспоненциальный член), определяемый главным образом типом кристаллической решетки;

R — газовая постоянная, равная 1,987 кал/моль·град;

¹ В изотропной среде физико-химические свойства одинаковы по всем направлениям.

T — абсолютная температура, °К;

Q — энергия активации диффузии, являющаяся основной величиной, определяющей изменение коэффициента диффузии.

Как можно видеть из приведенной зависимости, при диффузии чем меньше силы взаимодействия между атомами диффундирующих элементов, тем меньше энергия активации и выше коэффициент диффузии, а следовательно, больше ее скорость.

Если в процессе диффузии между основным металлом и припоем образуется одно или несколько интерметаллических соединений в виде слоев, то каждый из них растет с различной скоростью. Закон роста диффузионных слоев может быть выражен математически. В том случае, когда в пределах отдельного слоя имеется линейное падение концентрации и разность концентраций на границах слоя ΔC при данной температуре постоянная, первый закон диффузии примет вид:

$$dm = -DS \frac{\Delta C}{x} dt,$$

где $\frac{\Delta C}{x}$ — падение концентрации вдоль слоя толщиной x ;

S — площадка, в перпендикулярном направлении к которой происходит диффузия.

С другой стороны, если считать концентрацию на границе слоя постоянной, то можно принять приращение толщины слоя интерметаллического соединения пропорциональным количеству продиффундировавшего вещества, т. е.

$$dm = a \cdot S \cdot dx,$$

где a — коэффициент пропорциональности, по размерности отвечающий концентрации вещества;

dx — приращение толщины слоя.

Приравнивая правые части этих равенств, получим

$$D \frac{\Delta C}{x} dt = a dx$$

или

$$D \frac{\Delta C}{a} t = \frac{x^2}{2}.$$

Поскольку величины D , ΔC и a при данной температуре постоянны, обозначим

$$D \frac{\Delta C}{a} = p = \text{const},$$

тогда

$$x^2 = 2pt.$$

Следовательно, при реакционной диффузии толщина слоя интерметаллического соединения в зависимости от времени пайки увеличивается по параболическому закону. Параметр параболы p харак-

теризует скорость роста и является величиной, пропорциональной коэффициенту диффузии, с которым он совпадает и по размерности.

В условиях растворения основного металла в расплаве припоя наряду с ростом слоя интерметаллического соединения происходит его растворение. Это приводит к изменению концентрации на границе слоя, в результате чего получается отклонение от параболического закона роста диффузионного слоя. Экспериментальной проверкой установлено, что и скорость процесса взаимодействия при реакционной диффузии непостоянна. В начале образования интерметаллических фаз скорость диффузии больше, чем это следует из параболического закона, вследствие реакции на поверхности взаимодействующих металлов. В дальнейшем скорость процесса снижается и характеризуется обычным коэффициентом диффузии.

Уравнения Фика выведены исходя из предположения, что среда гомогенна, поэтому их нельзя применять для описания диффузии по границам зерен. Эти уравнения неприменимы также в случаях, когда процесс диффузии вызывает образование в решетке дефектных мест.

Теории диффузии, рассматривающие атомную структуру тел (микроскопические теории), построены, исходя из допущения, что неравновесный процесс проходит через состояния, мало отличающиеся от конечного равновесного, или рассматривается как совокупность квазиравновесных состояний. Микроскопическая теория, базирующаяся на вакансионном механизме и механизме диффузии по междоузлиям, впервые была разработана Я. И. Френкелем. В общем случае, исходя из теплового движения атомов в твердом теле, она учитывает следующие виды движения:

1. Регулярные (в узлах решетки) и иррегулярные (в междоузлиях) колебания атомов около положения своего равновесия.

2. Диссоциацию связанных атомов, т. е. переход их из регулярного положения в иррегулярное.

3. Перемещение диссоциированных атомов между узлами решетки.

4. Ассоциацию диссоциированных атомов, т. е. переход их из иррегулярного в регулярное положение.

5. Перемещение вакансий в решетке.

Микроскопические теории диффузии в металлах и сплавах на настоящем этапе их развития направлены в основном на уточнение модельных представлений и на модификацию в связи с этим математического описания процесса.

При определении коэффициента диффузии применяют металлографический, спектральный, рентгенографический, радиоактивный и другие методы. Коэффициенты диффузии отдельных, входящих в состав припоев, элементов в основной металл приведены в табл. 21 [32].

На величину коэффициента диффузии большое влияние оказывают примеси. При этом они могут снижать или повышать коэффициент диффузии. Так, в случае диффузии меди в никель при темпе-

Основной металл	Диффундирующий металл	Температура, °C	Коэффициент диффузии $\text{см}^2/\text{сек}$
Fe	B	950	$2,6 \cdot 10^{-7}$
	Ni	1200	$9,3 \cdot 10^{-11}$
	Si	1150	$1,45 \cdot 10^{-8}$
	W	1280	$2,4 \cdot 10^{-9}$
	Sn	1000	$20 \cdot 10^{-9}$
Cu	Mn	850	$1,3 \cdot 10^{-10}$
	Ni	950	$2,1 \cdot 10^{-10}$
	Pd	860	$1,3 \cdot 10^{-10}$
	Zn	880	$5,6 \cdot 10^{-10}$
Ni	Cu	890	$(1,9—2,4) \cdot 10^{-10}$
Al	Cu	497	$2,52 \cdot 10^{-10}$
	Si	500	$9,85 \cdot 10^{-10}$
	Zn	507	$2,04 \cdot 10^{-9}$

ратуре 1000°C добавка в никель 0,5% Mn на одну треть снижает коэффициент диффузии.

Иногда примеси, наоборот, способствуют увеличению коэффициента диффузии. Поэтому при пайке, когда основной металл и припой являются, как правило, многокомпонентными сплавами, в которых отдельные металлы могут образовывать друг с другом твердые растворы, эвтектические смеси и интерметаллические соединения, диффузия одновременно протекает в нескольких фазах, и коэффициенты диффузии отдельных компонентов в разных условиях будут иметь различное значение, которое трудно оценить на основе коэффициентов диффузии чистых металлов. В этом случае для оценки характера и скорости диффузии бывает достаточно определить глубину диффузионного слоя. Наиболее удобным для этой цели является метод измерения микротвердости. Этот метод наиболее доступен и поэтому широко применяется при исследовании паяных швов.

В некоторых случаях диффузионный слой четко выделяется на травленном микрошлифе по цвету и ширина его может быть замерена на микроскопе. На рис. 57 приведена микроструктура шва при пайке стали Ст.3 припоем ВЗМИ-49. Диффузионный слой здесь резко очерчен и хорошо виден.

Кинетику и механизм диффузии при пайке наглядно можно проследить при образовании контактно-реакционного спая. В этом случае процесс пайки начинается с диффузии между соединяемыми металлами в твердой фазе при отсутствии расплава припоя в соединительном зазоре. Диффундирующие атомы металлов сосредотачиваются в диффузионной зоне, при этом накапливание их (например, атомов

меди в серебре при контактном плавлении меди с серебром) происходит не равномерно в объеме диффузионной зоны, а в отдельных ее участках, т. е. продиффундировавшие атомы образуют отдельные включения (рис. 58, а). С увеличением времени выдержки количество и концентрация образующегося твердого раствора на основе меди и серебра в этих участках диффузионной зоны возрастают.

Когда концентрация твердых растворов достигает насыщения, происходит взаимодействие твердых растворов и образование жид-

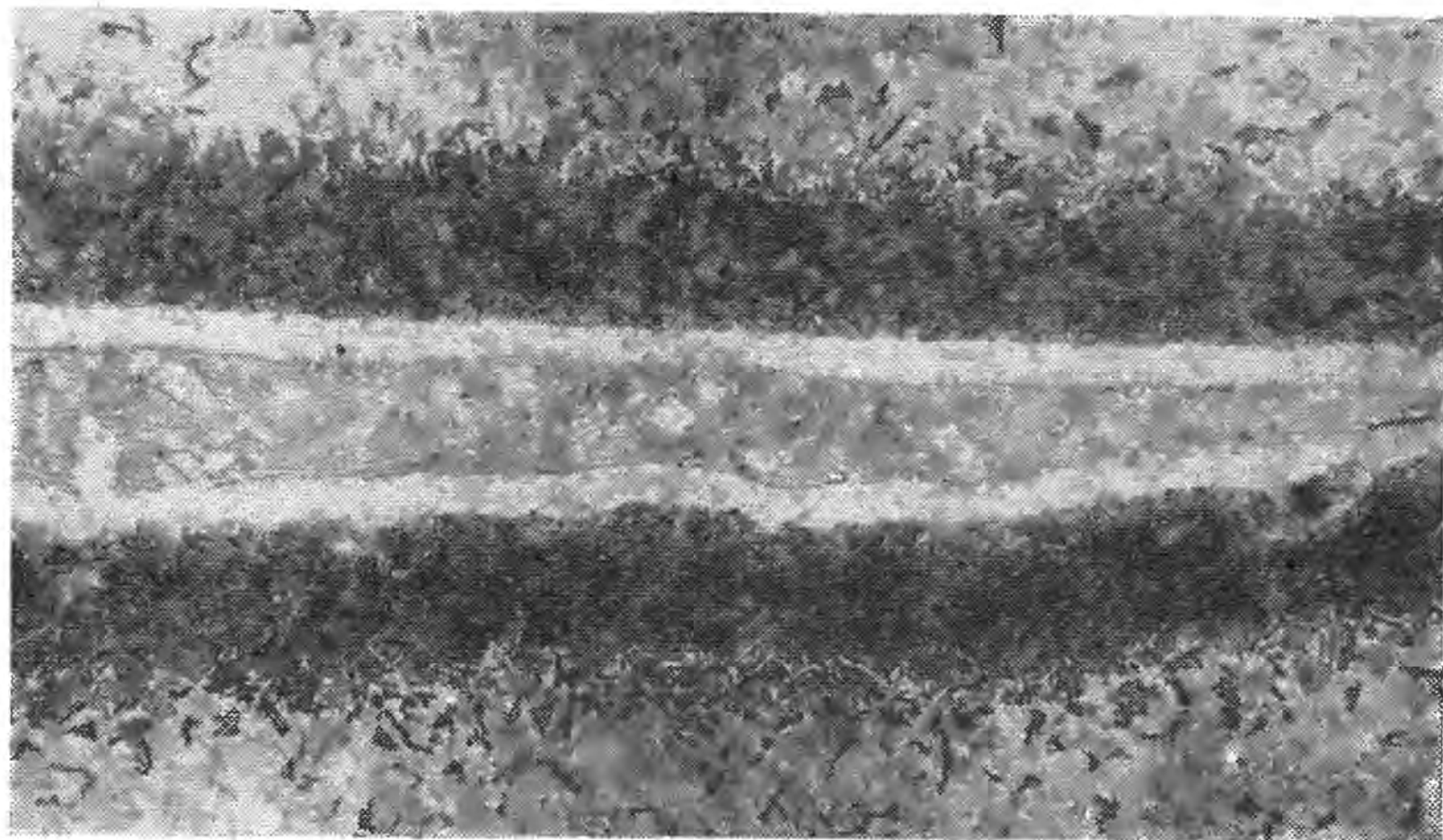


Рис. 57. Микроструктура шва при пайке стали Ст.3 припоем ВЗМИ-49 в атмосфере водорода. $\times 70$

кости эвтектического состава, которая находится в диффузионной зоне в виде включений отдельных микрокапель в твердой фазе. При увеличении размера включений (в процессе диффузии) они выходят на поверхность взаимодействующих металлов, что является моментом возникновения жидкой прослойки между взаимодействующими металлами, служащей припоем при образовании контактно-реакционного спая. Схематично процесс диффузии меди в серебро, образование микрокапель жидкости в диффузионной зоне и прослойки жидкости в контакте между медью и серебром представлены на рис. 58, б.

Аналогично протекает процесс диффузии из жидкого припоя в основной металл, при этом имеются те же стадии — атомы припоя диффундируют в твердый металл и накапливаются в отдельных микроучастках диффузионной зоны. Если содержание продиффундировавшего компонента превышает солидус равновесного твердого раствора при температуре пайки, то в диффузионной зоне образуется жидкость. На рис. 58, в приведена микроструктура шва при пайке меди припоем ПСр72 (эвтектика медь—серебро), из которой можно видеть, что в результате диффузии из припоя серебра образовалась

диффузионная зона, которая при температуре пайки расплавилась, а при затвердевании произошла перекристаллизация.

При пайке обычно основной металл и припой представляют многокомпонентные системы, поэтому кинетика и механизм диффу-

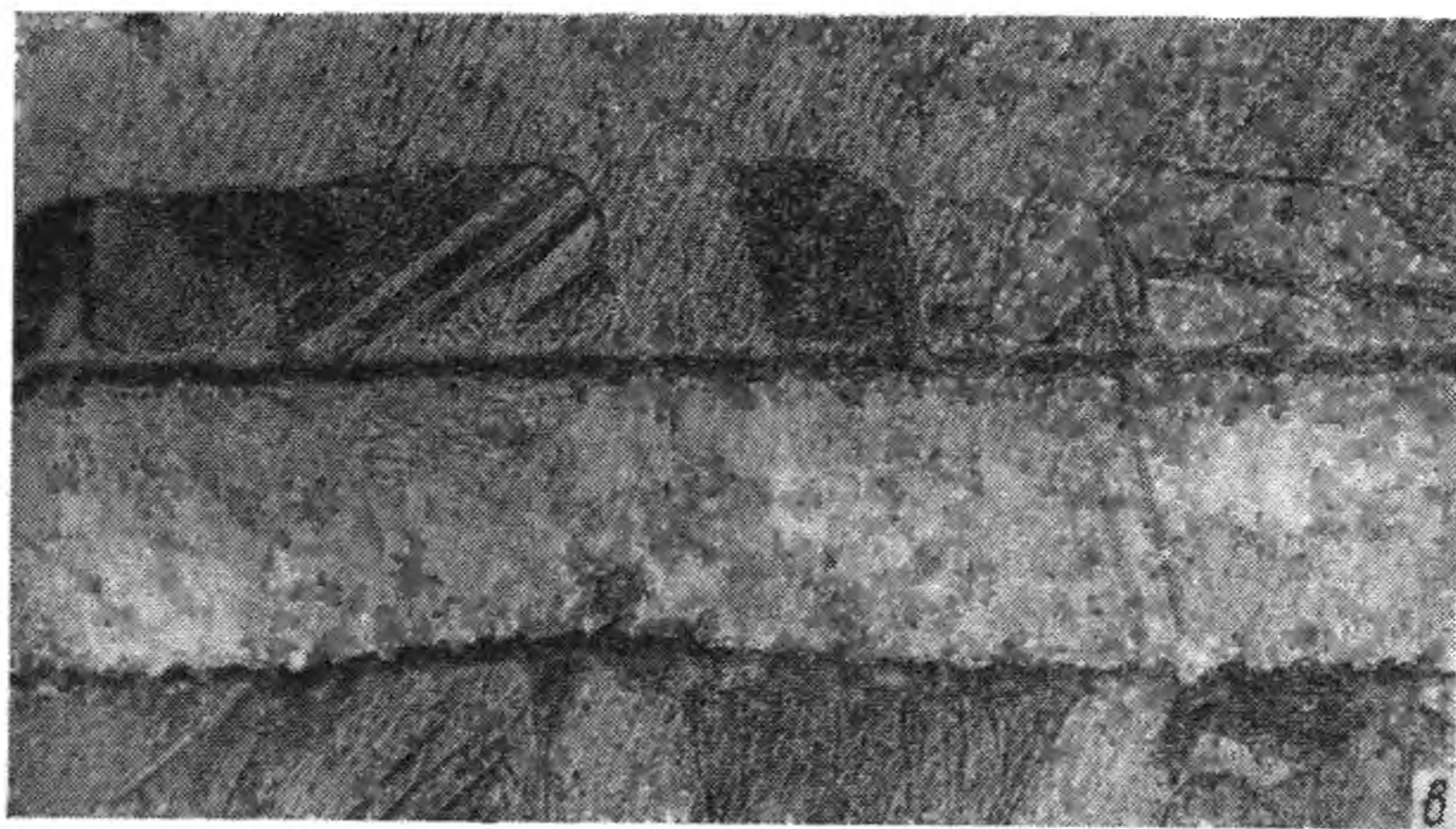
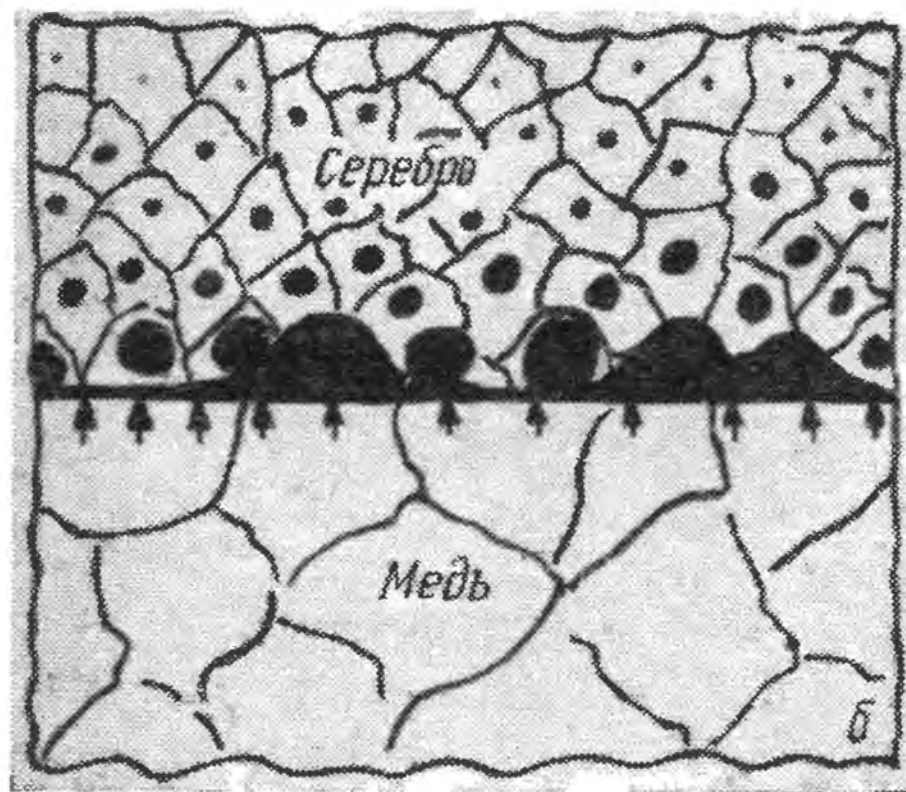
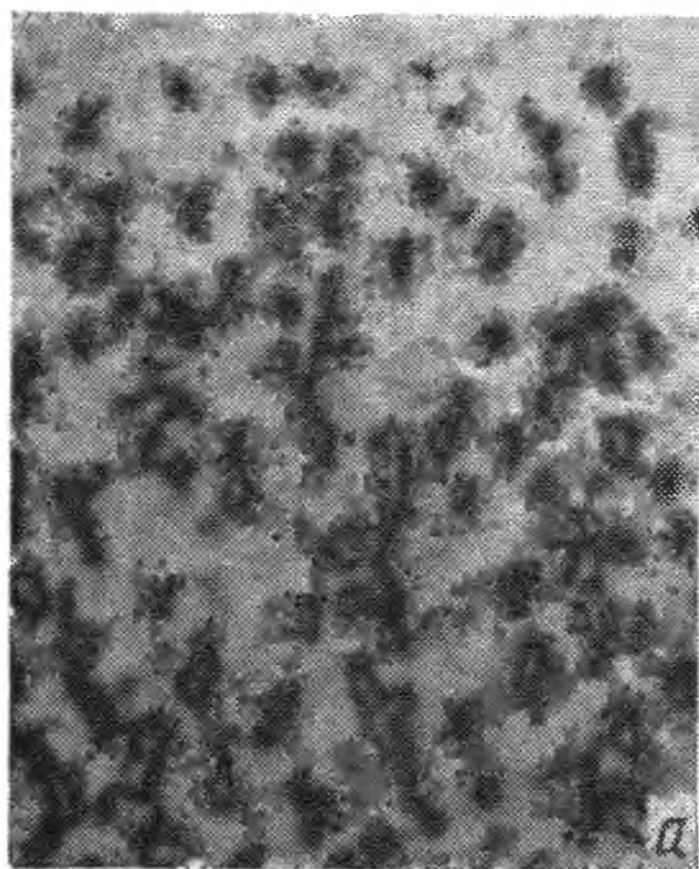


Рис. 58. Характер образования и плавления диффузионной зоны:

а — образование в диффузионной зоне включений продиффундировавшей меди при контактом плавлении меди с серебром. Температура пайки 779°C , $\times 600$; **б** — схема образования жидкой фазы в диффузионной зоне и в контакте между взаимодействующими металлами; **в** — оплавление диффузионной зоны при пайке меди припоем ПСр72 в среде водорода. Температура пайки 800°C , $\times 200$

зии в этом случае осложняются взаимным влиянием диффундирующих компонентов, но общая схема процесса диффузии принципиально не изменяется. Наряду с диффузией в основном металл в процессе пайки идет активная диффузия в жидкой фазе и растворение основного металла в расплаве припоя.

Р а с т в о р е н и е п р и п а й к е. Растворами называют однородные системы, состоящие из двух или более компонентов. Содержание компонента в растворе может меняться, что отличает его от химических соединений постоянного состава, в которых элементы входят в строго определенных количественных соотношениях. Растворимость тугоплавких металлов в легкоплавких зависит от очень многих факторов. Экспериментально установлено, что растворимость в жидких металлах зависит от строения атома растворяемого металла.

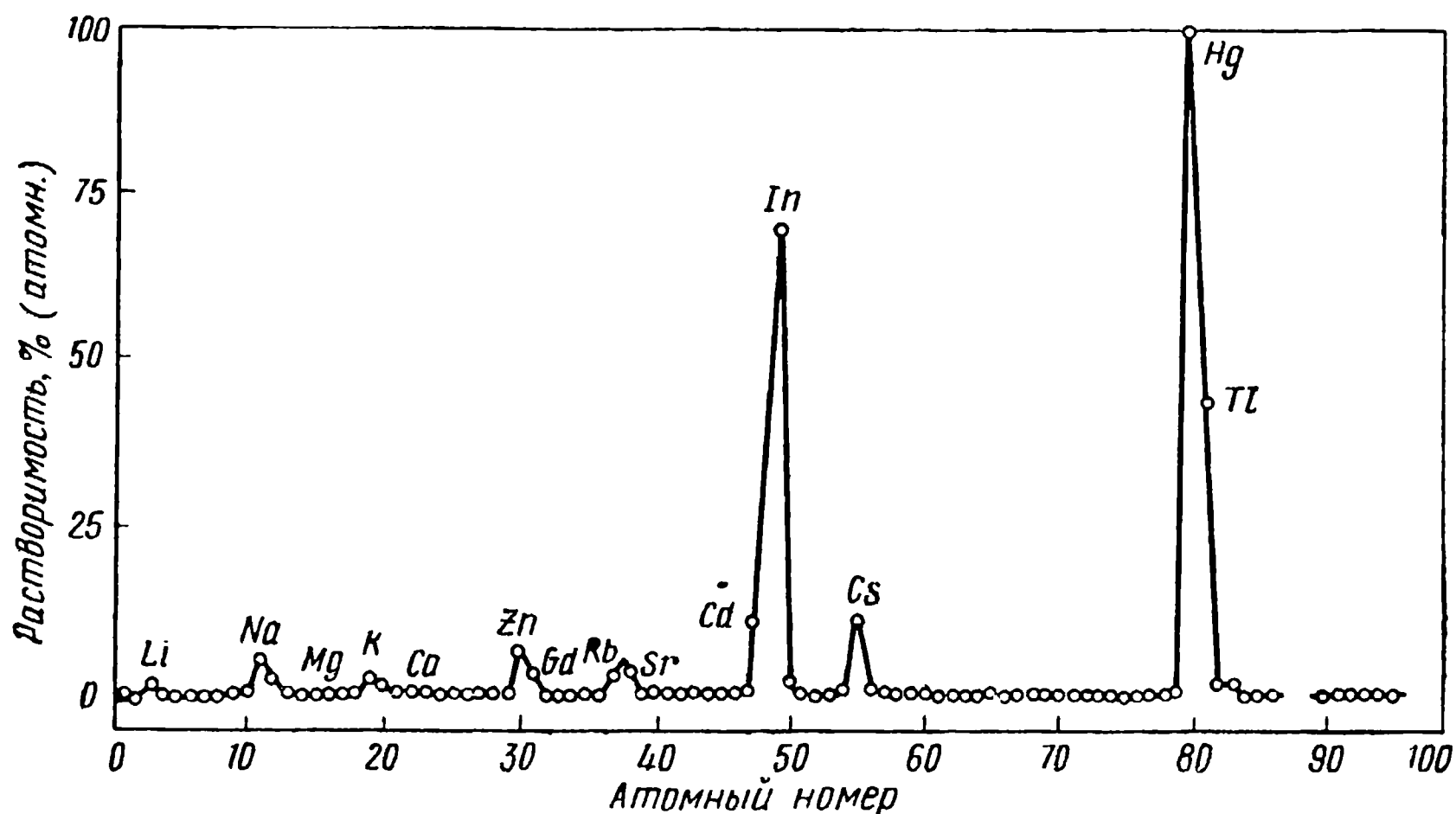


Рис. 59. Зависимость растворимости металлов в ртути от атомного номера

На рис. 59 показана зависимость растворимости металлов в ртути от атомного номера элемента, из которого видно, что растворимость является периодической функцией атомного номера. При этом для различных растворителей максимумы растворимости имеют место при одинаковых порядковых номерах элементов в таблице Д. И. Менделеева. С повышением температуры растворимость улучшается. В тех случаях, когда основной материал является сплавом, компоненты его будут переходить в расплав с разной скоростью, что вызовет избирательное растворение твердого металла.

Значительное влияние на растворимость оказывает состояние поверхности твердого металла и его структура. Наличие окисных пленок тормозит растворение. Однако окисные пленки не во всех случаях играют роль поверхностного барьера. В тех случаях, когда они легко растворимы в расплаве или удаляются в процессе флюсования, влияние их незначительно.

Ориентировка зерен также сильно влияет на скорость растворения. Различием в скоростях растворения в разных кристаллографических направлениях объясняется наблюдаемое часто при пайке растворение основного металла по границам зерен. Атомы, находящиеся в растворяемых участках, имеют бо́льшую потенциальную энергию по сравнению с атомами, находящимися в объеме зерна, поэтому вероятность их перехода в расплав припой увеличивается.

При пайке процесс растворения основного металла в расплавленном припое может протекать в двух случаях:

1. Когда расплав припоя не перемещается относительно твердого металла — статические условия взаимодействия (припой предварительно внесен в соединительный зазор или образуется в результате контактного плавления).

2. Когда припой после расплавления течет в соединительном зазоре — динамические условия взаимодействия.

Как в первом, так и во втором случае изменяются составы обеих фаз, и на границе между ними образуется поверхность раздела. Различие состоит в том, что при динамических условиях растворения в соприкосновение с основным металлом, не смоченным припоем, вступает расплав припоя, который уже взаимодействовал с ним, поэтому в направлении от входной галтели к выходной интенсивность процесса заметно снижается.

Интенсивность растворения основного металла в расплаве припоя лимитируется или скоростью перехода атомов в пограничный слой, или скоростью их диффузии в расплаве припоя. Если скорость перехода атомов основного металла будет меньше скорости диффузии их в жидкой фазе, т. е. будет лимитировать интенсивность растворения, то уравнение для скорости растворения в случае взаимодействия чистых металлов можно написать в следующем виде [33]:

$$\frac{dN}{dt} = W\rho S - \omega CS,$$

где N — число атомов, остающихся в расплаве припоя, т. е. не выделяющихся вновь на поверхность твердого металла;

t — время;

W — вероятность перехода атомов основного металла в расплав припоя;

ρ — поверхностная плотность основного металла или число атомов на поверхности единичной площади;

S — площадь растворяемого участка основного металла;

ω — скорость кристаллизации;

C — концентрация основного металла в расплаве припоя.

К моменту насыщения расплава припоя основным металлом между ними устанавливается подвижное равновесие, т. е.

$$W\rho - \omega C_{\infty} = 0,$$

где C_{∞} — концентрация насыщения расплава припоя основным металлом.

Подставив в уравнение скорости растворения $CV_{\text{ж}} = N$ и принимая во внимание предыдущее равенство, получим:

$$\frac{dc}{dt} = W\rho \frac{S}{V_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{C}{C_{\infty}}\right),$$

где $V_{\text{ж}}$ — объем расплавленного припоя.

Проинтегрировав это выражение по времени и приняв концентрацию основного металла в расплаве припоя в начальный момент

растворения равной нулю, получим уравнение, описывающее кинетику растворения:

$$C = C_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{W\rho}{C_{\infty}} \frac{S}{V_{\text{ж}}} t} \right).$$

Если растворение основного металла лимитируется диффузией в жидкой фазе, уравнение скорости можно представить в следующем виде:

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{C_{\infty} - C}{\delta} S,$$

где D — коэффициент диффузии атомов основного металла в жидком припое;

δ — суммарная ширина пограничного слоя в жидком металле.

Скорость изменения концентрации основного металла в припое, по аналогии с предыдущим, можно записать в виде соотношения

$$\frac{dc}{dt} = \frac{DC_{\infty}}{\delta} \frac{S}{V_{\text{ж}}} \left(1 - \frac{C}{C_{\infty}} \right).$$

Интегрируя по времени и учитывая, что концентрация основного металла в расплаве припоя в начальный момент растворения равна нулю, получим кинетическое уравнение процесса растворения, лимитируемого диффузией в жидкой фазе:

$$C = C_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{D}{\delta} \frac{S}{V_{\text{ж}}} t} \right).$$

В том случае когда скорость растворения зависит и от скорости перехода атомов основного металла в расплав припоя и от скорости диффузии в жидкой фазе, кинетическое уравнение примет вид:

$$C = C_{\infty} \left(1 - e^{-\alpha \frac{S}{V_{\text{ж}}} t} \right),$$

где $\alpha = \frac{W\rho/C_{\infty}D/\delta}{W\rho/C_{\infty} + D/\delta}$ — сомножитель показателя экспоненты, называемой константой скорости растворения; для первого случая он равен $W\rho/C_{\infty}$, для второго D/δ .

Как можно видеть из уравнений, во всех трех рассмотренных случаях кинетика растворения характеризуется аналогичными зависимостями, а расплав зоны сплавления насыщается по экспоненциальному закону. Из последнего уравнения следует, что кинетика растворения основного металла в расплавленном припое определяется соотношением физико-химических свойств взаимодействующих металлов, площадью контакта между ними и количеством жидкой фазы.

Согласно экспериментальным данным по растворению тугоплавких металлов в легкоплавких, процесс растворения лимитируется в большинстве случаев диффузией растворенного основного металла в жидкой фазе. Это наблюдается, например, для систем медь—свинец, медь—висмут, никель—свинец, железо—ртуть и др. При растворении олова в оловянно-свинцовых сплавах лимитирующим фактором является переход через межфазную границу.

Первоначальное насыщение расплава припоя основным металлом происходит непосредственно в момент заполнения капиллярного зазора. Так, при пайке железа медью обнаружено, что расплавленный припой насыщается железом еще до того, как он дойдет до середины капиллярного зазора. Такое интенсивное растворение основного металла в припое приводит к тому, что на входе капиллярный зазор приобретает клиновидную форму. С увеличением времени выдержки при пайке увеличивается количество растворившегося в припое основного металла и повышается степень равномерности распределения его в зоне сплавления. Однако при кристаллизации эта равномерность

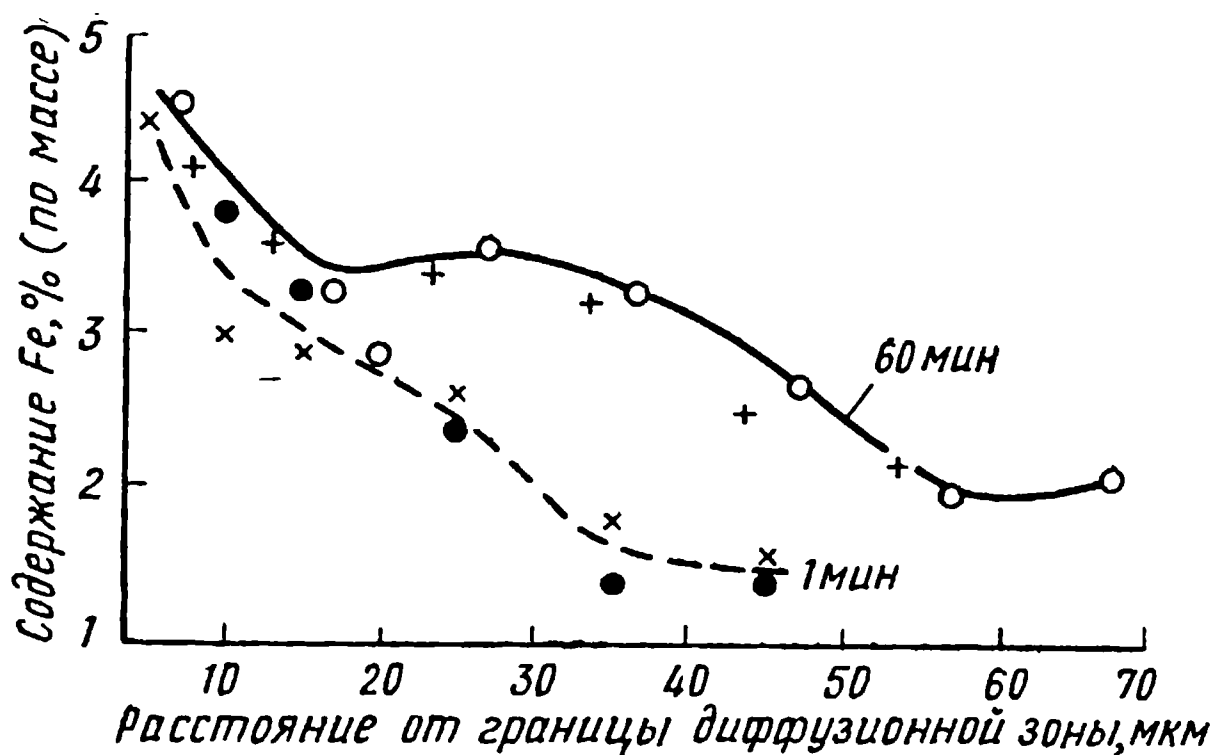


Рис. 60. Кривые распределения основного металла по зерну в зоне сплавления при пайке железа медью

нарушается. На подложке в первую очередь затвердевает сплав, наиболее обогащенный тугоплавким компонентом.

На рис. 60 приведены кривые распределения основного металла по примыкающему к нему зерну зоны сплавления в случае пайки железа медью. Как можно видеть из кривых, при удалении от основного металла содержание железа в зоне сплавления падает. Максимальное содержание железа в меди в зоне сплавления по границе с основным металлом при температуре пайки 1100°C составляет приблизительно 4%, а в центре зоны сплавления 2,5% при выдержке 1 мин и 3,1% при часовой выдержке. Среднее содержание железа в зоне сплавления составляет приблизительно 3%, что соответствует ликвидусу системы железо—медь при температуре 1100°C . Такое распределение железа по ширине шва свидетельствует о том, что кристаллизация происходила при разных температурах. При изотермической кристаллизации содержание железа в шве было бы приблизительно постоянным.

При легировании железа углеродом, т. е. при переходе от железа к углеродистым сталям, в случае пайки последних медью при температуре на $30\text{—}50^{\circ}\text{C}$ выше температуры плавления припоя среднее содержание железа в зоне сплавления повышается до 4,7%.

Аналогичное интенсивное насыщение расплавленного припоя основным металлом в процессе его растворения имеет место и при

пайке железа припоями сложного состава. В табл. 22 приведено содержание основного металла в зоне сплавления шва при пайке с индукционным нагревом малоуглеродистых сталей медью, серебряными и медноцинковыми припоями (пайка производилась в среде, содержащей 90% водорода и 10% азота, с выдержкой 1—3 мин при температуре на 30—50° С выше температуры плавления припоя). Из данных табл. 22 видно, что почти во всех случаях железо интенсивно растворяется в расплавленном припое.

Т а б л и ц а 22

№ пп.	Химический состав припоя, % (по массе)								Содержание железа % (по массе)	
	Ag	Cu	Ni	Mn	Zn	Cd	Sn	прочие	в припое	в зоне сплавления шва
1	—	100	—	—	—	—	—	—	0,000	4,70
2	45	15	—	—	16	24	—	—	0,002	1,48
3	50	15,5	3	—	15,5	16	—	—	0,048	0,55
4	45	30	—	—	25	—	—	—	0,022	3,39
5	56	22	—	—	17	—	5	—	0,001	1,11
6	72	28	—	—	—	—	—	—	0,008	0,48
7	85	—	—	15	—	—	—	—	0,003	3,28
8	—	57	—	—	41,5	—	1	0,5	0,040	2,00
9	—	52,5	—	—	46,5	—	—	1	0,070	2,34
10	—	51,5	—	—	43,5	—	4	0,5	0,050	3,42
11	—	48	10	—	41	—	—	1	0,011	4,03

Следует иметь в виду, что приведенные данные химического анализа зоны сплавления шва являются осредненными и не учитывают выделения железа в результате понижения растворимости основного металла при охлаждении после пайки. Поскольку при охлаждении соединения дендриты железа осаждались на поверхность основного металла, выделяясь из пересыщенного жидкого раствора, и при химическом анализе не учитывались, то фактическое содержание железа в металле зоны сплавления при температуре пайки было выше.

На количество выделяемого основного металла оказывают влияние его состав и состав зоны сплавления при температуре пайки. Так, при пайке стали, содержащей 1% углерода, медью при охлаждении шва выделяется больше дендритов железа, чем при пайке малоуглеродистых сталей. При легировании железа никелем с увеличением содержания последнего количество железа в зоне сплавления при пайке медью практически остается неизменным. При пайке же железа медью, легированной никелем, с повышением содержания никеля в припое, по данным Екатовой А. С. и Сидохина Ю. Ф., количество железа в зоне сплавления снижается (табл. 23).

При легировании припоя компонентами, содержащимися и в основном металле, во всех случаях скорость растворения основного металла в расплавленном припое снижается, так как последний будет уже частично насыщен растворяющимся компонентом. При

Состав основ-ного металла % (по массе)		Состав при-поя, % (по массе)		Режим пайки		Состав зоны сплавления			
				Температура °С	выдержка мин	по диаграм-мам состояния		по экспери-ментальным данным	
Fe	Ni	Cu	Ni			Ni	Fe	Ni	Fe
96,0	4,0	100,0	—	1150	5	0,3	4,9	0,4	4,8
84,0	16,0	100,0	—	1150	5	1,3	4,7	1,4	4,6
72,0	28,0	100,0	—	1150	5	2,0	4,5	2,3	4,4
100,0	—	93,8	6,2	1200	15	5,9	6,2	5,8	6,3
100,0	—	87,4	12,6	1200	15	12,0	5,4	11,8	5,9
100,0	—	78,1	21,0	1200	15	20,3	1,3	20,6	1,4

пайке разнородных металлов, когда они образуют между собой твердые растворы или интерметаллические соединения, при растворении основного металла в зоне сплавления происходит перенос массы твердых металлов через жидкую прослойку. В результате диффузионного перемещения атомов более растворимого твердого металла на менее растворимый на последнем образуется слой твердого раствора или интерметаллического соединения. Например, при взаимодействии железа с алюминием, ниобия с кобальтом через прослойку расплава висмута на поверхности железа и ниобия образуются интерметаллиды. При взаимодействии железа с кобальтом и никелем в той же среде на поверхности железа отлагается слой твердого раствора. Возможен также перенос неметаллических элементов, в частности углерода, который перемещается от менее сильных к более сильным карбидообразователям.

Если при пайке разнородных металлов один из них не растворим в расплаве припоя, а при взаимодействии они образуют интерметаллическое соединение, отлагающееся на поверхности нерастворимого металла, то скорость образования интерметаллида, поскольку диффузия в жидкой фазе выше, будет лимитироваться диффузией в твердой фазе:

$$dm = -D \frac{dC}{dx} S dt,$$

- где D — коэффициент диффузии более растворимого металла в интерметаллиде;
 x — толщина слоя интерметаллида;
 C — концентрация диффундирующего элемента в слое интерметаллида;
 S — площадь контакта нерастворимого металла с зоной сплавления.

Если принять, что концентрация растворенного металла за пределами слоя интерметаллида равна нулю, то в контакте с зоной сплавления концентрацию в нем можно определить из соотношения

$$C = \xi n,$$

где ξ — коэффициент пропорциональности;
 n — концентрация растворенного металла в зоне сплавления.

Тогда $dm = D\xi \frac{n}{x} S dt$.

Так как $dm = \eta S dx$ (где η — коэффициент пропорциональности), то предыдущее выражение можно записать в виде:

$$\frac{dx}{dt} = D \frac{\xi}{\eta} \frac{n}{x}.$$

После решения дифференциального уравнения получим:

$$x^2 = 2Dn \frac{\xi}{\eta} t + A.$$

При $t = 0$ $x = 0$ и, следовательно, $A = 0$. Тогда уравнение, выражающее зависимость толщины слоя интерметаллида от времени выдержки при температуре пайки, примет вид:

$$x^2 = 2Dn \frac{\xi}{\eta} t.$$

Таким образом, скорость роста интерметаллида при переносе массы с одного металла на другой через слой расплава припоя в процессе растворения зависит от коэффициента диффузии растворяемого металла через слой интерметаллида и его концентрации в зоне сплавления. Составы интерметаллидов приведены в приложении.

§ 3. Процессы кристаллизации при пайке

Особенности кристаллизации. Кристаллизация при пайке — сложный процесс, основные особенности которого следующие:

1. Активное взаимодействие между расплавленным припоем и основным металлом на межфазной границе.
2. Ориентирующее влияние на процесс кристаллизации основного металла.
3. Выраженная ликвация в шве.
4. Зависимость характера кристаллизации от количества припоя в соединительном зазоре.

При пайке одновременно протекают ограниченные по времени и сложные процессы взаимодействия в системах: основной металл—флюс—припой—атмосфера воздуха или основной металл—контролируемая газовая среда—припой, состояние равновесия которых, как правило, не достигается. Поэтому протекающие при образовании паяного соединения процессы, в том числе и кристаллизация, являются неравновесными. При неравновесной кристаллизации обычно частично подавляется выравнивание состава не только в твердой, но и в жидкой фазе. Как известно, неравновесность кристаллизации сплавов приводит к дендритной ликвации, что в свою очередь вызывает появление в шве более легкоплавкой, обычно эвтектической составляющей, обладающей повышенной хрупкостью и менее прочной.

Физико-химические процессы при пайке протекают обычно в зазорах порядка 0,05—0,3 мм, поэтому количество жидкого металла находящегося в шве весьма незначительно. Это приводит к тому, что при температуре пайки получают большое развитие процессы взаимодействия основного металла и расплавленного припоя, в результате чего последний, особенно при высокотемпературной пайке, интенсивно легируется компонентами основного металла. Этот процесс усиливается, если на основном металле нет окисной пленки, т. е. достигается непосредственный контакт между основным металлом и припоем.

Состав припоя в процессе пайки может меняться не только в результате растворения в нем основного металла, но и избирательной диффузии компонентов припоя в основной металл, испарения наиболее летучих компонентов припоя, окисления и удаления в шлак за счет газовой фазы или окислов основного металла.

Влияние основного металла на процесс образования соединения сказывается также и непосредственно при кристаллизации, которая идет на готовых поверхностях раздела. При этом образование зародышей кристаллов на поверхности основного металла зависит от характера смачивания его припоем. Чем меньше краевой угол смачивания, тем меньше затрачивается энергии на образование зародыша.

Если краевой угол мал, то для образования зародыша кристалла требуется незначительное переохлаждение. Поскольку обязательным условием пайки является смачивание припоем основного металла, то условия зарождения центров кристаллизации при этом весьма благоприятны.

Кристаллизацию при пайке необходимо рассматривать одновременно с процессами, происходящими на границе основной металл—расплав припоя, так как от них зависит температура затвердевания металла зоны сплавления, количество жидкой фазы, ее однородность, наличие в ней зародышей кристаллов, степень ликвации при затвердевании и т. д. Направленный теплоотвод и наличие твердой поверхности, во многих случаях изоморфной с затвердевающим расплавом, делают процессы, происходящие на границе основной металл—зона сплавления часто основными в процессе кристаллизации. Кристаллизацию в этом случае следует рассматривать не в обычном понимании, а как направленное заращивание соединительного зазора.

Характер кристаллизации меняется, если на границе основной металл—расплав припоя образуется один или несколько слоев интерметаллических соединений в результате непосредственного взаимодействия твердого металла с припоем или в процессе кристаллизации интерметаллидной фазы из расплава. Образовавшаяся прослойка интерметаллида имеет свою собственную кристаллическую структуру, отличающуюся от структуры припоя. Поэтому кристаллизация металла зоны сплавления будет происходить на поверхностях, не изоморфных с расплавом. В этих условиях контакт основной металл—зона сплавления будет напряженным, что приведет к снижению прочности спая.

При кристаллизации на гетерогенных поверхностях зародышеобразование и рост кристаллов в первую очередь происходят в активных местах кристаллов основного металла. Образующиеся кристаллы ориентируются таким образом, чтобы освобождаемая поверхностная энергия была наибольшей, а система более устойчивой и имела наименьший запас энергии. Поэтому и спай образуется первоначально не по всей площади, а по отдельным наиболее активным зернам основного металла.

Влияние твердой поверхности основного металла приводит к тому, что кристаллизация металла шва с самого начала в той или иной степени ориентирована, т. е. имеет место определенное соотношение между формой и размерами кристаллической ячейки металла шва и основного металла. Кристаллиты основного металла являются готовыми центрами кристаллизации, ввиду этого кристаллизация в шве может начинаться без переохлаждения или с незначительным переохлаждением.

В зависимости от соотношения параметров решетки кристаллов основного металла и кристаллов, образующихся из расплава, ориентированная кристаллизация (эпитаксия) может протекать по-разному. Выделяющаяся из расплава новая структурная составляющая, отличающаяся в той или иной степени от основного металла фазовым составом, типом и параметрами решетки, сопрягается с подложкой (основным металлом) такой кристаллографической плоскостью, в которой расположение атомов подобно расположению аналогичных атомов в грани кристалла основного металла. Вероятность такой кристаллизации тем больше, чем меньше различия межатомных расстояний в плоскостях сопрягающихся фаз.

В процессе ориентированной кристаллизации силы притяжения атомов основного металла вынуждают атомы расплавленного припоя занять узлы не своей решетки, а решетки основного металла. Следовательно, кристалл основного металла навязывает образующемуся кристаллу свой собственный период решетки. Это приводит к деформации первых плоскостей образующейся решетки. Деформация с увеличением толщины слоя растущего кристалла постепенно снижается. При определенной толщине слоя, контактирующего с подложкой, кристалл приобретает обычный для него параметр решетки.

При наличии ориентированной кристаллизации структура металла зоны сплавления образуется в результате развития трех последовательных стадий процесса. На первой стадии ориентировка формирующихся кристаллов целиком определяется подложкой. Следующая стадия характеризуется появлением структурных несовершенств в связи с уменьшением ориентирующего влияния подложки. На третьей стадии наблюдается или поликристаллическая структура, или возникает текстура роста.

При пайке поверхность основного металла, очищенная в результате флюсования растворами или расплавами веществ или под действием искусственных газовых сред, проявляет сильное ориентирующее воздействие на расплавленный припой в процессе кристал-

лизации. Ориентированная кристаллизация при контактно-реакционной пайке показана на рис. 61.

Наряду с эпитаксией образующаяся в шве структура может иметь ориентировку зерен, связанную с возникновением определенным образом ориентированных зародышей или с ростом кристаллов в определенных кристаллографических направлениях.

Ориентационное соответствие в зоне спая при высокой активности растворно-диффузионных процессов между основным металлом и расплавом припоя в отдельных случаях перерастает в непрерывную структурную связь между основным металлом и зоной сплавления.

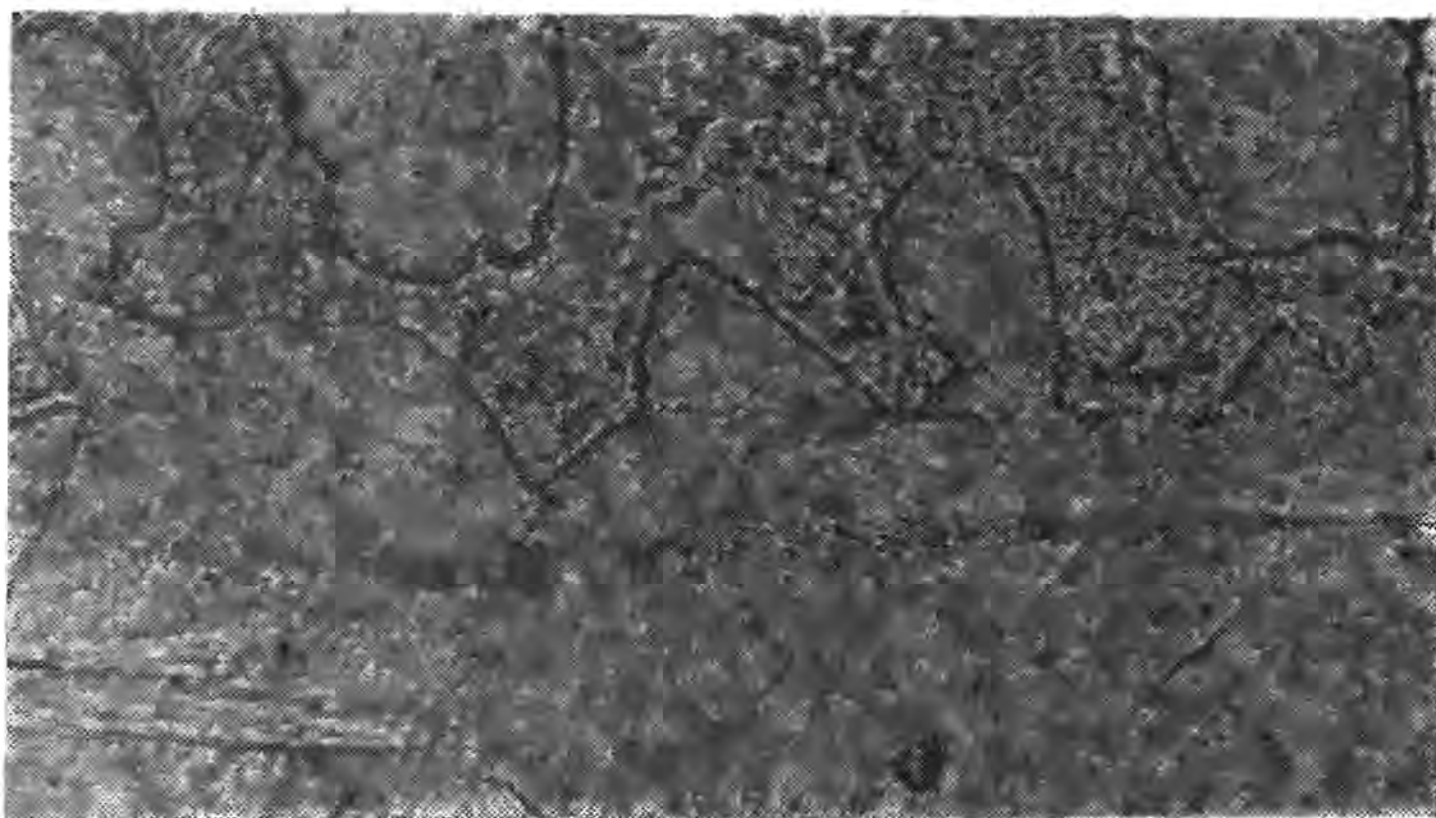


Рис. 61. Ориентированная кристаллизация при контактно-реакционной пайке кобальта с ниобием при температуре 1235°C , выдержка 1 мин, $\times 1000$

Особенностью кристаллизации металла в паяных швах является также выраженная ликвация. Кристаллизация в условиях пайки приводит к увеличению степени ликвации по сравнению со сплавом того же состава, но кристаллизующимся в большем объеме. Это увеличение в системе железо—медь составляет 20%, в системе медь—серебро 9%, в системе алюминий—цинк 10%.

При рассмотрении ликвации в каком-то объеме металла различают зональную неоднородность, проявляющуюся в виде скоплений отдельных компонентов в макроскопических зонах, и внутрикристаллическую, или микроскопическую, ликвацию, характеризующуюся химической неоднородностью в пределах кристаллита. Зональная ликвация в паяных швах в системах, обладающих взаимной растворимостью, прежде всего связана с кристаллизацией на поверхности основного металла твердого раствора и с оттеснением более легкоплавкой составляющей зоны сплавления к центральной части шва. На поверхности основного металла кристаллизуются дендритные образования, по составу отвечающие солидусу системы при температуре пайки.

Из внутрикристаллических типов ликвации наиболее известна дендритная, когда состав оси дендрита резко отличается от состава его межосных прослоек.

Ликвация при пайке отличается от ликвации, например, при сварке и литье тем, что она связана с неравномерным плавлением припоя, активным взаимодействием последнего с основным металлом разделительной¹ диффузией при кристаллизации, поверхностными явлениями и т. д. Расплавленный припой неравномерно взаимодействует с основным металлом по поверхности контакта. Это объясняется неодновременным расплавлением припоя. Эвтектическая составляющая его плавится в первую очередь и растекается по основному металлу. Дальнейший нагрев ведет к расплавлению новых порций припоя, обогащенных тугоплавкими компонентами; сплав же, наиболее близкий по составу к эвтектике, постоянно располагается по периферии, вызывая в отдельных случаях значительную эрозию основного металла. Кроме того, количество расплавленного припоя у входной галтели больше, чем у выходной, поэтому в образовавшемся в результате взаимодействия припоя с основным металлом сплаве у входной галтели большее содержание припоя, чем у выходной, обогащенной основным металлом. По результатам микрорентгеноспектрального анализа распределения меди вдоль шва при пайке никеля медью в вакууме 10^{-3} мм рт. ст. содержание меди у входной галтели приблизительно на 15% выше. Капиллярный участок шва обеднен медью, что связано с незначительным количеством припоя в зазоре, растворением никеля и интенсивной диффузией меди в основной металл. С увеличением температуры пайки и времени выдержки при постоянном зазоре обеднение припоем как капиллярного участка шва, так и галтелей усиливается. Наоборот, увеличение соединительного зазора приводит к повышению количества припоя в шве, что в свою очередь ведет к возрастанию его содержания в зоне сплавления и повышению равномерности распределения припоя по длине шва.

По ширине шва распределение меди при пайке никеля также неравномерно. Наиболее высокое содержание меди в центре шва, наиболее низкое — по границам с основным металлом.

Рассмотренный случай зональной ликвации при пайке никеля медью, когда основным металлом и припой образуют непрерывный ряд твердых растворов, является наиболее простым. Если взаимодействие основного металла с припоем в процессе пайки приводит к образованию ограниченных твердых растворов, интерметаллических соединений, эвтектических смесей, то ликвация носит более сложный характер. В зависимости от состава основного металла и припоя в процессе кристаллизации как зональная, так и дендрит-

¹ Разделительной диффузией называется процесс перераспределения атомов разного рода на фронте кристаллизации, в результате которого между образующейся твердой и жидкой фазами возникает равновесная разность концентраций, определяемая расстоянием между ликвидусом и солидусом диаграммы состояния при данной температуре.

ная ликвация могут являться следствием не только неоднородного состава жидкой фазы, но и разделительной диффузии при кристаллизации.

Характер кристаллизации в зоне сплавления изменяется в зависимости от величины зазора, определяющего количество жидкой фазы. Так, при пайке железа Армко медью в среде водорода в больших зазорах порядка 0,5—2 мм кристаллизация происходит с образованием развитой дендритной структуры. При зазорах 0,4—0,3 мм затвердевание идет путем образования и роста крупных ячеистых кристаллов на границе с железом и разветвленных кристаллов в центре шва. С уменьшением зазора преобладающей становится

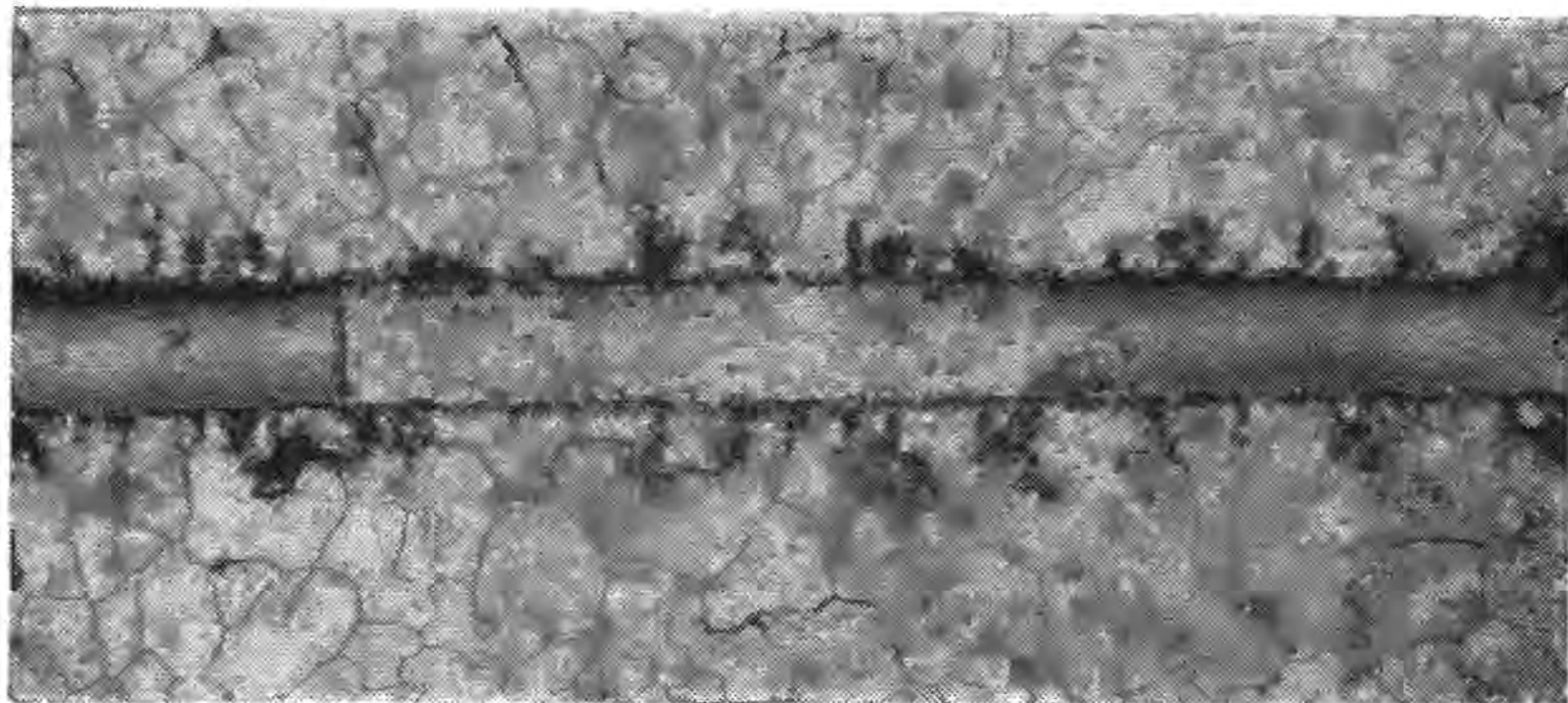


Рис. 62. Микроструктура шва при пайке железа-армко медью в водороде. Температура пайки 1100° С, выдержка 1 мин, $\times 200$

ячеистая форма затвердевания. При зазоре 0,05 мм кристаллизация происходит путем перемещения почти плоской границы кристалл—расплав (рис. 62) с образованием одного ряда плоских зерен по ширине шва.

Смена форм затвердевания вызывается изменением условий кристаллизации. Согласно существующим представлениям, кристаллизация сплавов определяется градиентом температуры расплава, а также величиной и протяженностью области концентрационного переохлаждения вблизи фронта кристаллизации. При прочих равных условиях уменьшение зазора, а следовательно, толщины слоя кристаллизующейся жидкости, начиная с определенного момента, приводит к таким изменениям указанных факторов, что дендритная форма кристаллов постепенно уступает место ячеистой, а последняя — преобладающему росту кристаллов с гладкой поверхностью. Следует отметить, что окончательная кристаллическая структура металла зоны сплавления не соответствует первоначальным формам роста кристаллов. Новые прямолинейные границы зерен в шве пересекают в произвольных направлениях дендритные и ячеистые кристаллы.

Смена форм затвердевания в шве в зависимости от зазора происходит и при пайке многокомпонентными припоями.

Основной особенностью кристаллизации с образованием одного ряда зерен является отсутствие присущего пайке разделения компонентов в зоне сплавления. В результате в этом случае ослабленная центральная часть зоны сплавления, играющая роль надреза в шве, отсутствует. Такая форма кристаллизации обеспечивает высокую прочность соединения.

Причиной значительного повышения прочности паяного соединения при образовании одного ряда плоских зерен в шве наряду с отсутствием надреза в зоне сплавления является аномальная растворимость основного металла в зоне сплавления. Так, при пайке железа медью при зазоре 0,05 мм содержание железа в шве, согласно данным микрорентгеноструктурного анализа, достигает 7% при равновесном составе жидкой фазы при 1100° С, отвечающей 2,8% Fe.

Ф р о н т к р и с т а л л и з а ц и и и ф о р м а к р и с т а л л о в. При затвердевании металлов и сплавов типа твердых растворов фронт кристаллизации может быть плоским и дендритным. Дендритная структура сплавов сходна со структурой дендритов в чистых металлах. Отличие состоит лишь в том, что в дендритах сплавов имеется субструктура, напоминающая ячеистую. В сплавах, кроме того, ячеистым может быть и фронт кристаллизации. Структура сплава при ячеистой кристаллизации состоит из параллельных элементов, имеющих форму стержней, расположенных в направлении кристаллизации. С увеличением термического или концентрационного переохлаждения ячеистая структура может переходить в дендритную, и наоборот. В условиях незначительного переохлаждения как в чистых металлах, так и в сплавах фронт кристаллизации плоский.

Поскольку эвтектики могут быть смесью твердых растворов, кристаллы которых растут совместно, то фронт кристаллизации при затвердевании эвтектик не может быть плоским. При этом если эвтектики пластинчатого и стержневого типа образуются в результате зарождения и роста кристаллов двух фаз, обладающих правильным расположением составляющих и общей поверхностью раздела с жидкой фазой, то процесс кристаллизации эвтектик глобулярного и игольчатого типа более сложен. Впереди фронта кристаллизации в них происходит непрерывное гетерогенное зарождение центров кристаллизации, что приводит к произвольной ориентировке частиц второй фазы по отношению к матрице. Структуру эвтектики в шве, образовавшейся в результате контактного плавления меди с серебром, можно видеть на рис. 63.

При пайке кристаллизация в первую очередь идет на подложку, в результате в шве при наличии интервала кристаллизации у затвердевающего расплава образуются прикристаллизованные слои, обогащенные тугоплавким компонентом (рис. 64).

Необходимо отметить, что и для роста кристаллов непосредственно из расплава условия пайки весьма благоприятны ввиду большого числа центров кристаллизации из-за растворения окисных пленок и основного металла, наличия остатков флюса при флюсовой пайке, присутствия различных примесей и т. д. При кристаллизации



Рис. 63. Микроструктура шва при контактно-реакционной пайке меди с серебром в водороде. Температура пайки 779°C , выдержка 0,5 мин, $\times 500$

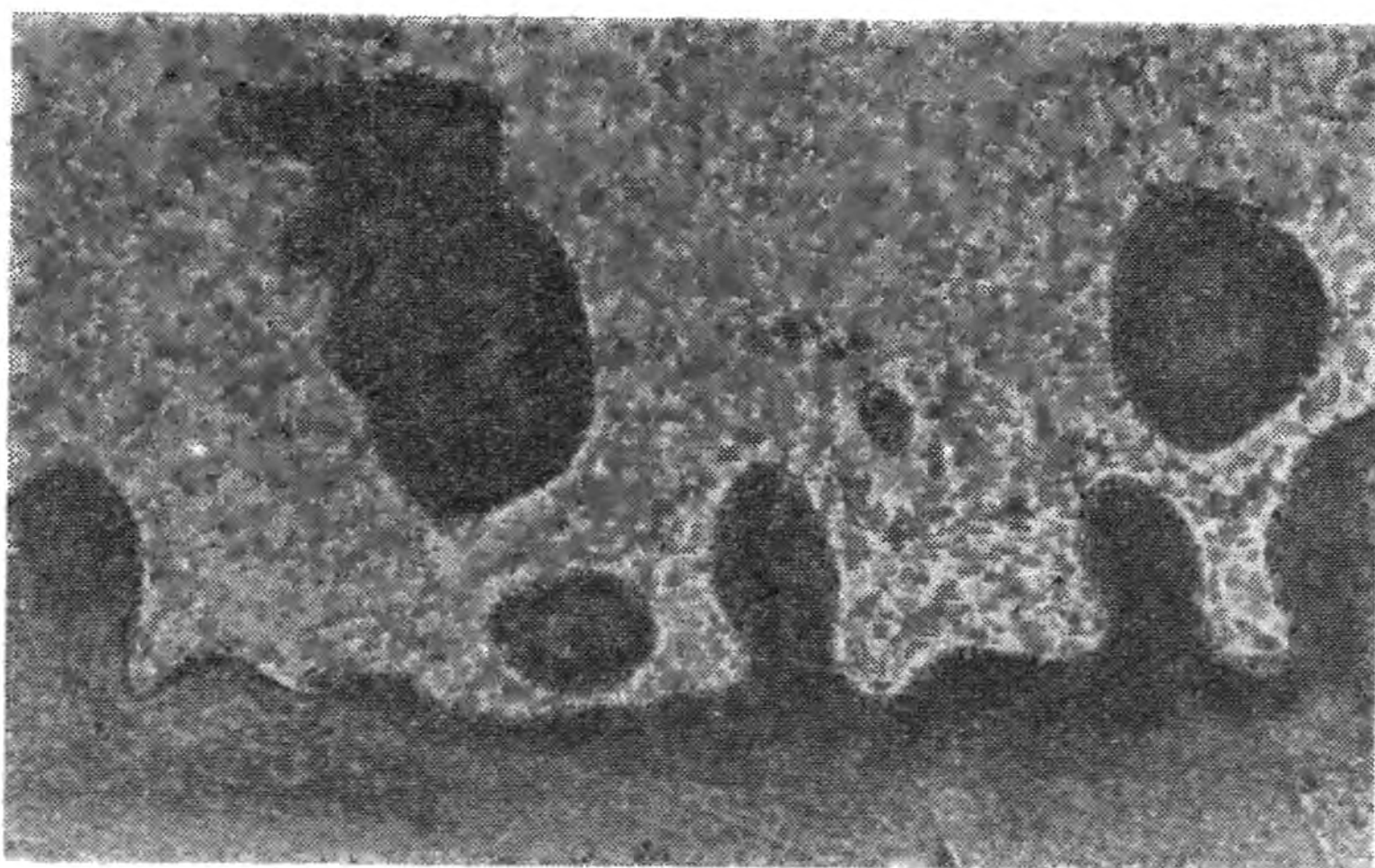


Рис. 64. Зона спая при контактно-реакционной пайке меди с серебром в водороде. Температура пайки 900°C , выдержка 3 мин, $\times 100$

однокомпонентных припоев критический размер зародыша определяется температурой переохлаждения, в сплавах он зависит еще в значительной степени от концентрации жидкого раствора. Критический размер зародыша при данной температуре тем меньше, чем больше степень пересыщения жидкого раствора относительно равновесной линии ликвидуса. Если размер зародыша имеет величину, равную или более критической, то при соответствующих условиях начинается рост кристалла, при этом если кристалл имеет свободный рост, то он приобретает правильную геометрическую форму. Когда же отдельные растущие кристаллы соприкасаются, свободный рост прекращается, происходит их сращивание. В отличие от кристаллов правильной геометрической формы такие частицы называют кристаллитами или зернами. Срастание кристаллов при дендритной кристаллизации приводит также к образованию частиц неправильной геометрической формы.

При исследовании микроструктур паяных швов в зоне сплавления можно наблюдать образование самых различных форм кристаллов. При анализе причин их образования необходимо учитывать условия кристаллизации. При малых степенях переохлаждения с наименьшей скоростью растут грани кристаллов, имеющие более низкое поверхностное натяжение, и поэтому они составляют равновесную форму огранки кристалла. При значительном переохлаждении эти грани имеют наибольшую скорость роста и определяют кристаллографическую ориентировку осей дендритов. Внешняя форма кристаллов при больших переохлаждениях определяется, по-видимому, не столько соотношением скоростей роста различных граней, сколько условиями теплоотвода и процессами диффузии. Переход от ограненной формы кристалла к дендритной связан с интенсивностью диффузионных процессов в жидкой фазе. Если процессы диффузии замедлены, интенсивность их вблизи углов и ребер кристалла приблизительно одинакова и кристалл растет, имея правильную огранку. При большой интенсивности диффузионных процессов вблизи различных участков кристалла диффузия протекает по-разному и будет происходить дендритная кристаллизация, причем чем интенсивнее диффузия, тем разветвленнее дендриты. При высокотемпературной пайке дендритную кристаллизацию можно наблюдать во всем объеме зоны сплавления.

При кристаллизации эвтектик, как установлено А. А. Бочваром, в переохлажденной жидкости самопроизвольно зарождаются и порознь растут кристаллы каждой из фаз, образующих эвтектику. Непосредственно эвтектическая кристаллизация начинается только в момент соприкосновения двух кристалликов различных фаз. Процесс эвтектической кристаллизации после этого начинает протекать с гораздо большей скоростью, чем кристаллизация отдельных фаз в жидкости эвтектического состава. При образовании в жидкости раздельно кристаллов двух фаз, т. е. до начала собственно эвтектической кристаллизации, состав жидкости при взаимодействии с первичными кристаллами может претерпевать значительные изменения. После начала эвтектической кристаллизации, несмотря на наличие

стыка кристаллов двух различных фаз на границе твердая эвтектика — жидкость, происходит преимущественное выделение одной из фаз, а пограничный слой обогащается второй фазой. В результате одна из фаз создает скелет эвтектического кристаллита (ведущая фаза), а другая отлагается в межосных пространствах этого скелета (ведомая фаза). В сплавах, имеющих избыток вещества, образующего ведомую фазу, последняя может стать ведущей, если не во всем объеме кристаллизующейся жидкости, то в отдельных местах. Ведущая роль одной из фаз определяется ее линейной скоростью кристаллизации.

Таким образом, сущность эвтектической кристаллизации состоит в диффузионном разделении однородной жидкости на смесь кристаллов двух видов. Разделение это происходит в результате перемещения частиц одной фазы к одним

центрам кристаллизации, а другой — к другим центрам кристаллизации.

Равновесная кристаллизация. При равновесной кристаллизации процесс перехода из жидкого в твердое состояние происходит при бесконечно малых скоростях охлаждения и описывается равновесной диаграммой состояния. Если основной металл ¹ А и припой В образуют между собой сплавы с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии (рис. 65)

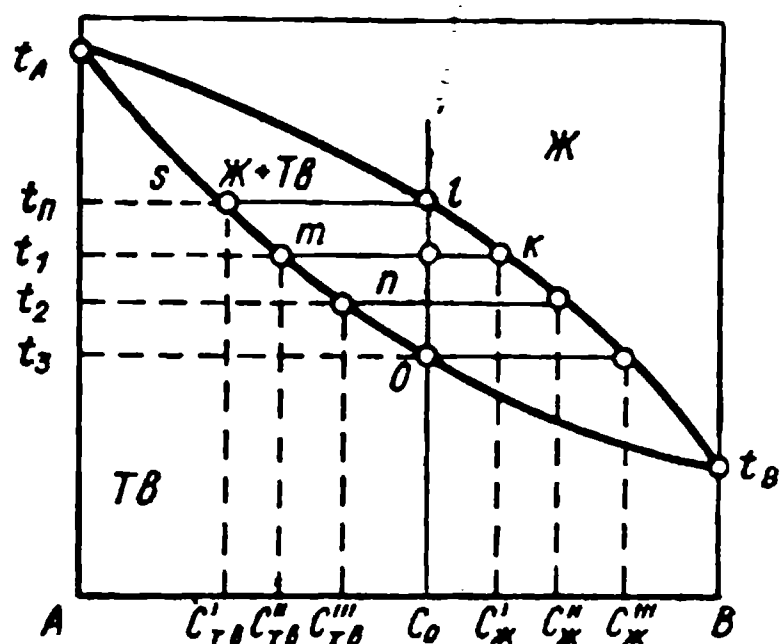


Рис. 65. Схема-диаграмма состояния металлов с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии

и при температуре пайки t_n состав жидкой составляющей, заполняющей соединительный зазор, отвечает равновесному ликвидусу (точке l), граница основной металл—зона сплавления — солидусу диаграммы состояния (точка s), то для кристаллизации в зоне сплавления (при отсутствии изотермической кристаллизации) требуется снижать температуру по сравнению с температурой пайки. Для сплава состава C_0 , отвечающего точке l , снижение температуры наибольшее. Для жидких сплавов других составов интервал, в котором произойдет их полное затвердевание, уменьшается. Экспериментально установлено, что в ходе кристаллизации в шве твердая фаза выделяется как на подложку, т. е. на поверхность основного металла, так и непосредственно в расплаве.

В процессе охлаждения соединения после пайки происходит изменение состава и количества жидкой и твердой фаз в зоне сплавления. При температуре $t_1 < t_n$ составу жидкой и твердой фаз отвечают соответственно точки k и m . Если при охлаждении в точке l выпадет кристалл состава C'_{TB} , то при температуре t_1 — состава C''_{TB} , при температуре t_2 — состава C'''_{TB} и так до точки 0 , соответствующей полному затвердеванию. При этом концентрация твердого

¹ Рассматривается взаимодействие чистых металлов.

раствора непрерывно приближается к концентрации исходного жидкого сплава, соответствующей C_0 . Состав же жидкой фазы при кристаллизации изменяется от C_0 до C''_k , проходя все промежуточные состояния между ними. При конечной температуре t_3 сплав затвердевает в однородный твердый раствор того же самого состава C_0 , что и исходный жидкий раствор.

Таким образом, при равновесной кристаллизации со снижением температуры расплава состав жидкого и твердого раствора в зоне сплавления шва непрерывно изменяется.

Из жидкой фазы постоянно выделяется твердый раствор, изменяя ее состав, а выделившийся ранее при более высокой температуре твердый раствор изменяет свой состав, взаимодействуя с жидкой фазой.

Эти процессы взаимосвязаны и протекают при активной диффузии в жидкой и твердой фазах. При постоянной температуре состав жидкой и твердой фаз неизменен и перераспределения компонентов между ними не происходит.

Равновесный процесс кристаллизации возможен, если между твердой и жидкой фазами имеется динамическое равновесие и в процессе затвердевания происходит диффузионное выравнивание концентраций твердой и жидкой фаз.

Н е р а в н о в е с н а я к р и с т а л л и з а ц и я . В действительности процесс кристаллизации при пайке далек от этой идеальной схемы, что в первую очередь связано с направленным теплоотводом, незначительным количеством жидкой фазы в шве, активным взаимодействием в зонах спаев и большой скоростью охлаждения. В результате в шве не достигается равномерное распределение компонентов. Направленный теплоотвод в сторону основного металла приводит к тому, что образующаяся при кристаллизации твердая фаза отлагается на поверхности основного металла и изолируется от взаимодействия с жидкой фазой. Поэтому диффузионного выравнивания ее состав практически не происходит.

Таким образом, фронты кристаллизации в шве распространяются в направлении от основного металла к центральной части зоны сплавления, т. е. происходит двусторонняя направленная кристаллизация. При этом на основном металле выделяется твердый раствор переменной концентрации с постепенным уменьшением содержания в нем основного металла. Поскольку диффузионного выравнивания состава при неравновесной кристаллизации не достигается, то в жидкой фазе у фронта кристаллизации постепенно увеличивается содержание припоя и уменьшается содержание основного металла. В результате компоненты в шве распределяются слоями, параллельными поверхности основного металла, а в многокомпонентных припоях, кроме того, легкоплавкая и малопрочная фаза оттесняется в центральную часть шва.

При неравновесной кристаллизации в шве сплавов из тех же компонентов A и B , обладающих неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии, массу припоя в жидкой фазе при температуре $t + dt$, если не происходит диффузионного выравни-

вания состава фаз, можно выразить следующей формулой:

$$M_{t+dt} = C_{\text{ж}} \cdot m,$$

где $C_{\text{ж}}$ — концентрация припоя в жидкой фазе;
 m — количество затвердевающей жидкости.

При снижении температуры затвердевания до значения t масса припоя в жидкой фазе составит

$$M_t = (C_{\text{ж}} - dC_{\text{ж}}) (m - dm),$$

где $dC_{\text{ж}}$ — снижение концентрации припоя в жидкой фазе;
 dm — уменьшение массы жидкой фазы.

За счет уменьшения жидкой фазы в шве образуется твердая фаза в количестве dm с концентрацией припоя $C_{\text{ТВ}}$.

Поскольку общее содержание припоя при этом не изменяется, то

$$M_{t+dt} = M_t + C_{\text{ТВ}} dm$$

или

$$C_{\text{ж}} m = (C_{\text{ж}} - dC_{\text{ж}}) (m - dm) + C_{\text{ТВ}} dm.$$

Преобразуя это выражение и пренебрегая бесконечно малой величиной второго порядка, получим

$$\frac{dm}{m} = \frac{dC_{\text{ж}}}{C_{\text{ТВ}} - C_{\text{ж}}}$$

или после интегрирования имеем

$$\ln \frac{m_0}{m} = \int_{C_{\text{ж}}}^{C_{\text{ж}} = C_0} \frac{dC_{\text{ж}}}{C_{\text{ТВ}} - C_{\text{ж}}},$$

где m_0 — масса жидкости в начале кристаллизации;

C_0 — концентрация припоя в начале кристаллизации.

Кристаллизация завершается при $m = 0$, тогда

$$\int_{C_{\text{ж}}}^{C_{\text{ж}} = C_0} \frac{dC_{\text{ж}}}{C_{\text{ТВ}} - C_{\text{ж}}} = \infty.$$

Это означает, что при отсутствии диффузионного выравнивания состава твердой и жидкой фаз компоненты A и B разделяются. При исходном содержании припоя в жидкой фазе ($C_{\text{ж}} = C_0$) образующаяся при кристаллизации твердая фаза имеет концентрацию от $C_{\text{ТВ}}$ на поверхности основного металла до $C_{\text{ТВ}} \approx C_{\text{ж}}$ в центральной части зоны сплавления.

Для определения концентрации припоя в кристаллизующемся твердом растворе необходимо знать зависимость

$$C_{\text{ТВ}} = f(C_{\text{ж}}).$$

Если принять, что концентрация припоя (компонент B) в твердом и жидком растворах определяется равновесным коэффициентом распределения K_0^* , то $C_{ТВ} = K_0 C_{Ж}$.

Поскольку в условиях пайки припой понижает температуру плавления сплава, образующегося при взаимодействии его с основным металлом, то при кристаллизации зоны сплавления концентрация припоя в жидкой фазе будет выше, чем в образующихся кристаллах твердой фазы, и равновесный коэффициент распределения припоя будет меньше единицы. В начале кристаллизации твердый раствор обогащен основным металлом, в конце кристаллизации — припоем. При этом чем больше равновесный коэффициент распределения K_0 будет отличаться от единицы при $C_{Ж} = C_0$, тем больше концентрация припоя в кристаллах $C_{ТВ}$ будет отличаться от C_0 . С повышением скорости охлаждения разделение компонентов при направленной кристаллизации уменьшается и при определенной степени переохлаждения возможна бездиффузионная кристаллизация в шве, при которой образующаяся из жидкости твердая фаза соответствует ей по составу. Возможность бездиффузионной кристаллизации может быть оценена по свободной энергии Гиббса жидкой и твердой фаз (рис. 66). При переохлаждении расплава любого состава до температур, соответствующих линии равных потенциалов жидкого и твердого растворов $t_A—t_0$, значение изобарно-изотермического потенциала твердого раствора $Z_{ТВ}$ будет больше изобарно-изотермического потенциала жидкого раствора $Z_{Ж}$ для состава I , и кристаллизация в этом интервале температур может идти только диффузионным путем. При переохлаждении расплава ниже линии $t_A—t_0$ соотношение свободной энергии Гиббса жидкой и твердой фаз будет обратное. Переохлаждение ниже линии равных значений свободной энергии жидкой и твердой фаз (состав II) делает кинетически более выгодным бездиффузионный процесс кристаллизации, приводящий жидкость в метастабильное состояние $Z''_{ТВ}$ вместо стабильного Z'_C , характеризующегося более низким значением свободной энергии.

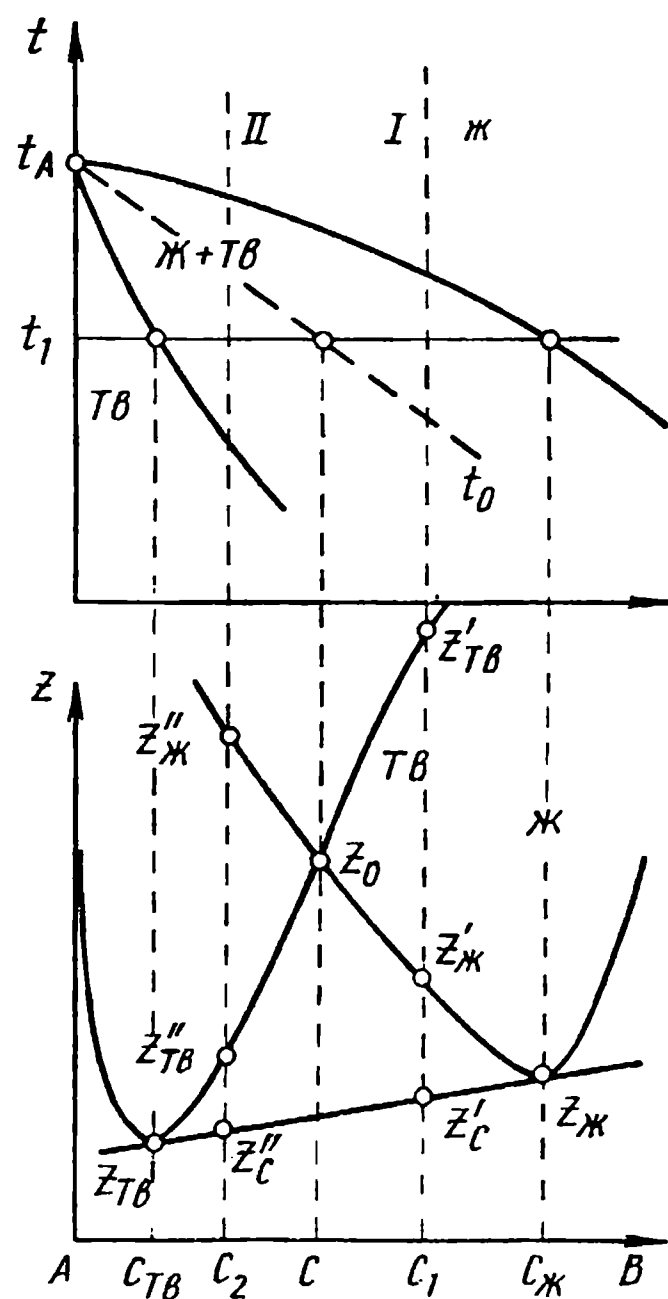


Рис. 66. Участок диаграммы состояния металлов, образующих неограниченные твердые растворы и кривые изобарно-изотермических потенциалов жидкой и твердой фаз при температуре t_1

* Коэффициентом распределения называется отношение концентрации компонента в твердой фазе к концентрации его в жидкой фазе. Его можно выразить через концентрацию как компонента A , так и компонента B .

Рассмотренный случай неравновесной кристаллизации при пайке является простейшим. Поскольку основной металл и припой в реальных условиях — это обычно многокомпонентные сплавы, а в процессе образования соединения протекают реакции взаимодействия не только между металлами, но и между металлами и газовыми средами, флюсами, окисными и шлаковыми пленками, то кристаллизация образующегося при этом в шве сплава представляет более сложный процесс.

Для изучения процессов, протекающих при кристаллизации в паяных швах, используют экспериментальные методы: металлографический анализ с применением светового и электронного микроскопов, микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы, измерение микротвердости отдельных фаз в шве и др. Получаемые при этом данные позволяют направленно изменять составы припоев, режимы и условия пайки с целью повышения прочностных и других характеристик паяных соединений.

Глава IV

ПАЯЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ И ПРИПОИ

§ 1. Паяемые конструкционные материалы

В паяных конструкциях в основном применяют стали всех типов, чугуны, никелевые сплавы (жаропрочные, жаростойкие, кислотоустойкие), медь и ее сплавы, а также легкие сплавы на основе титана, алюминия, магния и бериллия. Ограниченное применение имеют сплавы на основе тугоплавких металлов: хрома, ниобия, молибдена, тантала и вольфрама.

Современные методы пайки обеспечивают соединение конструкционных материалов с различными физико-химическими свойствами при сохранении неизменными или с незначительным изменением исходных свойств материала после пайки.

Для учета степени разупрочнения основного металла после пайки необходимо знать, как изменяются его механические свойства в результате нагрева до температуры пайки. Такая оценка в настоящее время возможна только на основе экспериментальных данных применительно к конкретному конструкционному материалу. Так, оценку степени разупрочнения алюминиевых сплавов в результате охлаждения после пайки на воздухе можно провести по следующим эмпирическим формулам: для сплавов типа АМц (деформируемый) и АЛ4 (литейный), нагреваемых в интервале 480—540° С:

$$\sigma_b^p \geq 0,25 (3\sigma_b^t + \sigma_b^0);$$

для сплавов типа Д16Т и АК6, нагреваемых в интервале 480—520° С:

$$\sigma_b^p \geq 0,5 (\sigma_b^t + \sigma_b^0),$$

где σ_b^p — предел прочности сплава, частично разупрочненного в результате нагрева при пайке;

σ_b^t — предел прочности сплава в исходном состоянии, т. е. термоупрочненного закалкой и старением;

σ_b^0 — предел прочности сплава в отожженном состоянии.

Конструкционные материалы нагреваются в процессе пайки до температуры ниже точки начала плавления. Предельно допустимую температуру нагрева при пайке можно вычислить по формуле

$$T_{\text{п}} = Kt_{\text{с}},$$

где $T_{\text{п}}$ — температура пайки, °С;

Материал	Марка	Температура плавления (солидус), °С	Температура плавления (ликвидус), °С
Углеродистая деформируемая сталь	08кп	1485	1525
Хромомарганцевокремнистая сталь	30ХГСА	1485	1515
Хромоникелевая сталь	40ХНМА	1485	1490
Нержавеющая хромоникелевая сталь	Х18Н9Т	1400	1500
Жаропрочный никельхромовый сплав	ХН77ТЮ (ЭИ437А)	1400	1430
Жаростойкий никельхромовый сплав	ХН78Т	1380	1440
Жаростойкий и кислотостойкий чугун		1135	1325
Медь	М0, М1	1083	1083
Томпак	Л96	1060	1070
Латунь	Л62	900	920
Бронза	Бр.ОФ6,5-0,25	890	1040
Титановый сплав	BT2	1680	1710
Алюминиевомарганцевый сплав	АМц	600	655
Алюминиевомагниевый сплав . .	АМг6	565	655
Дуралюмин	Д16	550	650
Силумин	АЛ5	577	627
Магниевый деформируемый сплав	МА5	482	602
Магниевый литейный сплав . . .	Мл5	445	602
Цинковый сплав	ЦМ1	419	422
Бериллий	Чистый	1315	1315
Хром	»	1900	1900
Ниобиевый сплав	ВН2	2430	2460
Молибденовый сплав	ВМ1	2600	2620
Тантал	Чистый	2996	2996
Вольфрам	»	3410	3410

t_c — температура начала плавления, т. е. точка солидуса конструкционного материала;

K — коэффициент пропорциональности, значение которого рекомендуется выбирать в пределах 0,85—0,95.

Значения температур плавления некоторых конструкционных материалов, наиболее широко применяемых в паяных изделиях, приведены в табл. 24 [35].

§ 2. Состав и свойства припоев

В качестве припоев для пайки металлов, а также металлов с неметаллическими материалами применяют как чистые металлы, так и сплавы. Чтобы удовлетворять условиям процесса пайки и обеспечить получение качественных паяных соединений, припой должны отвечать следующим требованиям:

1. Иметь температуру плавления ниже температуры плавления паяемых металлов.

2. При температуре пайки хорошо смачивать основной металл и заполнять соединительные зазоры.

3. Обеспечивать получение прочных и коррозионностойких паяных соединений.

4. Иметь близкий с паяемым металлом коэффициент термического расширения.

5. По возможности не содержать дефицитных компонентов.

6. Иметь общедоступную технологию производства и применения.

В настоящее время в технике применяют десятки металлов в чистом виде и тысячи сплавов на их основе, которые могут подвергаться пайке. Однако наибольшее распространение получили сплавы на основе железа, меди, никеля и алюминия, для которых и разработано большинство известных припоев. Другие металлы в паяных конструкциях встречаются значительно реже и для них требуются специальные припои. В машиностроении наибольшее распространение получили припои на основе меди, серебра и никеля.

Припои на основе меди. В качестве таких припоев применяют медь в чистом виде и сплавы меди с цинком, марганцем, фосфором и другими элементами.

Медь в чистом виде широко используют в качестве припоя. В расплавленном состоянии она отличается высокой жидкотекучестью, хорошо смачивает поверхность сталей, твердых сплавов, никеля и никелевых сплавов; хорошо затекает в тончайшие капиллярные зазоры и дает прочные и пластичные паяные соединения. Медь имеет температуру плавления 1083°C и коэффициент линейного расширения $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Предел прочности меди $18—25 \text{ кг/мм}^2$, относительное удлинение $35—40\%$.

В зависимости от требований к паяемому изделию в качестве припоев применяют различные сорта технической меди. Для пайки ответственных конструкций необходимо применять медь с наименьшим содержанием примесей, особенно мышьяка и фосфора, образующих с железом хрупкие соединения. Пайка медью осуществляется главным образом в атмосфере нейтральных и активных газовых сред, а также в вакууме. Медь в качестве припоя применяют для пайки деталей из сталей, вольфрама, никеля и других металлов. При пайке медью никеля и его сплавов образуются прочные и пластичные паяные соединения, однако следует иметь в виду, что припой в этом случае интенсивно взаимодействует с основным металлом и, растворяя его, становится тугоплавким и плохо затекает в зазоры.

Сорта применяемой в качестве припоев меди по ГОСТу 859—66 приведены в табл. 25.

Недостатком меди как припоя является сравнительно высокая температура плавления, что обусловило ее применение главным образом при печной пайке стальных изделий.

Из припоев на основе меди наибольшее распространение получили сплавы меди с цинком.

Марка	Состав, % (по массе)					Назначение
	Cu	примеси не более				
		Bi	Sb	As	другие	
МОО	99,99	0,0005	0,001	0,001	0,0075	Для пайки ответственных де- талей из углеродистых и не- ржавеющих сталей, а также никелевых сплавов То же » » Для пайки менее ответствен- ных деталей из тех же ме- таллов
М0	99,95	0,001	0,002	0,002	0,045	
М1	99,90	0,001	0,002	0,002	0,005	
М2	99,70	0,002	0,005	0,01	0,283	

Медноцинковые припои представляют собой двой-
ные сплавы меди и цинка в различных соотношениях. Диаграмма
состояния сплавов системы медь—цинк приведена на рис. 67. Наи-
больший интерес представляют сплавы, содержащие менее 39%

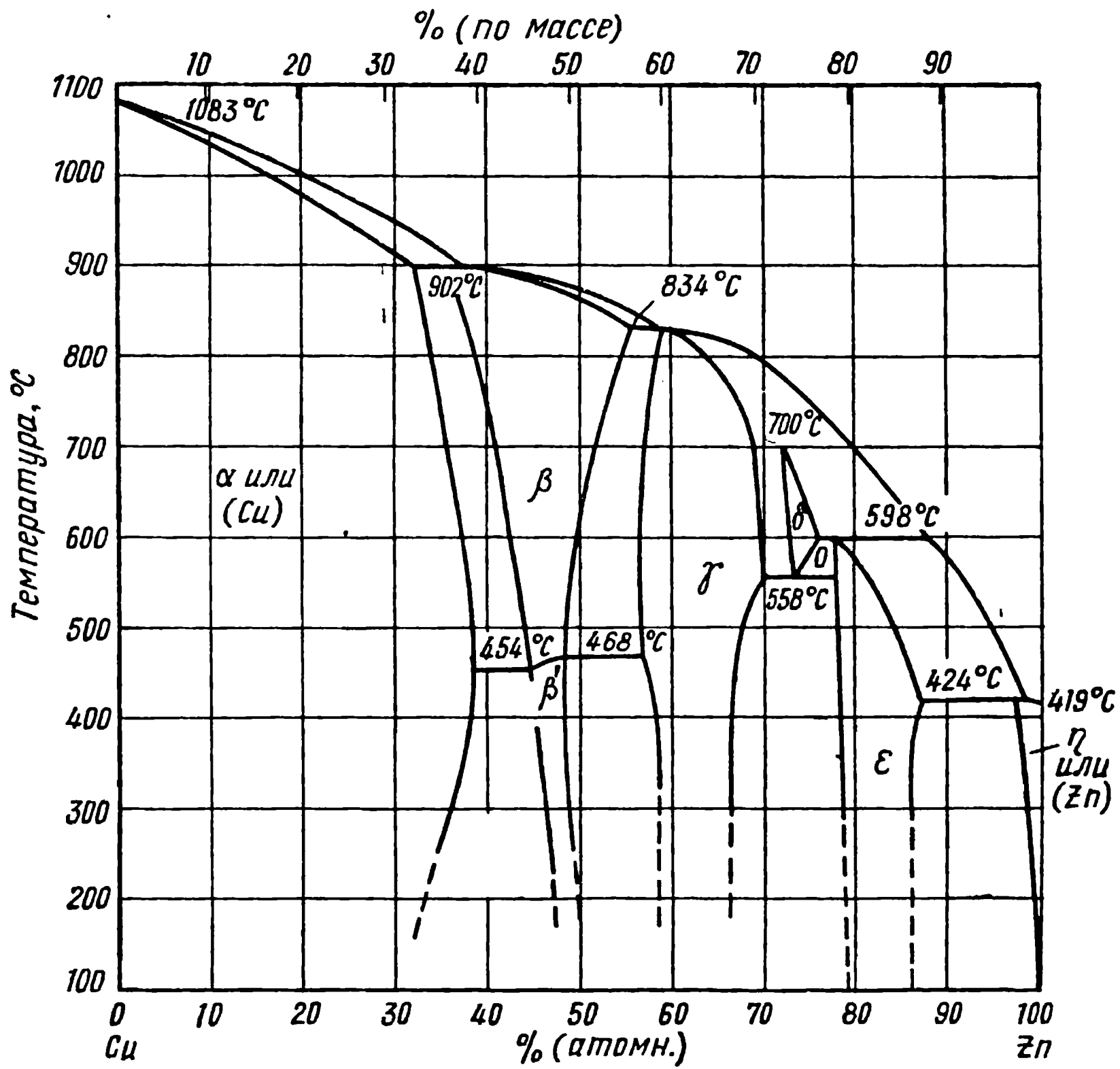


Рис. 67. Диаграмма состояния сплавов системы медь—цинк

цинка и имеющие однофазную структуру α -твердого раствора. С увеличением содержания цинка пластичность припоев значительно снижается, вызывая снижение пластичности паяных соединений.

Наряду с хорошими технологическими свойствами медноцинковые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью. Припой, имеющие структуру α -твердого раствора, сохраняют достаточную прочность даже в условиях глубокого холода. Недостатком этих припоев является испарение цинка при пайке, что ухудшает условия работы с ними и приводит к повышению температуры плавления сплава.

Для снижения температуры плавления и повышения технологических свойств медноцинковых припоев в их состав вводят в небольших количествах олово и кремний. Добавка до 1% Sn снижает температуру плавления и увеличивает жидкотекучесть. Для предупреждения выгорания цинка в состав припоев вводят кремний.

Пайку медноцинковыми припоями обычно проводят с помощью газовых горелок, погружением в соляные ванны и индукционным нагревом. Пайка в печах применяется реже ввиду сильного испарения цинка. Составы и область применения медноцинковых припоев приведены в табл. 26.

Т а б л и ц а 26

Марка припоя	Химический состав, % (по массе) ¹			Температура плавления °C		Назначение
	Cu	примеси не более		соли- дус	лик- видус	
		Fe	Pb			
ПМЦ36 (ГОСТ 1534—42)	36±2	0,1	0,5	800	825	Для пайки латуни, со- держашей до 68% Cu
ПМЦ48 (ГОСТ 1534—42)	48±2	0,1	0,5	850	870	Для пайки медных спла- вов, содержащих >68%Cu
ПМЦ54 (ГОСТ 1534—42)	54±2	0,1	0,5	875	885	Для пайки меди, том- пака, бронзы и сталей
Л63	62—65	0,2	0,07	900	905	Для пайки меди и ста- лей
ЛОК62-06-04 ²	62±1,5	0,2	0,1	900	905	То же

¹ Остальное — цинк. ² 0,6% Sn; 0,4% Si; Zn — остальное.

Припой ПМЦ36 из-за хрупкости (предел прочности 30 кГ/мм², относительное удлинение 1%) в машиностроении не применяют. Припой ПМЦ48 (предел прочности 21 кГ/мм², относительное удлинение 3%) ввиду недостаточной пластичности и низкой вибростойкости паянных им соединений применяется мало.

Наибольшее распространение получили припой Л63 и ЛОК62-06-04, дающие прочные паяные соединения.

Предел прочности припоя Л63 составляет 30 кГ/мм² при относительном удлинении 35%. Припой ЛОК62-06-04, отличающийся

от припоя Л63 лишь добавками олова и кремния, обладает более высокими технологическими свойствами. Наличие кремния уменьшило выгорание цинка в результате образования при пайке на поверхности расплавленного припоя пленки окиси кремния. В результате такого легирования повышается плотность и герметичность паяных швов. Недостатком латуни Л63 как припоя, кроме пониженной жидкотекучести и склонности к выгоранию цинка, является также плохое затекание в зазор. Вследствие испарения цинка пайка медноцинковыми припоями в газовых средах и в вакууме не производится. Для повышения прочности медноцинковых припоев их иногда легируют никелем и марганцем. Повышение жаростойкости достигается также введением небольших количеств железа и алюминия. Медноцинковые припои, легированные этими компонентами, широко применяют при пайке твердосплавного инструмента.

Припои на основе сплавов меди с марганцем обладают сравнительно низкой температурой плавления, достаточно высокой прочностью и пластичностью. Припои этой системы применяют пока редко, но они весьма перспективны так как паянные ими соединения имеют более высокую по сравнению с медноцинковыми припоями прочность при температурах 500—600° С. Диаграмма состояния сплавов системы медь—марганец приведена на рис. 68.

В медномарганцевые припои вводят 10—40% марганца. При введении 10—20% марганца пайку можно производить горелкой. При более высоком содержании марганца во избежание выгорания его в пламени горелки пайку целесообразно проводить в печи с контролируемой атмосферой. Для снижения температуры плавления в эти припои вводят цинк, олово и серебро, а для повышения жаростойкости — железо и никель.

Для пайки сталей и медных сплавов предложен медномарганцевый припой состава: 28% Ni; 28% Mn; 5% Co; 1% Si; 1% Fe; 0,15—0,3% Li; 0,1—0,2% K; 0,5—0,15% Na; 0,15—0,25% B; 0,1—0,2% P, остальное — медь.

Вводимые в этот припой небольшие добавки лития, калия, натрия, бора, фосфора придают ему флюсующие свойства. Литий является наиболее эффективным компонентом, обеспечивающим самофлюсование. Однако припои, содержащие литий, лучше флюсуют во влажной атмосфере, что связано с образованием гидрата окиси лития LiOH, который плавится при температуре 450° С и в жидком состоянии хорошо растворяет почти все известные окислы металлов. Если же пайка производится в сухой атмосфере, то дополнительно необходимо вводить другой элемент, имеющий большое сродство к кислороду. Таким элементом оказался бор, который и вводят в припой совместно с литием.

Меднофосфористые припои. Наряду с медноцинковыми и медномарганцевыми припоями применяют припои на основе сплавов меди с фосфором. Диаграмма состояния системы сплавов медь—фосфор приведена на рис. 69. Наиболее низкой температурой плавления обладает эвтектический сплав меди с 8,4% P, однако,

несмотря на легкоплавкость, его применяют редко ввиду высокой хрупкости и низкой прочности. В качестве меднофосфористых припоев чаще применяют доэвтектические сплавы, содержащие 5—7% Р.

Меднофосфористые припои обладают хорошей смачивающей способностью и большой жидкотекучестью. Их применяют при пайке

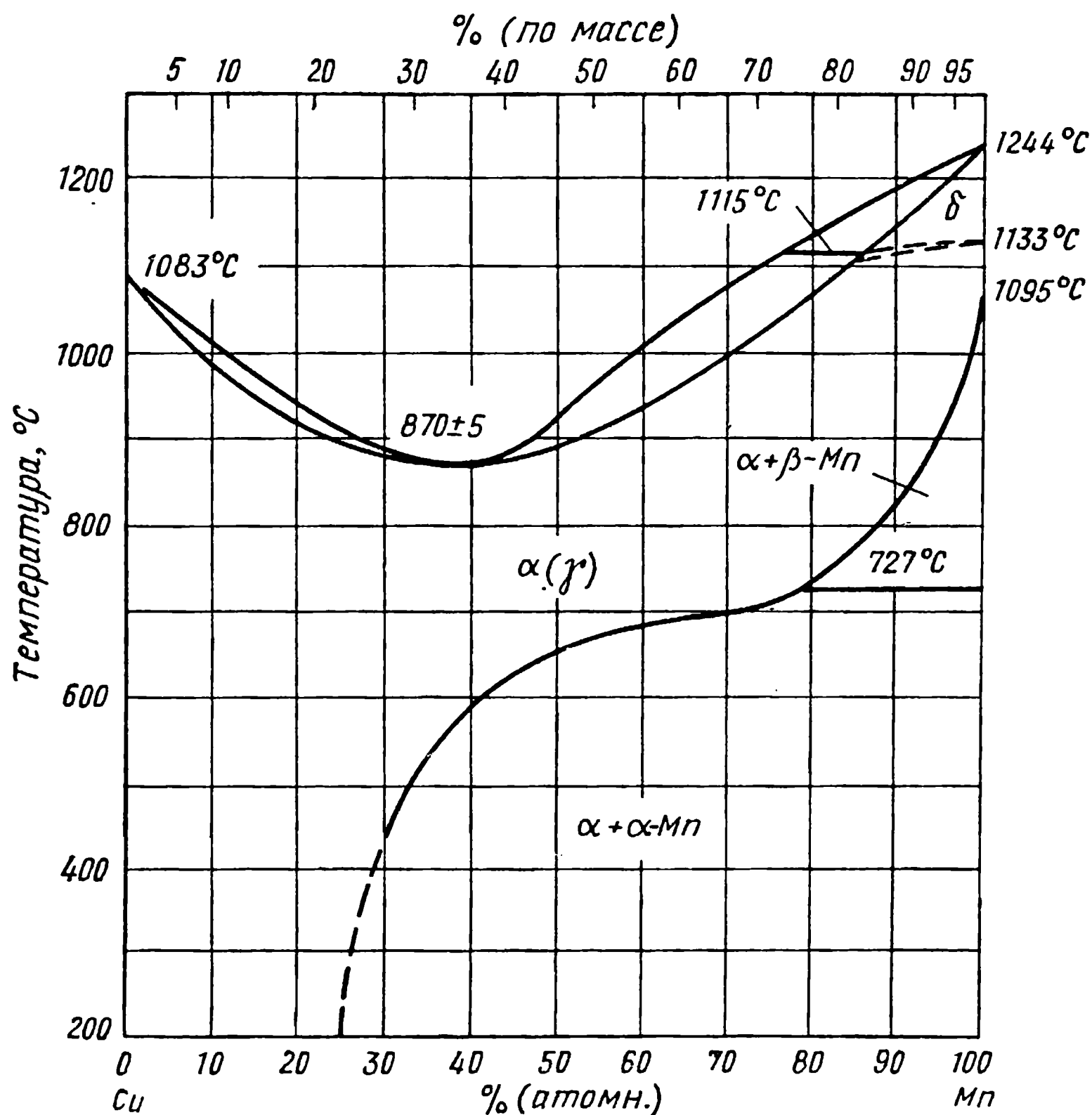


Рис. 68. Диаграмма состояния сплавов системы медь—марганец

медных и бронзовых деталей, работающих в условиях статических нагрузок. При пайке ими сталей в результате взаимодействия железа с содержащейся в припое фосфористой медью образуется фосфористое железо Fe_3P , которое отлагается по границе с основным металлом в виде отдельного хрупкого слоя. Для снижения хрупкости таких соединений сталь иногда предварительно покрывают медью. Меднофосфористые припои благодаря восстановительным свойствам фосфора и флюсующим свойствам образующегося при его окислении фосфорного ангидрида являются самофлюсующими. Составы и область применения некоторых меднофосфористых припоев приведены в табл. 27.

Марка припоя	Химический состав, % (по массе)			Температура плавления, °С		Назначение
	Cu	P	примеси не более	солидус	ликвидус	
—	95	5	—	714	900	Для пайки медных и бронзовых деталей, работающих в условиях статических нагрузок
ПМФ7	Ост.	6,98	0,12	714	860	Для пайки медных трубопроводов

В практике в качестве припоя в некоторых случаях используют меднофосфористую лигатуру, содержащую фосфора в пределах 8,5—10%, что приводит к получению весьма хрупких паяных соединений.

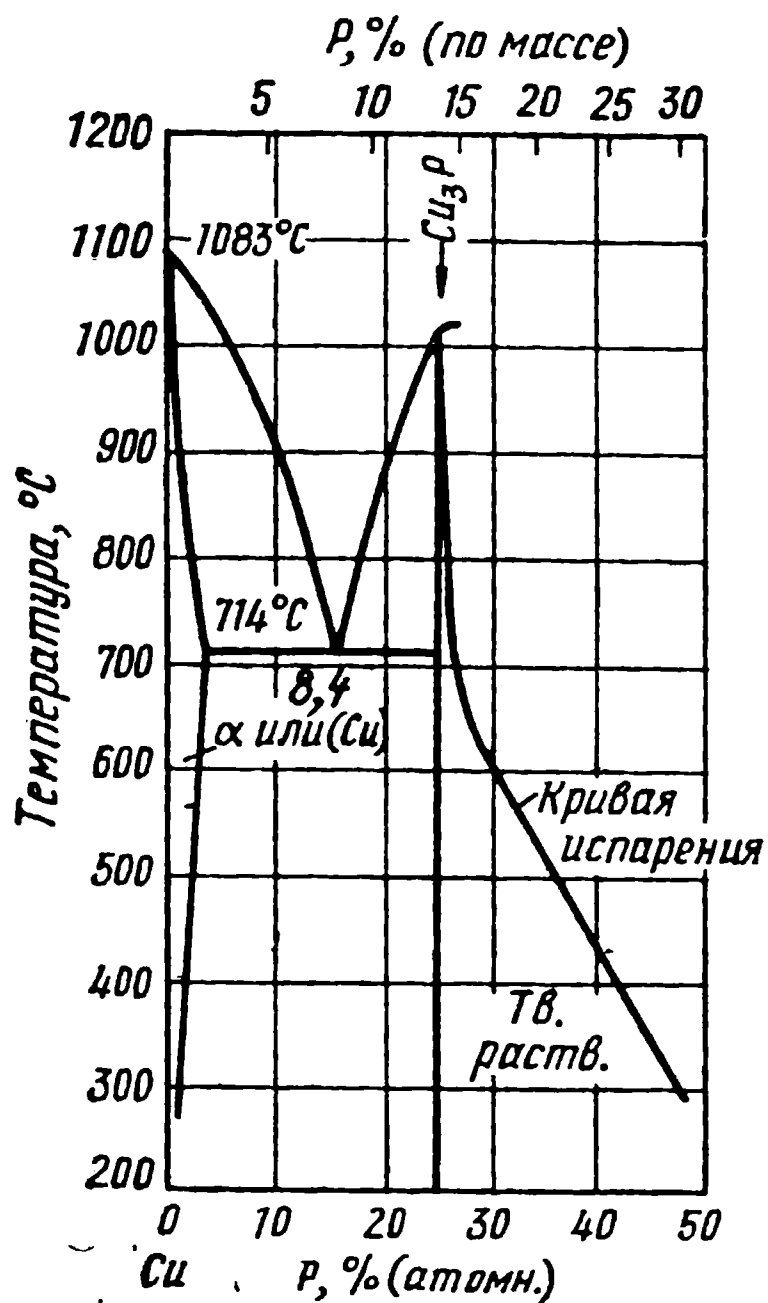


Рис. 69. Диаграмма состояния сплавов системы медь—фосфор

Для увеличения смачивающей способности и уменьшения хрупкости в меднофосфористые припои иногда добавляют серебро. Так, например, припой, содержащий 80% Cu, 5% P, 15% Ag, имеет температуру плавления 640—815° С. Пластичность припоя в результате введения серебра повышается настолько, что из него становится возможным изготавливать проволоку, ленту, фольгу. Этот припой оказался полноценным заменителем серебряных припоев ПСр45 и ПСр25 при пайке меди, бронзы и нейзильбера, однако при пайке сталей он дает хрупкие паяные швы.

Серебряные припои. Серебряные припои благодаря сравнительно низкой температуре плавления, хорошей жидкотекучести, высокой прочности и пластичности получили большое распространение. Предел прочности их составляет 30—50 кг/мм² при относительном удлинении 15—35%. Применение их ограничивается

лишь дефицитностью серебра. В качестве серебряных припоев чаще всего употребляют сплавы серебра с медью, цинком и кадмием. С целью снижения температуры плавления, повышения прочности, экономии серебра, а также улучшения технологических свойств серебряных припоев в них иногда вводятся небольшие добавки фосфора и олова. Серебряные припои применяют главным образом для пайки меди и ее сплавов. Для пайки сталей серебряные припои

применяют в тех случаях, когда нельзя использовать другие припой из-за их высокой температуры плавления. Серебряные припой с успехом можно применять для пайки никеля и его сплавов, а также для соединения этих металлов между собой.

Серебряномедные припой обладают низким омическим сопротивлением, поэтому их применяют для пайки соединений с высокой электропроводностью. Диаграмма состояния сплавов системы серебро—медь приведена на рис. 70. При содержании 28,1% Cu эти металлы образуют эвтектику с температурой плавления 779° С. Растворимость меди в серебре при эвтектической температуре составляет 8,8%, и при 200° С снижается до 0,2%. Составы припоев, пригодных для пайки соединений с высокой электропроводностью, приведены в табл. 28.

Припой ПСр72 не содержит легкоиспаряющихся компонентов, поэтому его можно применять для пайки в газовых средах и вакууме.

Для улучшения смачивающей способности припоев серебро—медь в их состав вводят до 5% Pd, который существенно повышает качество соединений при пайке сталей. Введение в эти припой лития также повышает смачивающую способность припоев по отношению к сталям и медным сплавам. Недостатком припоя ПСр72 является склонность к порообразованию в результате эффекта сфероидизации [36]. Этот дефект особенно проявляется при пайке меди. Легирование припоя ПСр72 кремнием позволяет предотвратить образование пор в шве и повысить прочность соединения. Состав припоя ПСр71 К, не образующего при пайке пор за счет эффекта сфероидизации, следующий: 71,0% Ag; 27,8% Cu; 1,2% Si.

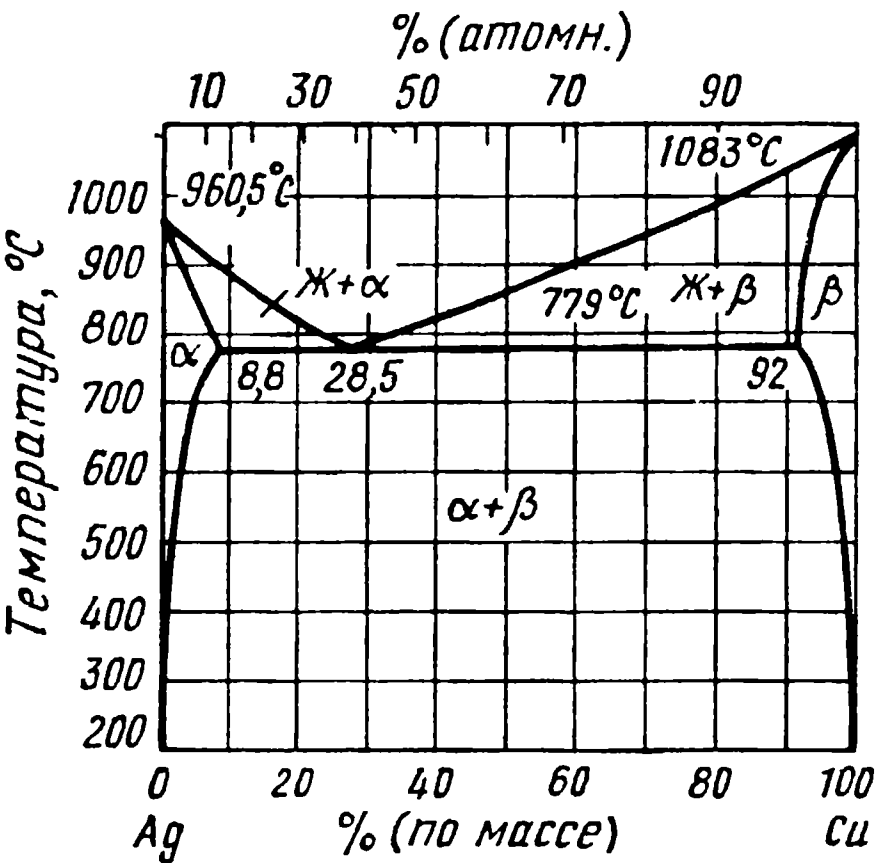


Рис. 70. Диаграмма состояния сплавов системы серебро—медь

Т а б л и ц а 28

Марка припоя	Химический состав, % (по массе) ¹		Температура плавления, °С	
	Ag	примеси не более	солидус	ликвидус
ПСр72	72±0,5	0,25	779	779
ПСр50	50±0,5	0,25	779	850

¹ Остальное медь.

Припои тройной системы серебро—медь—цинк также имеют большое распространение. Поверхности ликвидуса и фазовый состав сплавов системы серебро—медь—цинк приведены на рис. 71. Большинство стандартных серебряных припоев системы серебро—медь—цинк обладает достаточно высокой прочностью и пластичностью. Эти припои применяют для пайки ответственных изделий из сталей, меди и медных сплавов. Пайка производится газовой горелкой,

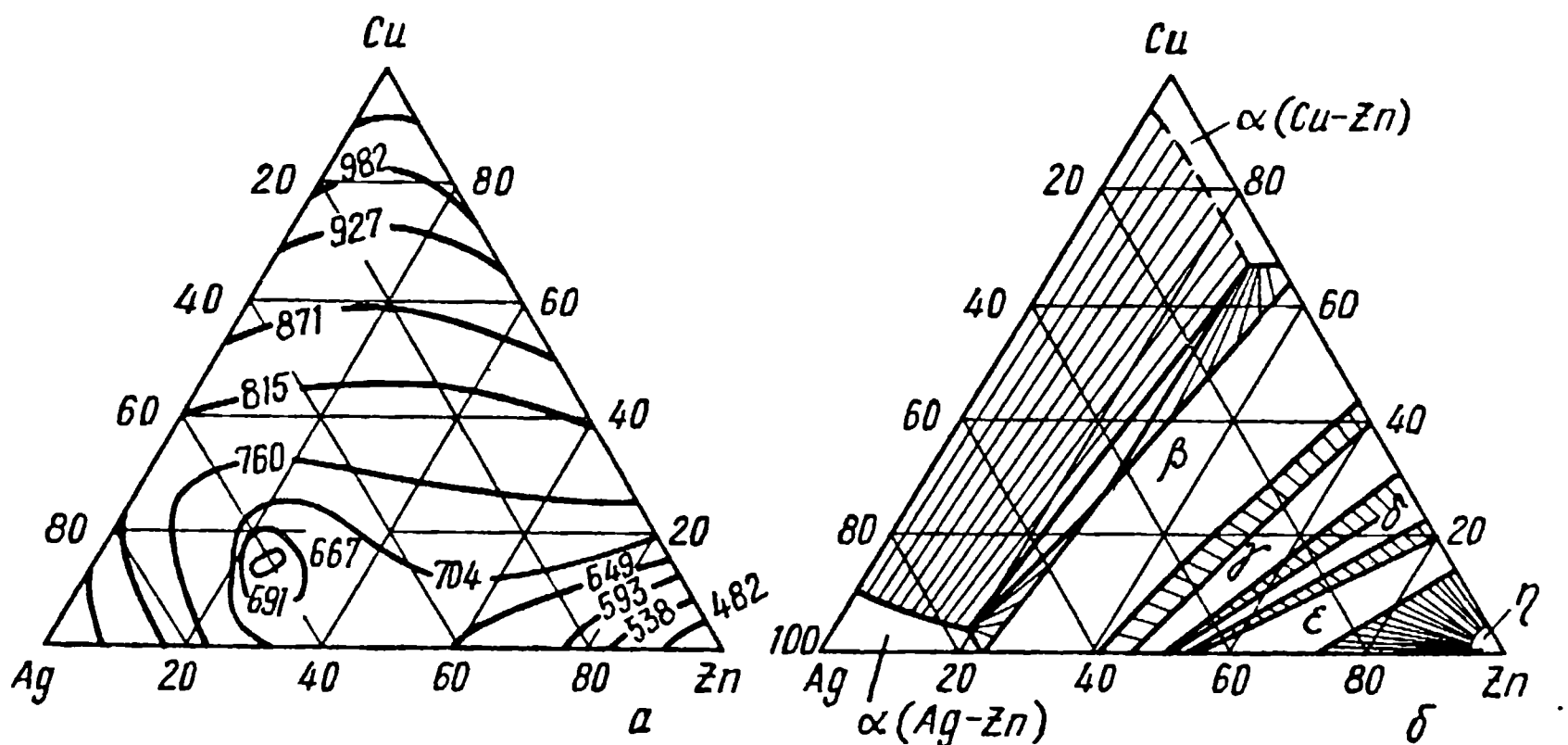


Рис. 71. Поверхности ликвидуса (а) и фазовый состав (б) сплавов системы серебро—медь—цинк

погружением в соляные ванны с индукционным нагревом, а также в печи. Составы по ГОСТ 8190—56 и область применения припоев системы серебро—медь—цинк приведены в табл. 29.

В припои на основе системы сплавов серебро—медь—цинк иногда вводят марганец, который хорошо растворяется в расплавленном серебре и удерживается приблизительно до 25% в твердом растворе. Введение марганца делает эти припои теплостойкими. Так, припой марки ПСр37,5, имеющий состав 37—38% Ag; 47,8—49,8% Cu; 5—6% Zn; 7,9—8,5% Mn, применяют для пайки стальных и медных деталей, работающих при температурах до 600° С. Однако недостатком серебряномарганцевых припоев является низкая коррозионная стойкость в условиях тропиков и солевого тумана.

Наряду с рассмотренными серебряными припоями в качестве припоев широко применяют сплавы системы серебро—медь—цинк—кадмий. Наибольшее распространение из них имеет стандартный припой ПСр40 следующего состава: 39—41% Ag; 16,4—17,4% Cu; 16,6—17,8% Zn и 25—26,5% Cd. Этот припой имеет температуру плавления 595—605° С и применяется для пайки медных и стальных изделий в тех случаях, когда необходимо сохранить прочность закаленной стали или избежать коробления в процессе пайки. Несмотря на легкоплавкость, он обеспечивает получение паяных соединений высокой прочности.

Марка припоя	Химический состав, % (по массе)				Температура плавления °С		Назначение
	Ag	Cu	Zn	примеси не более	сольдус	ликвидус	
ПСр70	$70 \pm 0,5$	$26 \pm 0,5$	4 ± 1	0,5	730	755	Для пайки меди, латуни, бронз, сталей. Обладает высокой электропроводностью
ПСр65	$65 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$15^{+1,0}_{-1,5}$	0,5	740	—	То же, но менее электропроводен
ПСр45	$45 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$25^{+1,0}_{-1,5}$	0,5	660	725	Для пайки меди, латуни, бронз и сталей
ПСр25	$25 \pm 0,3$	40 ± 1	$35^{+1,5}_{-2,0}$	0,5	745	775	То же
ПСр12М	$12 \pm 0,3$	52 ± 1	$36^{+1,5}_{-2,0}$	0,5	780	825	Для пайки меди, бронз и сталей
ПСр10	$10 \pm 0,3$	53 ± 1	$37^{+1,5}_{-2,0}$	0,5	815	850	То же

Припои для пайки жаропрочных сталей и сплавов. Наибольшее распространение в качестве жаропрочных припоев получили сплавы на основе систем никель—хром—марганец и никель—хром—кремний. Одним из наиболее пластичных и жаропрочных припоев первой системы является отечественный припой № 20. Основной компонент этого припоя — хром; он придает ему жаростойкость и жаропрочность. Марганец вводят для снижения температуры плавления. Титан также способствует повышению жаропрочности. Бор улучшает смачивающие свойства припоя.

Кратковременная жаропрочность паяных соединений при 900° С достигает 15 кГ/мм². За рубежом распространены жаропрочные припои системы никель—хром—кремний—бор. Типичным представителем этих припоев является сплав кольманой. Основным достоинством припоев этой системы является их сравнительная легкоплавкость и достаточная жаропрочность, недостатком — хрупкость, а также повышенное растворение основного металла в процессе пайки. Поэтому применение припоев типа кольманой для пайки ответственных, особенно тонкостенных конструкций, нецелесообразно.

В качестве жаропрочных применяют также отечественный припой системы медь—никель марки ВПр1. Этот припой обеспечивает получение пластичных и прочных паяных соединений при пайке нержавеющих сталей. Паянные им детали могут надежно работать до температуры 600° С [37].

Наряду с указанными в последние годы начали применять припой системы никель—хром—палладий, обладающие более высокой пластичностью и жаропрочностью. Однако ввиду дефицитности палладия припой этой системы широкого распространения пока не получили. Составы жаропрочных припоев приведены в табл. 30.

Т а б л и ц а 30

Марка припоя	Химический состав, % (по массе)									Температура плавления, °С	
	Ni	Cr	Mn	Si	Cu	Fe	Ti	C	B	солидус	ликвидус
20	Ост.	14—18	20—25	—	—	—	1,5—2,5	—	0,05—0,1	1050	1180
Кольмановой ВПр1	»	15	—	4,5	—	4,0	—	0,45	3,75	1100	1150
	27—30	—	—	1,5—2	Ост.	<1,5	—	—	0,1—0,3	1080	1120

Припой на железной основе. Для сталей целесообразно применять припой на железной основе, так как при этом снижается интенсивность растворения основного металла в расплаве припоя, сокращается разница в коэффициентах линейного расширения основного металла и припоя, повышается коррозионная стойкость паяных соединений. Однако недостатком припоев на железной основе является их сравнительно высокая температура плавления. Из припоев этой группы наиболее высокими прочностными и технологическими свойствами обладает припой ВЗМИ-49 состава: 14,5—16,0% Mn; 4,5—5,0% Cu; 4,2—4,7% Ni; 3,0—3,5% C; 0,1—0,4% B; 0,1—0,4% Si; 0,1—0,4% Cr; остальное — железо. Температура плавления такого припоя 1070—1100° С. Пайка им сталей успешно протекает в нейтральных и восстановительных газовых средах, а также с применением боратных и окисных флюсов.

Припой для пайки алюминия и его сплавов обычно разделяют на три группы: на основе алюминия, на основе цинка и на основе олова. В состав припоев на алюминиевой основе входят кремний, медь, цинк и другие металлы. Диаграмма состояния системы алюминий—кремний приведена на рис. 72.

Припой на основе алюминия имеют сравнительно высокую температуру плавления. Температура их ликвидуса близка к температуре солидуса многих алюминиевых сплавов, что затрудняет пайку. При пайке в печи в этом случае требуется тщательный контроль за температурой, а при газопламенной или индукционной — высокая квалификация паяльщика. Преимуществом припоев на основе алюминия является высокая коррозионная стойкость и прочность паяных соединений. Например, припой 34А имеет предел прочности 15—18 кг/мм².

Составы и назначение наиболее распространенных припоев на основе алюминия приведены в табл. 31.

Пайка этими припоями осуществляется, как правило, горелкой с применением флюсов типа 34А, а также погружением в соляные ванны, в состав которых входят те же соли, что и во флюс 34А, за исключением хлористого цинка. Наряду с припоями систем алюминий—кремний и алюминий—медь—кремний распространение получили припой систем алюминий—цинк и алюминий—олово. Важной особенностью алюминиевоцинковых припоев является то, что паяные ими соединения можно анодировать, не опасаясь растворения галтелей припоя электролитом.

Припой на основе системы алюминий—цинк при пайке алюминиевых сплавов обеспечивают получение соединений с удовлетворительными прочностными и коррозионными характеристиками, однако они заметно уступают соединениям, паянным припоями на основе систем алюминий—кремний и алюминий—медь—кремний. В качестве алюминиевоцинковых припоев некоторое распространение получили сплавы на основе тройной эвтектики цинк—алюминий—медь. Однако, несмотря на высокие механические и технологические свойства, их практически не применяют из-за отсутствия соответствующих флюсов.

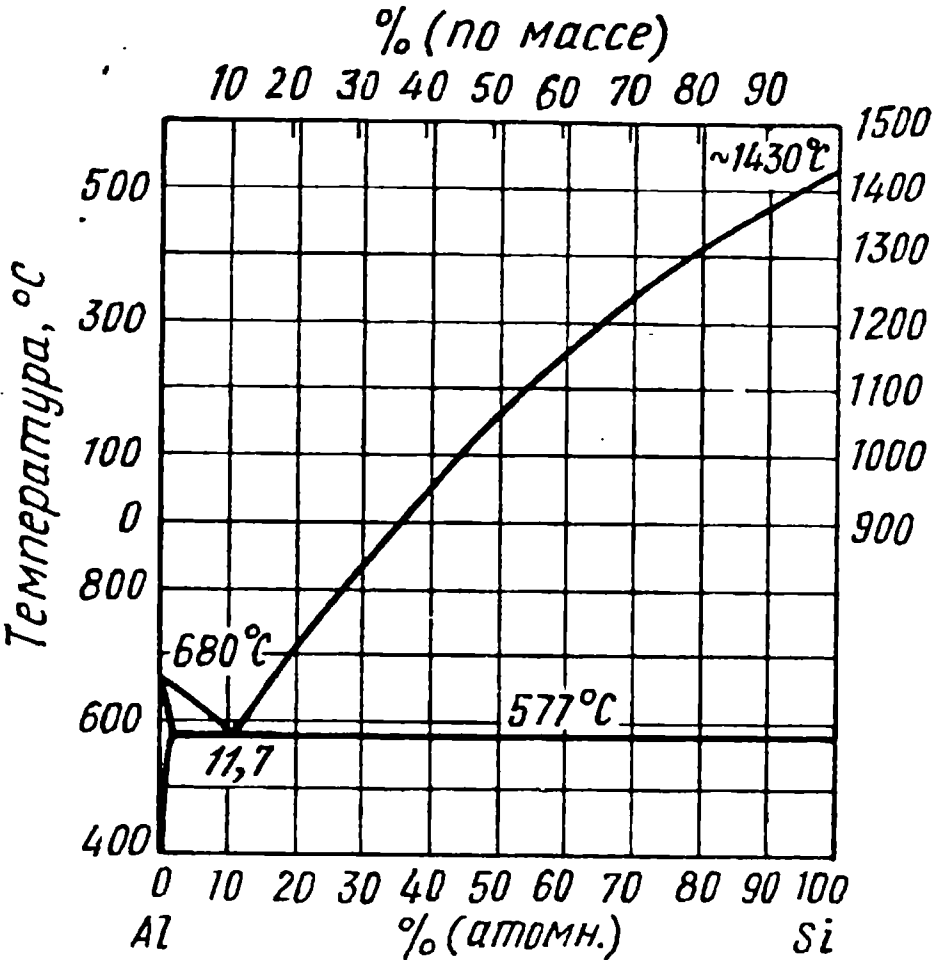


Рис. 72. Диаграмма состояния сплавов системы алюминий—кремний

Т а б л и ц а 31

Марка припоя	Химический состав, % (по массе) ¹			Температура плавления, °С		Назначение
	Si	Cu	Zn	солидус	ликвидус	
Силумин	10—13	≤0,8	≤0,3	578	578	Для пайки алюминия и сплавов АМц и АВ
34А	6±0,5	28±1	—	525	525	Для пайки алюминия и сплавов АМц, АМг и АВ
П575А	—	—	20	570	620	Для пайки алюминия и сплава АМц

¹ Остальное — алюминий.

Припой на основе олова наибольшее распространение получили за рубежом. Типичным представителем таких припоев является сплав, содержащий 10—20% Zn, остальное — олово. Этот припой используют обычно при абразивной или ультразвуковой пайке. Основным недостатком соединений, паянных этим припоем, является низкая коррозионная стойкость, что объясняется значительной разностью нормальных электродных потенциалов припоя и паяемых им алюминиевых сплавов.

Припой для пайки магниевых сплавов. Припой на магниевой основе применяют только для пайки магниевых сплавов; при применении их для других металлов получаются хрупкие соединения, обладающие низкой коррозионной стойкостью. В качестве магниевых припоев применяют главным образом сплавы магния с алюминием, цинком и кадмием. Магний с алюминием при содержании 32,3% Al образует эвтектику с температурой плавления 437° С. Согласно экспериментальным данным, в магниевых припоях алюминия должно содержаться не выше 25—27%, так как при дальнейшем увеличении его содержания припой сильно охрупчивается. Целесообразно вводить в эти припои не свыше 1—1,5% цинка, так как при большем его содержании увеличивается интервал кристаллизации сплава и склонность к трещинообразованию. Для снижения температуры плавления магниевых припоев в них вводят кадмий. Пайку с применением магниевых припоев обычно производят газовой горелкой, погружением или в печи. Во всех случаях необходимо применять флюсы. Составы и область применения некоторых магниевых припоев приведены в табл. 32.

Т а б л и ц а 32

Марка припоя	Химический состав, % (по массе) ¹				Температура плавления °С		Назначение
	Al	Zn	Cd	Mn	соли-дус	лик-видус	
П430Мг	0,75—1,0	13—15	—	—	430	600	Для пайки магния и сплавов марок МА1, МА2 и МА8
1	25—27	1,0—1,5	—	0,1—0,3	435	520	То же
2	21—22	0,2—0,5	25—26	0,1—0,3	398	415	Для заделки мелких дефектов литья сплава МЛ15

¹ Остальное — магний.

Оловянносвинцовые припои. Для низкотемпературной пайки сталей, меди, никеля и медных сплавов наиболее широко применяют припой системы олово—свинец, обладающие достаточной прочностью, коррозионной стойкостью и высокими технологическими свойствами. Они пластичны, хорошо сопротивляются знакопеременным нагруз-

кам и обладают хорошей смачивающей способностью по отношению ко многим металлам и сплавам. Диаграмма состояния системы олово — свинец приведена на рис. 73. При 38,1% Рb эти металлы образуют эвтектику с температурой плавления 183,3° С. В твердом со-

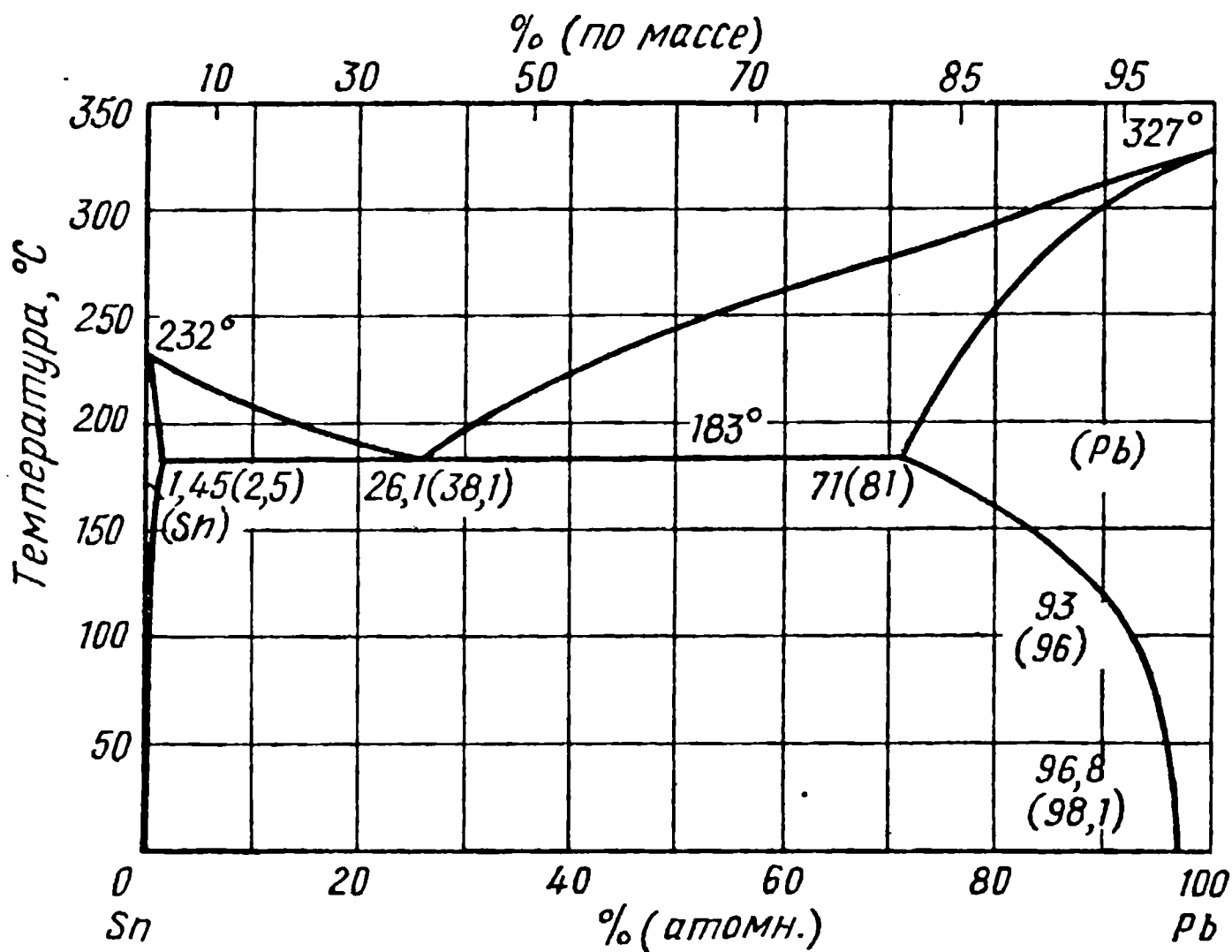


Рис. 73. Диаграмма состояния сплавов системы олово—свинец

стоянии при эвтектической температуре в олове растворяется 2,5% Рb. В свинце при этой температуре растворяется 19,5% Sn.

Составы и область применения наиболее распространенных оловянносвинцовых припоев приведены в табл. 33.

Т а б л и ц а 33

Марка припоя	Химический состав, % (по массе) ¹		Температура плавления, °С		Назначение
	Sn	Sb	солидус	ликвидус	
ПОС90	89—91	—	183	220	Для пайки деталей, подвергаемых гальванопокрытиям (серебрение, золочение)
ПОС61	60—62	—	183	185	Для пайки меди, латуни, бронз, сталей
ПОС40	39—41	—	183	235	То же
ПОС10	9—10	—	183	256	» »
ПОССу18-2	17—18	1,5—2	183	277	Для пайки ответственных деталей из меди, латуни, сталей
ПОССу4-6	3—4	5—6	245	265	Для лужения меди и железа

¹ Остальное — свинец.

Введение в оловянносвинцовые припои до 7% Sb приводит к повышению их механических свойств и снижению склонности к старению. Содержание в припоях свыше 7% Sb делает их очень хрупкими, что объясняется появлением в сплаве свободной сурьмы наряду с твердым раствором олово—сурьма. Примеси цинка, алюминия, железа и меди отрицательно сказываются на свойствах оловянносвинцовых припоев. При содержании цинка и алюминия свыше 0,005% снижается растекаемость припоев, ухудшается взаимодействие с паемым металлом, появляется склонность к образованию трещин при затвердевании. При содержании в припое свыше 0,1% Fe и свыше 0,15% Cu заметно повышается его температура плавления. Наибольшей прочностью и технологичностью из оловянносвинцовых припоев обладают ПОС61 и ПОС40. Припой ПОС61 имеет предел прочности $4,7 \text{ кГ/мм}^2$ при относительном удлинении 34%, припой ПОС40 соответственно $3,8 \text{ кГ/мм}^2$ и 54%. Более высокой прочностью обладает припой ПОССу4-6, но ввиду низкого содержания в нем олова паяные им соединения недостаточно пластичны. Оловянносвинцовые припои с содержанием свыше 90% Sn обладают высокой коррозионной стойкостью; однако паять чистым оловом не всегда целесообразно, так как при температуре $13,2^\circ \text{C}$ обычное белое олово претерпевает аллотропическое превращение, переходя в серый порошок. Чаще всего применяют припои, содержащие 30—50% Sn.

В последние годы для изделий, работающих в условиях тропического климата, созданы новые коррозионностойкие припои на основе олова марок ВПр6 и ВПр9. Состав припоя ВПр6: $8,0 \pm 0,5\%$ Ag; $7,5 \pm 0,5\%$ Sb; Sn — остальное (интервал кристаллизации $245\text{—}270^\circ \text{C}$). Состав припоя ВПр9: $5,0 \pm 0,5\%$ Ag; $2,0 \pm 0,5\%$ Cu; $1,0 \pm 0,2\%$ Sb; Sn — остальное (интервал кристаллизации $220\text{—}250^\circ \text{C}$).

Свинцовые припои. Ввиду дефицитности олова его стремятся заменить в припоях другими металлами. Разработаны низкооловянистые и безоловянистые припои главным образом на основе свинца. Свинец в чистом виде в качестве припоя оказался непригодным, так как очень плохо смачивает металлы. Сплавы свинца с серебром, кадмием, цинком получили некоторое распространение. Добавка к свинцу серебра, снижая температуру плавления припоев, увеличивает их прочность и смачивающую способность. Диаграмма состояния системы свинец—серебро приведена на рис. 74 [38].

Растворимость серебра в свинце очень мала. При содержании 2,5% Ag эти металлы образуют эвтектику с температурой плавления 304°C , являющуюся основой для разработки припоев системы свинец—серебро. Свинцовые припои по сравнению с оловянносвинцовыми имеют более высокие температуры плавления и, следовательно, могут обеспечить работу паяных соединений в условиях большего нагрева. Однако по своим технологическим свойствам они значительно хуже оловянносвинцовых. Составы и область применения наиболее теплостойких свинцовых припоев ПСр3 и ПСр2,5 приведены в табл. 34.

Добавка олова в свинцовосеребряные припой улучшает их смачиваемость и растекаемость, а также повышает технологичность при их применении.

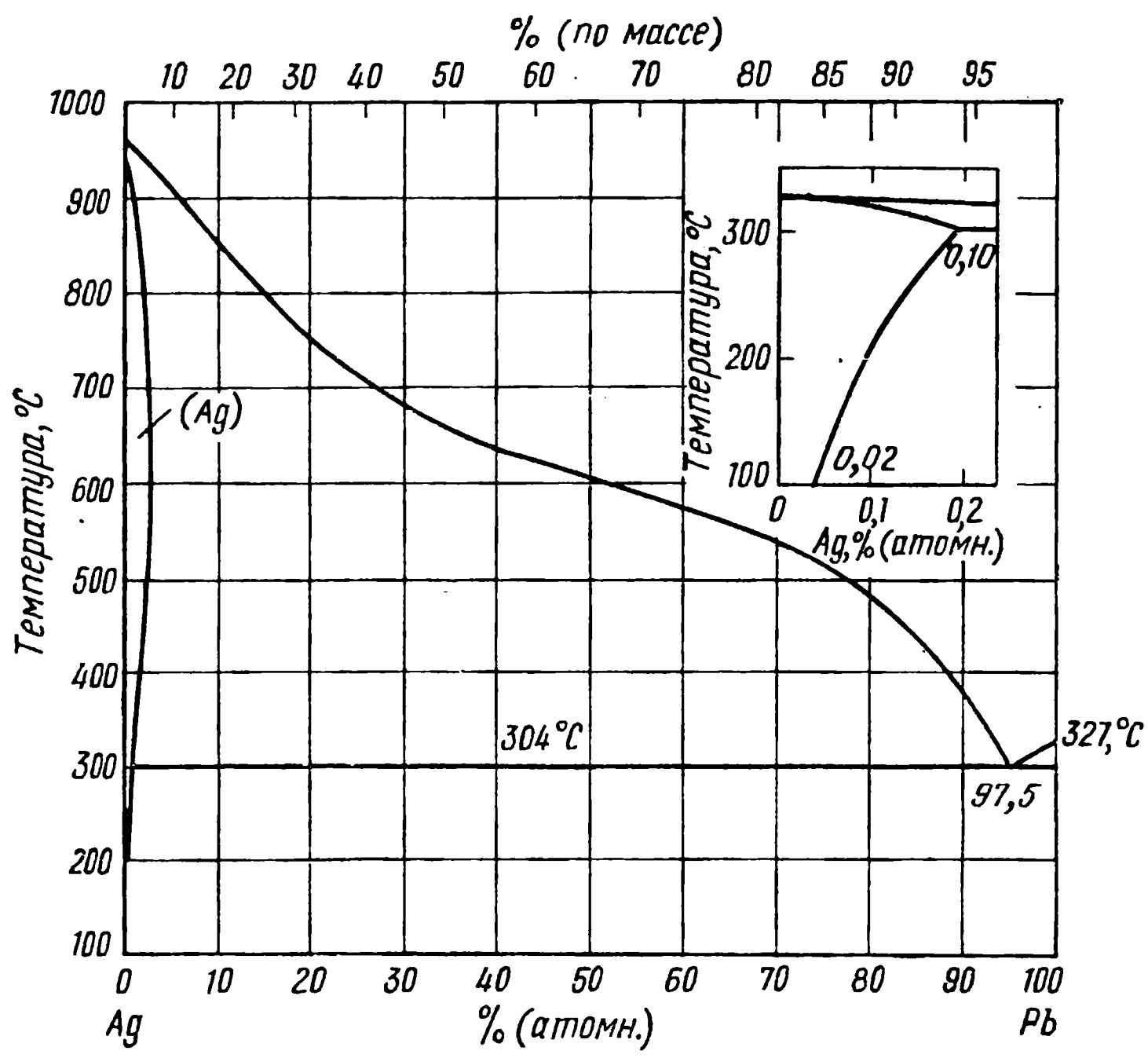


Рис. 74. Диаграмма состояния сплавов системы свинец—серебро

Т а б л и ц а 34

Марка припоя	Химический состав, % (по массе)					Температура плавления °C		Назначение
	Pb	Ag	Sn	Cu	Ni	соли-дус	лик-видус	
ПСр3	97±1	3±0,3		—	—	300	304	Для пайки медных и латунных деталей, работающих при температуре до 150°С
ПСр2,5	92±1	2,5±±0,3	5,5±±0,5	—	—	295	304	То же, припой более технологичен
ПСр7,5	84±1	7,5±±0,3	4,5±±0,5	3,8±±0,3	0,2±±0,1	350	400	Для пайки изделий криогенной техники, работающих в условиях глубокого холода

Свинец наряду с медью, серебром и никелем обладает высокой хладостойкостью и остается пластичным при статических испытаниях в жидком водороде и гелии. Легирование свинца серебром, оловом, медью и никелем позволило разработать припой ПСр7,5, который при пайке меди в вакууме обеспечивает при -196°C предел прочности 16 кГ/мм^2 и угол загиба 95° .

Кадмиевые припои. В качестве кадмиевых припоев применяют сплавы кадмия с оловом, цинком, серебром. Основным достоинством кадмиевых припоев является более высокая по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями прочность и пластичность. Кадмиевые припои обладают также повышенной температурой плавления, поэтому они могут применяться для пайки деталей, работающих в условиях нагрева до $200\text{—}250^{\circ}\text{C}$. Однако технологические свойства кадмиевых припоев низкие, пайка с их применением значительно затруднена. В основном кадмиевые припои применяют для пайки меди, медных сплавов, омедненной стали и алюминия.

Кадмиевые припои с содержанием серебра иногда применяются также для соединения алюминия с другими металлами. Составы некоторых кадмиевых припоев приведены в табл. 35.

Т а б л и ц а 35

№ п/п	Химический состав, % (по массе)				Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	
	Cd	Zn	Sn	Ag	солидус	ликвидус
1	95	—	—	5	337	393
2	65	30	5	—	229	294

Индиевые припои. В последние годы в качестве низкотемпературных припоев применяют сплавы индия с оловом, цинком, кадмием и другими металлами. Индий наряду с низкой температурой плавления ($156,4^{\circ}\text{C}$) обладает хорошей смачивающей способностью по отношению к металлам, стеклу, керамике, полупроводникам. При добавлении, например, $1\text{—}2\%$ In к стандартному свинцовосеребряному припою ПСр2,5 резко улучшается смачиваемость. Кроме того, оловянно-свинцовые припои, содержащие свыше 25% In, обладают хорошей коррозионной стойкостью в щелочах. Поэтому индиевые припои, несмотря на дефицитность индия, применяют во многих областях техники, особенно при соединении металлов с неметаллическими материалами. Припой системы индий—кадмий эвтектического состава широко применяют при пайке германиевых элементов и полупроводников. Составы и область применения некоторых припоев, содержащих индий, приведены в табл. 36.

Висмутовые припои. Сплавы на основе висмута, несмотря на их низкие температуры плавления, распространения в качестве припоев не получили, так как они плохо смачивают поверхность большинства металлов, хрупки и имеют низкую прочность. Кроме того, висмут является дефицитным металлом. Особенностью припоев на основе

№ п/п	Химический состав, % (по массе)				Температура плавления °С		Назначение
	In	Sn	Pb	Ag	соли- дус	лик- видус	
1	80	—	15	5	—	156,4	Для покрытий на керамике
2	50	50	—	—	117	120	Для пайки металлов в ваку- уме и для пайки стекла
3	25	—	75	—	—	231	Для пайки деталей, работа- ющих в контакте с щелочами

висмута наряду с легкоплавкостью является увеличение объема при кристаллизации. Висмутовые припой применяются для пайки плавких предохранителей.

Галлиевые припой—пасты. Галлий имеет температуру плавления 29,8° С, поэтому галлиевые припой-пасты могут быть использованы для соединения металлов и металлов с неметаллами при комнатной температуре или при незначительном нагреве. Припой-пасты на основе галлия и его сплавов при температуре 20—30° С представляют пастообразную смесь галлиевого сплава с порошками металлов, являющихся наполнителями. В качестве наполнителя обычно используют порошки основного металла. Такая паста некоторое время при комнатной температуре сохраняется в твердотекучем состоянии, а затем затвердевает, подобно амальгамам, образуя сплав, температура плавления которого значительно выше температуры плавления галлия. При пайке припой-пасту наносят тонким слоем на соединяемые поверхности деталей, которые затем накладывают друг на друга и выдерживают до затвердевания припоя-пасты. Особенностью галлия и припоев-паст на его основе является увеличение объема при кристаллизации, поэтому для получения более прочных и плотных швов при пайке рекомендуется осуществлять поджатие паяемых деталей.

Недостатком галлиевых припоев-паст является малая прочность паяных соединений, обычно не превышающая 2—5 кг/мм², и низкая стабильность качества паяных швов.

Г л а в а V

КОНСТРУИРОВАНИЕ ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ

§ 1. Соединения, применяемые в паяных изделиях

Паяным соединением называют элемент паяного изделия, включающий паяный шов и прилегающие к нему участки соединяемых металлов. Паяным швом называют прослойку металла между соединяемыми деталями, состоящую из зоны сплавления и диффузионных зон.

Прочность паяного соединения определяется прочностью сплава, образующегося в шве в результате взаимодействия припоя с основным металлом, точнее прочностью наиболее ослабленной части зоны сплавления, а также прочностью спая (силами связи в контакте основной металл — зона сплавления). Если наиболее ослабленным

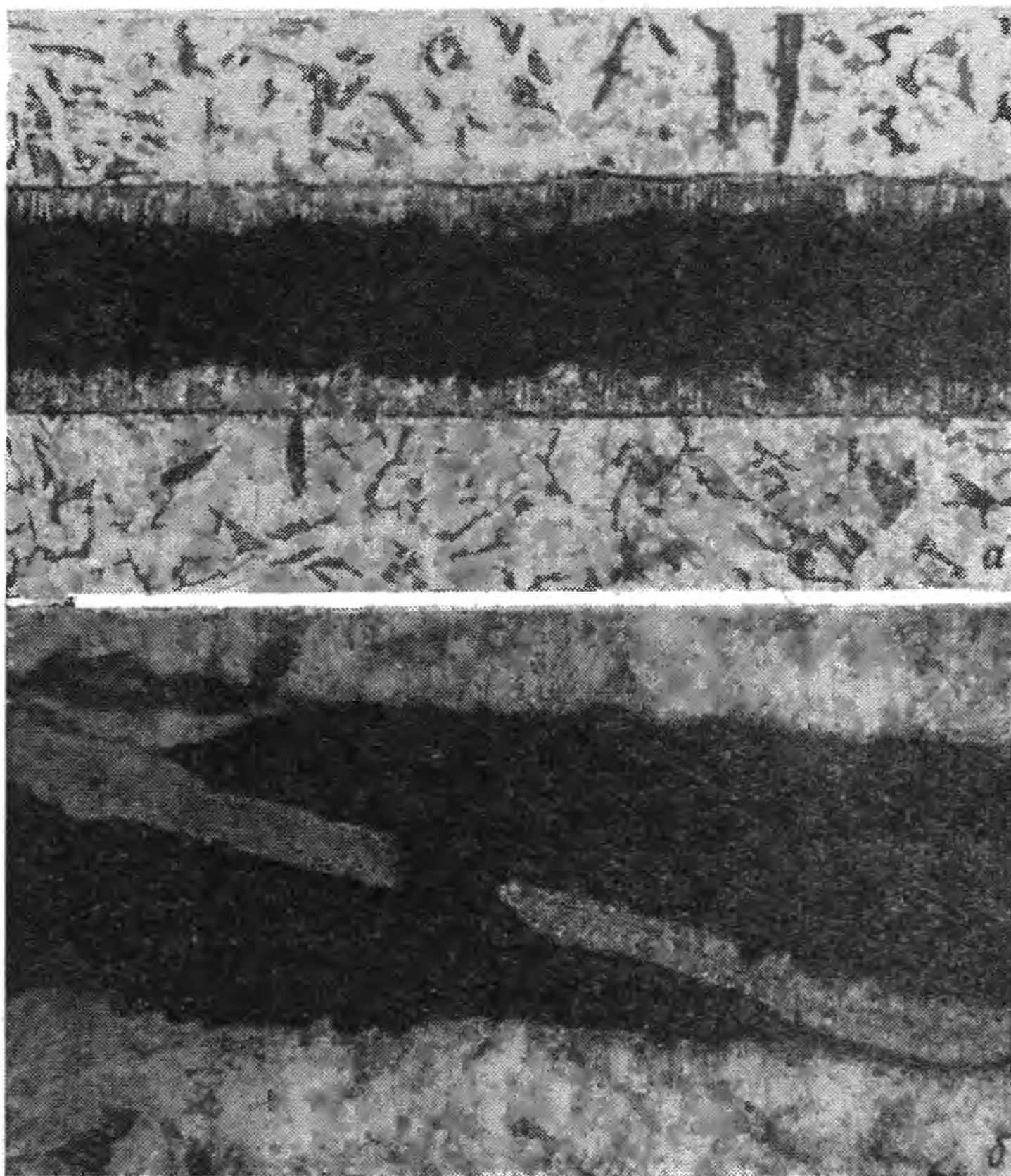


Рис. 75. Микроструктура шва при пайке в среде водорода стали ВСт.3 экспериментальным припоем, $\times 70$:
а — разрушение по зоне сплавления; *б* — разрушение в зоне спаев

местом паяного соединения является центральная часть зоны сплавления, то под нагрузкой по ней происходит разрушение (рис. 75, *а*). Если зона сплавления однородна и образовавшийся при взаимодействии припоя с основным металлом сплав обладает высокой прочностью, то разрушение при механических испытаниях происходит по зонам спая (рис. 75, *б*).

Так как прочность припоя и зоны сплавления обычно ниже прочности основного металла, то для обеспечения механических свойств паяного изделия увеличивают площадь шва. Для этого

при пайке применяют нахлесточное соединение, в то время как при сварке основным соединением является стыковое. При конструировании необходимо стремиться к тому, чтобы паяные соединения в конструкции были равнопрочны с наиболее слабым ее звеном.

В зависимости от вида конструкции и ее назначения пайку можно применять для соединения плоских; стержневых и трубчатых элементов изделия, а также криволинейных [39].

Наиболее простые паяные соединения — в плоских элементах деталей: внахлестку, ступенчатое, гребенчатое, косостыковое, стыковое и тавровое (рис. 76).

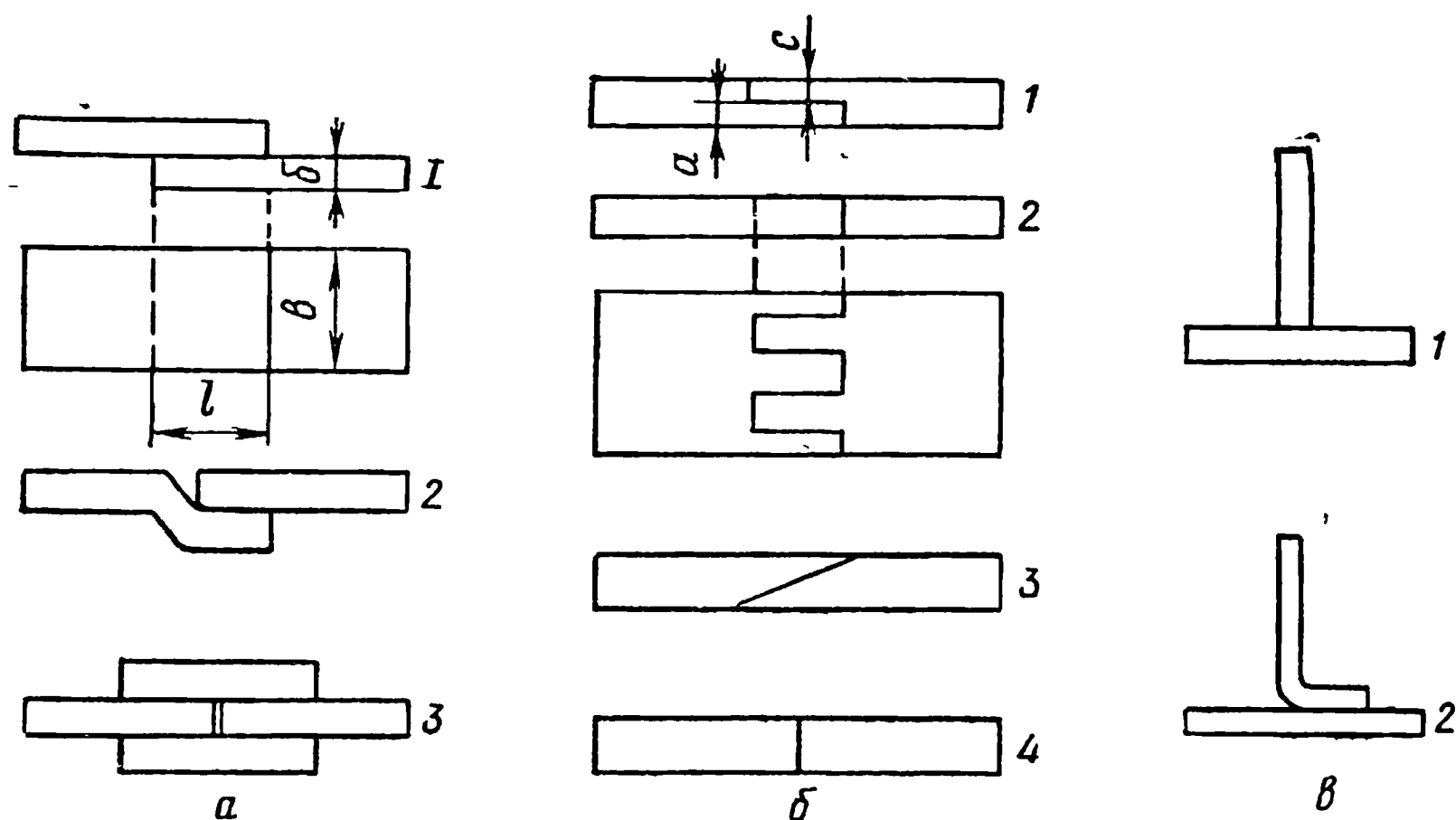


Рис. 76. Соединение плоских элементов деталей при пайке

Соединение внахлестку (рис. 76, а) — наиболее распространенное в паяных конструкциях; за счет перекрытия деталей достигается равнопрочность паяного соединения. Величина нахлестки устанавливается расчетным путем в зависимости от прочности основного материала и припоя. Практически она колеблется в пределах от двух до пяти толщин более тонкой из соединяемых деталей. При пайке серебряными, латунными, медными, никелевыми и другими высокопрочными припоями нахлестка обычно не превышает двух-трех толщин. При пайке оловянносвинцовыми и другими припоями, обладающими сравнительно низкой прочностью, величина нахлестки достигает пяти толщин наиболее тонкой из соединяемых деталей. При этом следует иметь в виду, что очень большую величину нахлестки делать нецелесообразно, так как усилие среза воспринимается главным образом внешними периферийными участками паяного шва, а его средняя часть остается малонагруженной и может полноценно включиться в работу при большой нахлестке лишь после начала разрушения периферийных участков паяного шва.

На рис. 76, а изображено простейшее нахлесточное соединение 1, образуемое простым перекрытием плоских элементов деталей. В тех

случаях, когда с одной стороны соединение необходимо сохранить плоским, применяют нахлестку, изображенную на рис. 76, а, 2, образуемую подгибкой одного из соединяемых элементов. После пайки плоская сторона таких соединений обычно выравнивается путем заполнения щели, образуемой кромками соединяемых листов, низкотемпературными припоями.

Для более симметричного распределения нагрузок, а также в целях повышения прочности иногда применяют соединения с накладками с двух сторон (рис. 76, а, 3).

В тех изделиях, в которых необходимо сохранить толщину стенки неизменной или применить обычное нахлесточное соединение невозможно, применяют ступенчатые, гребенчатые, косостыковые и стыковые паяные соединения (рис. 76, б).

Ступенчатые и гребенчатые соединения (рис. 76, б, 1 и 2) наряду с сохранением сечения соединяемых элементов деталей обеспечивают высокую прочность, но ввиду сложной подготовки кромок их применяют только в ответственных конструкциях.

В косостыковых соединениях (рис. 76, б, 3) довольно трудно обеспечить плотное прилегание паяемых поверхностей, поэтому их применяют редко, обычно при пайке ленточных пил. Косой стык следует делать под углом не более 30° , иначе площадь пайки будет мала и, следовательно, прочность соединения недостаточна.

Стыковые соединения (рис. 76, б, 4) в паяных изделиях применяют в тех случаях, когда припой и способ пайки обеспечивают равнопрочность конструкции.

Соединения тавровые (рис. 76, в, 1) не характерны для паяных конструкций, но их применяют в целях компоновки изделий. Более высокую прочность имеют тавровые соединения с подгибкой вертикального элемента, увеличивающей площадь паяного шва (рис. 76, в, 2). Соединения стержней и труб между собой, соединения стержней и труб с фланцами, втулками, трубными досками и т. п. представлены на рис. 77. При соединении стержней между собой (рис. 77, а) применяют охватывающую втулку (рис. 77, а, 2). Соединение стержней встык из-за недостаточной прочности применяется редко. Прочность стыкового соединения может быть увеличена, если сочетать его со втулочным (рис. 77, а, 3). При соединении труб (рис. 77, б) также рационально применять втулку. Эту втулку можно устанавливать внутри в виде бужа, что позволяет сохранять наружное сечение трубы по шву (рис. 77, б, 4). Если нужно сохранить неизменным внутреннее сечение паяемого трубопровода, то применяют телескопическое соединение путем развальцовки концов одной или обеих труб (рис. 77, б, 1 и 2). Во втором случае для соединения используют переходную втулку. Если необходимо сохранить и наружное, и внутреннее сечение трубы по месту соединения постоянным, то применяют пазовое соединение — гребенчатое (рис. 77, б, 6). Однако это соединение очень сложное, поэтому его применяют редко. Соединение, представленное на рис. 77, б, 5, позволяет вносить припой при сборке между паяемыми поверхностями, что обеспечивает более равномерный пропай.

Конструктивные формы соединений стержней и труб с фланцами, трубными досками, втулками (рис. 77, в) в значительной мере определяются конфигурацией изделия, но во всех случаях необходимо учитывать, что прочность паяных соединений может быть обеспечена только при наличии достаточной нахлестки. Площадь поверх-

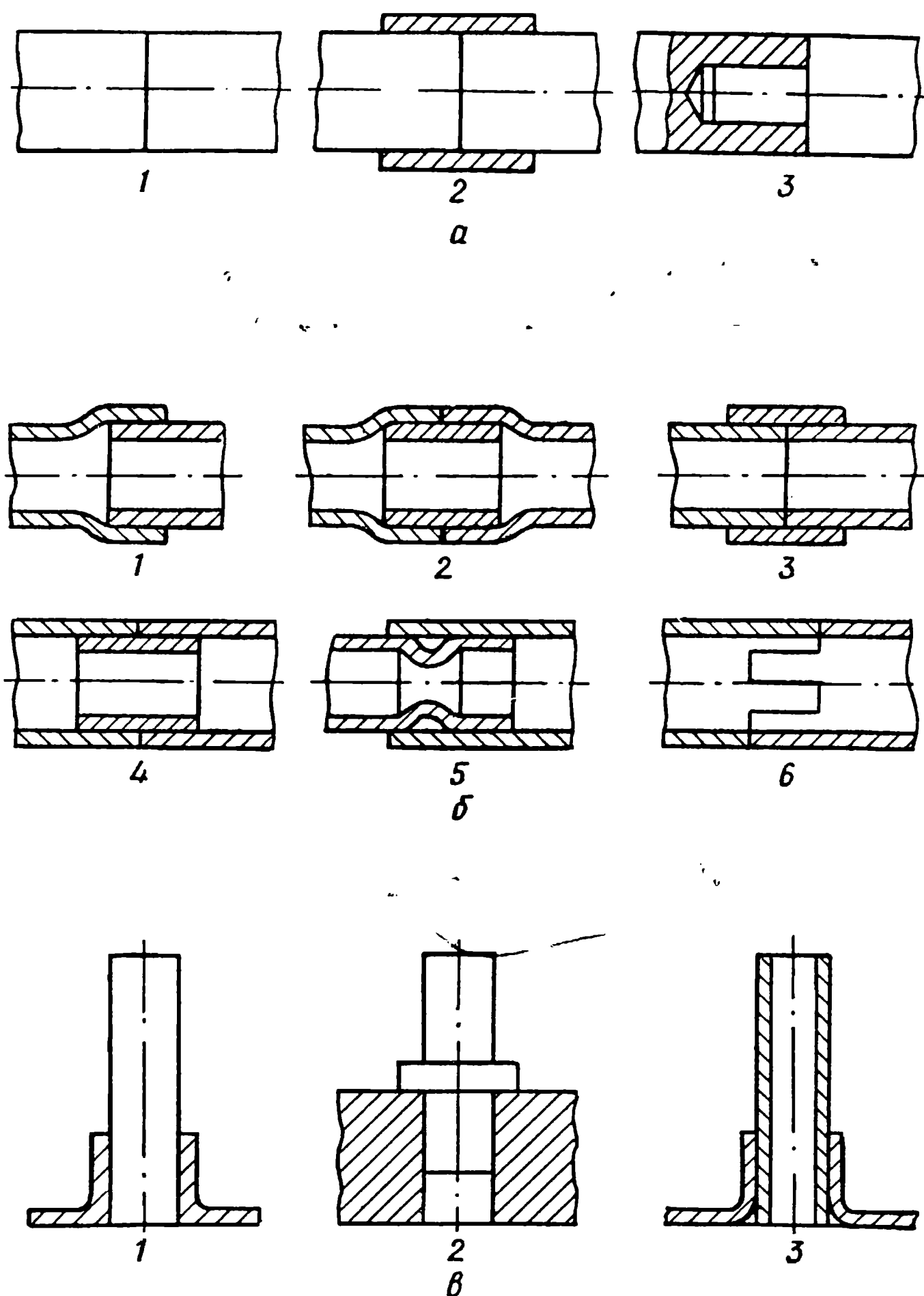


Рис. 77. Соединение стержневых и трубчатых элементов деталей при пайке между собой и с плоскими элементами

ностей фланцев, втулок, трубных досок и др., контактирующих со стержнями и трубами, необходимо определять расчетным путем в соответствии с требуемой прочностью.

Соединения криволинейных поверхностей между собой и с плоскими большое распространение получили в последние годы в связи с производством сотовых конструкций и паяных панелей с гофрированными проставками, которые широко используют в самолето-

строении и для изготовления теплообменников. Эти типы паяных соединений схематично представлены на рис. 78. Пайка плоских листов с гофрированной проставкой осуществляется по вершинам гофр (рис. 78, а) или в местах касания гофрированных лент, образующих сотовый заполнитель, а также в местах соединения торцов сотового заполнителя с листовой обшивкой (рис. 78, б). Встречаются также конструкции, в которых трубы соединены по образующей или припаяны к плоским листам.

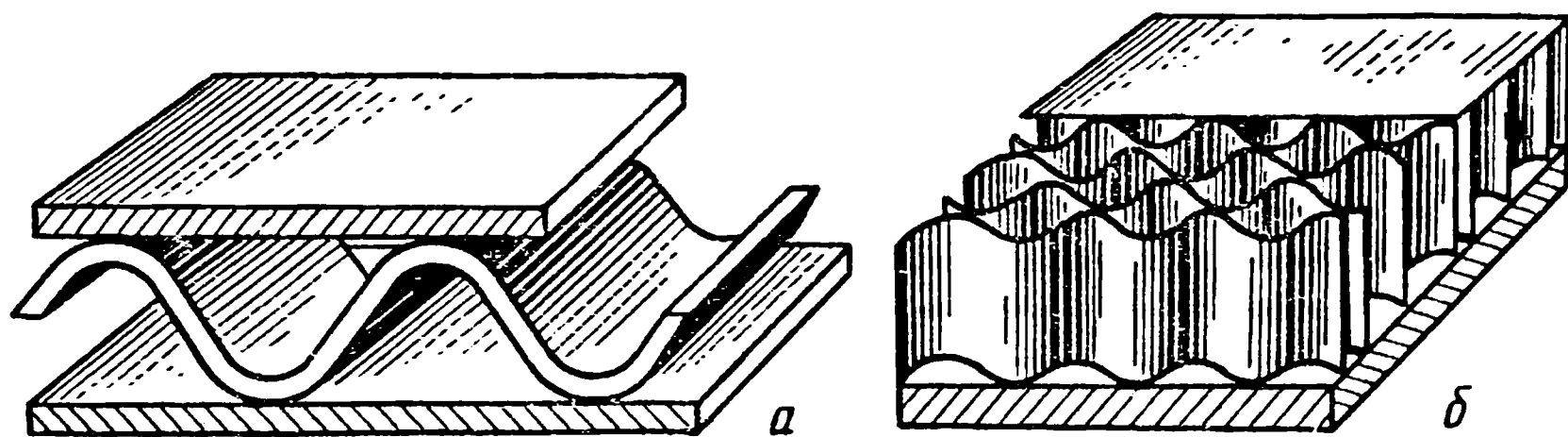


Рис. 78. Соединение криволинейных элементов при пайке между собой и с плоскими элементами

К паяным соединениям в зависимости от назначения изделия наряду с общими требованиями предъявляют и специальные: по герметичности, электропроводности, коррозионной стойкости и т. д.

§ 2. Особенности конструирования паяных изделий

При конструировании паяных изделий наряду с основным металлом выбирают и припой, а также определяют способ пайки. Это связано с тем, что припой и способ пайки оказывают существенное влияние на выбор типа паяных соединений, величину зазоров, условия сборки и закрепления элементов изделия перед пайкой.

Как общее правило, при конструировании паяного изделия необходимо стремиться к уменьшению числа паяных соединений, если это не противоречит экономичности или другим соображениям. При этом соединения располагают по изделию равномерно, по возможности в менее нагруженных местах. Конструкция паяного изделия должна быть такой, чтобы предотвращать концентрацию напряжений, что достигается увеличением податливости отдельных ее элементов в процессе пайки. Основным металлом выбирают в соответствии с условиями работы проектируемой конструкции и требованиями по прочности, герметичности, коррозионной стойкости и другим показателям. При этом главным условием является паяемость основного металла припоями, обеспечивающими заданную прочность. При выборе основного металла необходимо обращать внимание также на чувствительность его к нагреву и на склонность к образованию трещин под действием расплавленных припоев.

При конструировании важно правильно выбрать припой. Припой выбирают в зависимости от физико-химических свойств основ-

ного металла, прочности, технологии пайки, необходимой жаростойкости, коррозионной стойкости, электропроводности и т. п. Если пайка осуществляется ступенчато, то припой и температуру пайки выбирают так, чтобы при образовании последующих швов не расплавились предыдущие.

При конструировании изделий из разнородных металлов необходимо прежде всего учитывать различие в коэффициентах их термического расширения, так как в процессе пайки может произойти такое значительное изменение соединительных зазоров, что припой не заполнит их. Вторым фактором, который следует учитывать при пайке разнородных металлов, состоит в том, что при сочетании некоторых материалов невозможно получить пластичные и прочные паяные соединения. Например, при высокотемпературной пайке титана с медью и никелем, алюминия с магнием и медью, магния со сталью и т. д. невозможно получить качественных паяных соединений без нанесения на них барьерных покрытий, предохраняющих разнородные металлы от активного взаимодействия и, следовательно, от возникновения в паяном шве хрупких интерметаллидов.

В качестве барьерного покрытия наносят слой такого металла, который легко паяется и образует прочные связи с покрываемым конструкционным материалом.

При пайке разнородных металлов с применением барьерных покрытий желательно выбирать такие припои, которые одновременно хорошо смачивают покрытие и один из соединяемых металлов (без покрытия), не образуя с ними интерметаллидов. Например, при пайке стали с титаном, покрытым молибденом, используют медные или серебряные припои. При пайке стали или меди с алюминиевыми сплавами, покрытыми слоем никеля, используют обычные оловянно-свинцовые припои и флюсы, предназначенные для пайки меди, стали и никеля.

При проектировании паяного изделия необходимо также выбрать наиболее эффективные способ и режимы пайки, от которых в значительной мере зависит качество паяных изделий. Способ пайки выбирают, исходя из требований, предъявляемых к паяному изделию, с учетом состава и свойств основного металла и припоя, программы выпуска изделия и наличия на предприятии соответствующего оборудования для пайки, а также учитывая особенности различных способов нагрева.

Так, например, при пайке с местным нагревом качество соединений ниже, возможно коробление изделия, выгорание легкоплавких составляющих припоя и пережог основного металла.

При общем нагреве в печах, соляных ваннах, в расплавах припоев и др. паяное изделие равномерно прогревается по всему объему. В этом случае условия течения расплавленных припоев и формирования шва значительно более благоприятные, деформации при пайке имеют меньшую величину, стабильность качества пайки выше.

При индукционном нагреве в основном требуется, чтобы конструкция детали позволяла установить индуктор по месту пайки. В зоне нагрева индуктором на паяемой детали не следует делать

острых кромок, тонких стенок и перемычек у отверстий, так как они могут легко оплавиться.

Со способом нагрева очень часто связан способ удаления окисной пленки в процессе пайки. При местном нагреве обычно применяют флюсы. При общем нагреве в печах чаще применяют нейтральные или активные газовые среды. Если изделие должно иметь высокую коррозионную стойкость, то пайку желательно проводить без применения флюсов. Если же это невозможно, необходимо выбирать конструкционные материалы, обладающие коррозионной стойкостью, пайку вести при более высоких температурах, чтобы обеспечить условия шлакования флюса в процессе пайки. После пайки нужно тщательно удалить остатки флюса и предусмотреть условия защиты паяного шва от коррозии.

Кроме правильного выбора основного металла, припоя и способа пайки, одно из основных условий конструирования паяных изделий — обеспечение в соединении капиллярного зазора и создание условий для течения в нем припоя. Поэтому по сравнению со сваркой перед пайкой необходима более точная механическая обработка и сборка. Зазор под пайку зависит от физико-химических свойств основного металла и припоя, а также характера взаимодействия между ними в процессе пайки. Чем лучше припой в расплавленном состоянии смачивает поверхность паемого металла, тем меньшим назначается зазор. Если в процессе пайки происходит активное растворение основного металла расплавленным припоем, то зазоры должны быть большими, так как припои в этих случаях повышают температуру плавления и растекаются хуже. Например, при пайке алюминиевых сплавов припоем на алюминиевой основе растворение основного металла в расплавленном припое протекает энергично, поэтому требуется выдерживать большие зазоры, чтобы обеспечить заполнение шва. Наоборот, серебряные и медные припои незначительно растворяют стали в процессе пайки, и для обеспечения условий капиллярного течения и получения высокой прочности паяного соединения в этом случае необходимо иметь малые зазоры.

На выбор величины зазора большое влияние оказывают условия удаления окисной пленки в процессе пайки. При малом зазоре флюс, обогащаясь при пайке окислами, не вытекает из зазора и его остатки препятствуют затеканию припоя. При увеличении зазора ухудшаются условия течения припоев под действием капиллярных сил. Величину зазора в производственных условиях, как правило, определяют на основе экспериментальных данных. Оптимальные значения зазоров, применяемых при пайке некоторых металлов и сплавов, приведены в табл. 37.

Необходимость соблюдения малых зазоров является существенным недостатком пайки, ограничивающим ее применение в производстве крупногабаритных металлоконструкций. Этот недостаток капиллярной пайки в результате исследований, проведенных в связи с новыми задачами тепловой энергетики оказалось возможным преодолеть, применяя в качестве припоев сплавы типа твердых растворов, обладающих прочностью не ниже прочности

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

основного металла и при взаимодействии с ним в процессе пайки не образующие легкоплавких и малопрочных фаз [40].

При установлении величины зазора учитывают также и экономические факторы. Увеличенные зазоры приводят к излишнему расходу припоя, а чем меньше зазор, тем более точной должна быть механическая обработка и сборка под пайку. При решении этих вопросов необходимо в каждом конкретном случае исходить из требований к изделию, условий производства и экономичности.

Для сохранения равномерного зазора при конструировании необходимо располагать элементы изделия и выбирать материалы так, чтобы в процессе нагрева при смещении отдельных элементов изделия зазор изменялся незначительно и не нарушались условия капиллярного течения расплавленного припоя. Аналогичным образом, при пайке разнородных материалов зазор при сборке необходимо предусмотреть таким, чтобы в процессе нагрева он принял заданную величину. Оптимальный зазор в этом случае определяют на основе экспериментальных данных, получаемых при отработке опытного образца.

Наряду с соблюдением оптимального зазора при конструировании паяного изделия необходимо следить за тем, чтобы в зоне паяного соединения не было замкнутых полостей, в которых воздух или другие газы при пайке могут увеличиваться в объеме и служить причиной образования неспаев, пор и раковин в шве. Для выхода расширяющихся в процессе нагрева газов рекомендуется в деталях делать специальные отверстия (сверления).

При конструировании паяных изделий из разнородных материалов следует иметь в виду, что различия в коэффициентах термического расширения приводят при охлаждении к возникновению в зоне паяного шва внутренних напряжений. Эти напряжения тем выше, чем больше разница между коэффициентами термического расширения соединяемых материалов. Если не учитывать это и не принимать специальных мер с целью уменьшения внутренних напряжений, то последние могут вызвать деформации в паяемом изделии и даже привести к местным разрушениям.

При равномерном нагреве в процессе пайки детали менее подвержены поводке и короблению, чем при сварке. Тем не менее при конструировании паяных изделий необходимо учитывать возможность возникновения этих дефектов. В изделиях, где трубы соединены с фланцами, последние должны иметь большую, чем у трубы, толщину стенки, что обеспечивает жесткость соединения. С этой же целью при пайке тонкостенных сосудов толщину стенки обечайки делают несколько большей толщины днища.

Во всех случаях элементам паяного соединения конструктивно нужно придавать такую форму, которая обеспечивала бы достаточную жесткость. Для равнопрочности конструкции паяные швы нельзя располагать в местах переходов, соединять по возможности элементы одинакового сечения. При изготовлении деталей высокой точности в связи с возможностью коробления в процессе пайки, после нее необходимо провести окончательную механическую обработку.

При конструировании паяных соединений из элементов разной толщины необходимо учитывать возможность концентрации напряжений при работе изделия. На рис. 79 показана неправильная и правильная конструкции соединения. Стрелками указаны направления нагружения. В первом случае под нагрузкой деформироваться будет тонкий элемент, поэтому по границе с паяным швом в нем возникнут значительные напряжения, вследствие чего возможно разрушение паяного соединения. Избежать этого можно, как указано во втором случае, плавным изменением сечений тонких элементов. При такой конструкции соединения концентрация напряжений снижается.

При конструировании паяного изделия необходимо предусмотреть закрепление элементов изделия в процессе пайки. Это особенно важно при групповой пайке изделий сложной конфигурации. Отдельные части паяного изделия перед пайкой можно связывать нихромовой проволокой или закреплять при помощи зажимов, подставок, сваркой, в результате соответствующей механической обработки и т. д. Некоторые способы закрепления, предусматриваемые при конструировании паяных изделий, приведены на рис. 80.

Самым простым способом закрепления является кернение. Простым и надежным способом закрепления является точечная сварка. Выбор того или иного способа закрепления изделия при пайке определяется его конструкцией, способом пайки, программой выпуска изделия, а также имеющимся на предприятии оборудованием.

Припой применяют в виде проволоки, прутков, полос, фольги, зерен, порошка, паст и т. п., что необходимо также учитывать при конструировании. В случае пайки цилиндрических деталей из припоя обычно изготавливают кольца или шайбы, которые помещают в зазор, в специально подготовленные канавки или снаружи шва. Слой припоя можно предварительно наносить на паяемый металл плакированием, гальванически или металлизацией. Во всех случаях

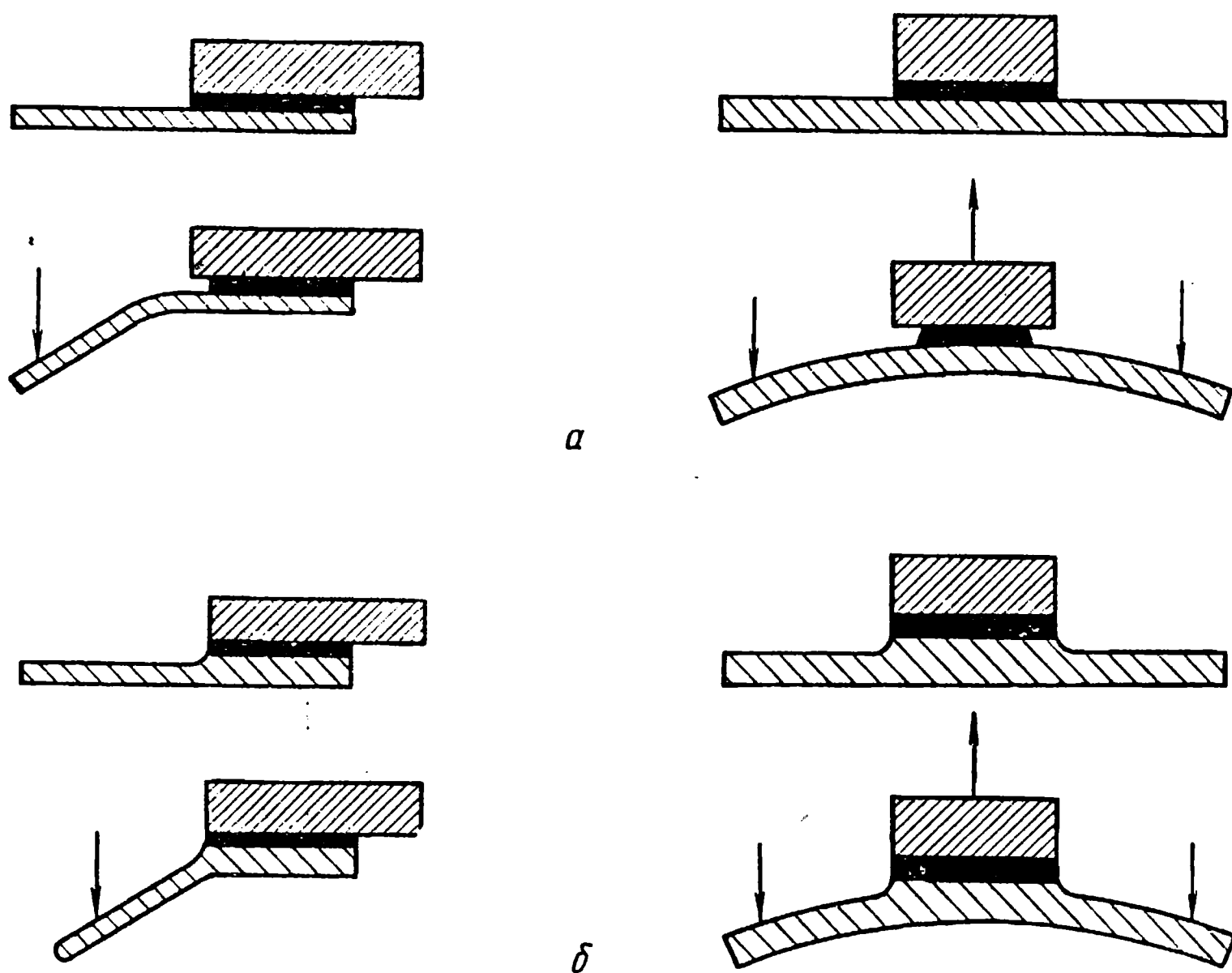
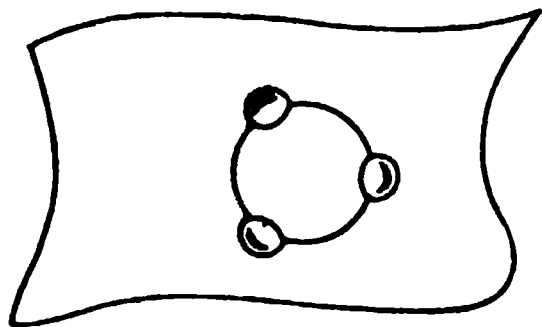
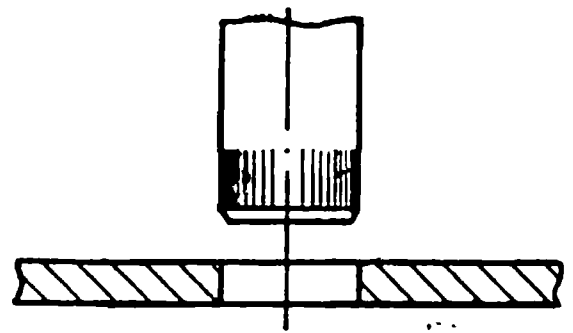
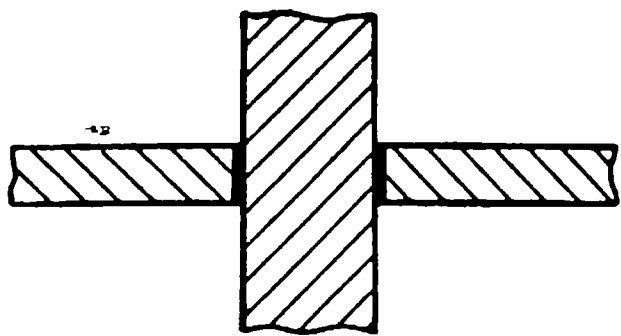


Рис. 79. Неправильные (а) и правильные (б) конструкции паяных соединений из элементов разной толщины

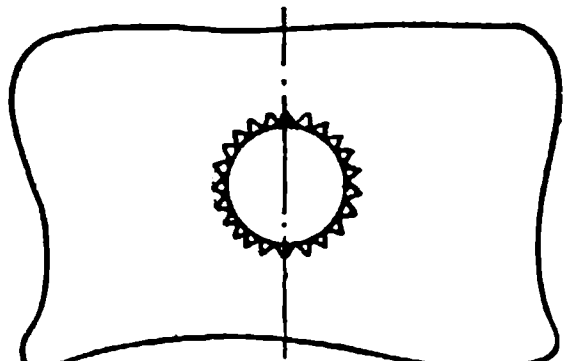
при размещении припоя необходимо стремиться к тому, чтобы наряду с силами капиллярного течения заполнение зазора происходило также под действием силы тяжести. Способы рационального размещения припоев при пайке изделий, собранных из элементов, полученных токарной обработкой и штамповкой, приведены соответственно на рис. 81 и 82.

Наружное размещение припоя — самое простое, но при нем не всегда обеспечивается хорошее заполнение зазора, так как припой может растечься по более нагретой поверхности одной из соединяемых деталей, не затекая в зазор. Во избежание этого необходим равномерный нагрев соединяемых деталей. Внутреннее расположение припоя, когда он помещается между соединяемыми деталями в специальные выточки или выштампованные каналы, гарантирует более качественное заполнение зазоров.

Особенности конструирования паяных изделий зависят от технологии пайки. Как при общем, так и при местном нагреве зона шва



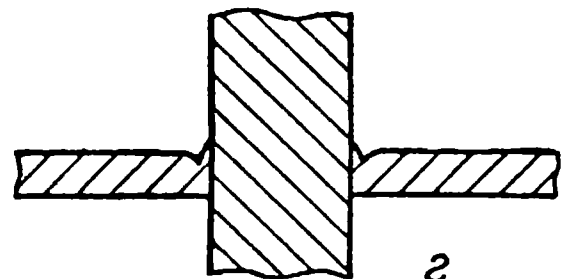
a



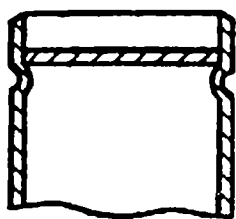
б



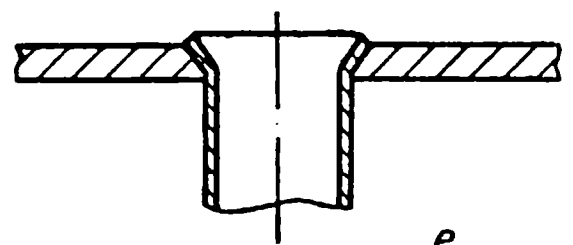
в



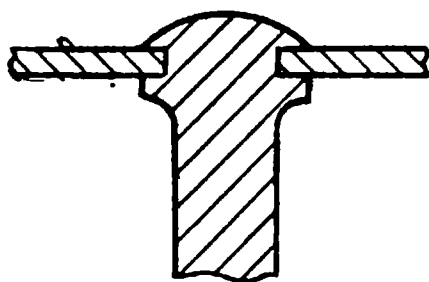
г



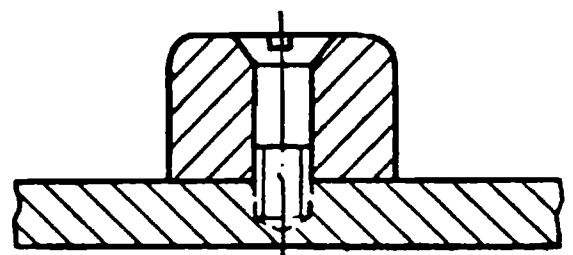
д



е



ж



з

Рис. 80. Способы закрепления элементов изделия при сборке и пайке:
a — кернение тремя точками; *б* — накатка; *в* — точечная сварка; *г* — кернение по контуру; *д* — отбортовка; *е* — развальцовка; *ж* — крепление расклепыванием; *з* — крепление винтом

должна равномерно нагреваться до температуры пайки. Это обеспечивает сохранение заданного зазора по всему шву, что в свою очередь способствует равномерному течению флюса и припоя. Соблю-

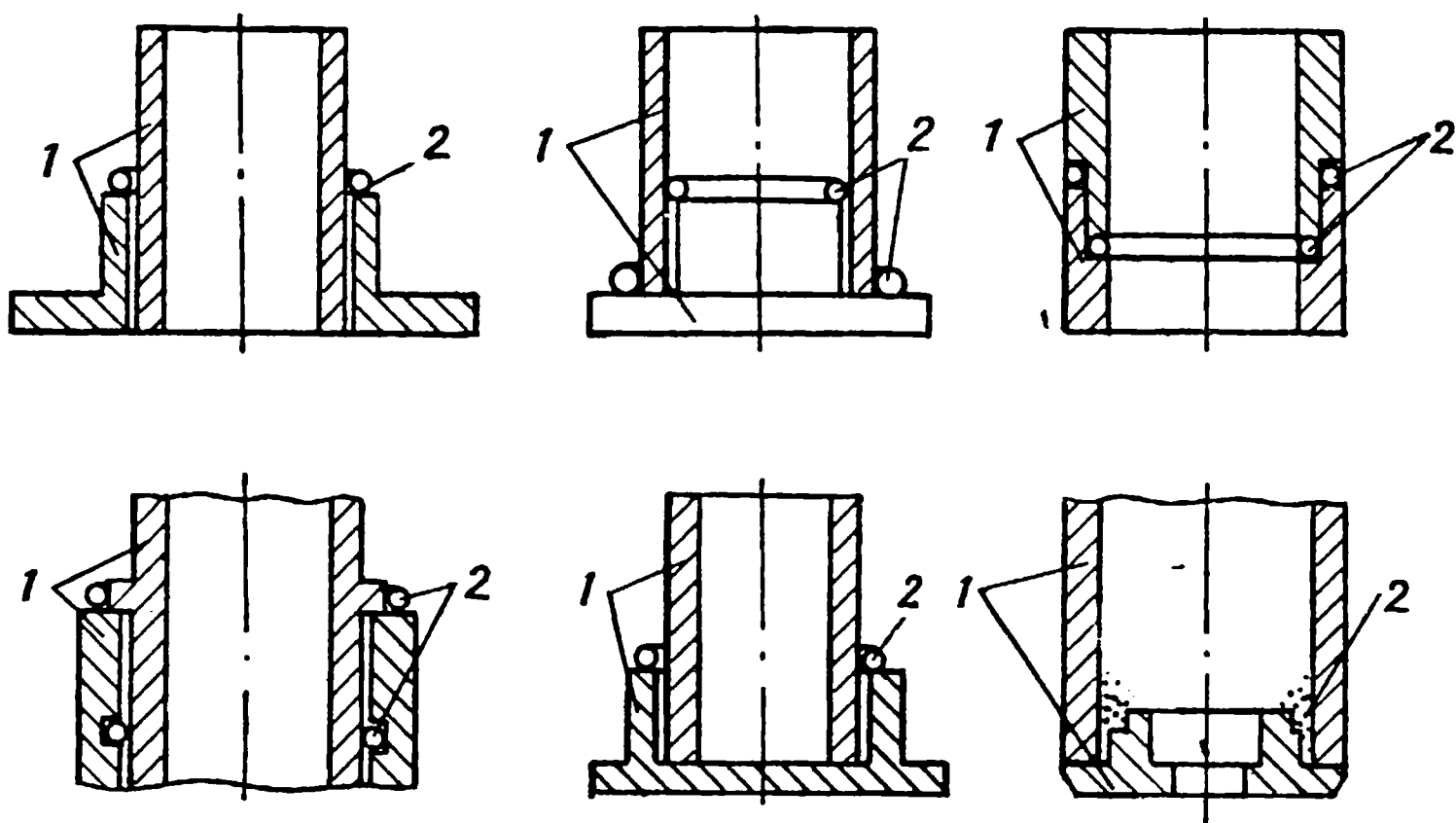


Рис. 81. Способы размещения припоя в соединениях, собранных из деталей, полученных токарной обработкой:

1 — соединяемые детали; 2 — припой

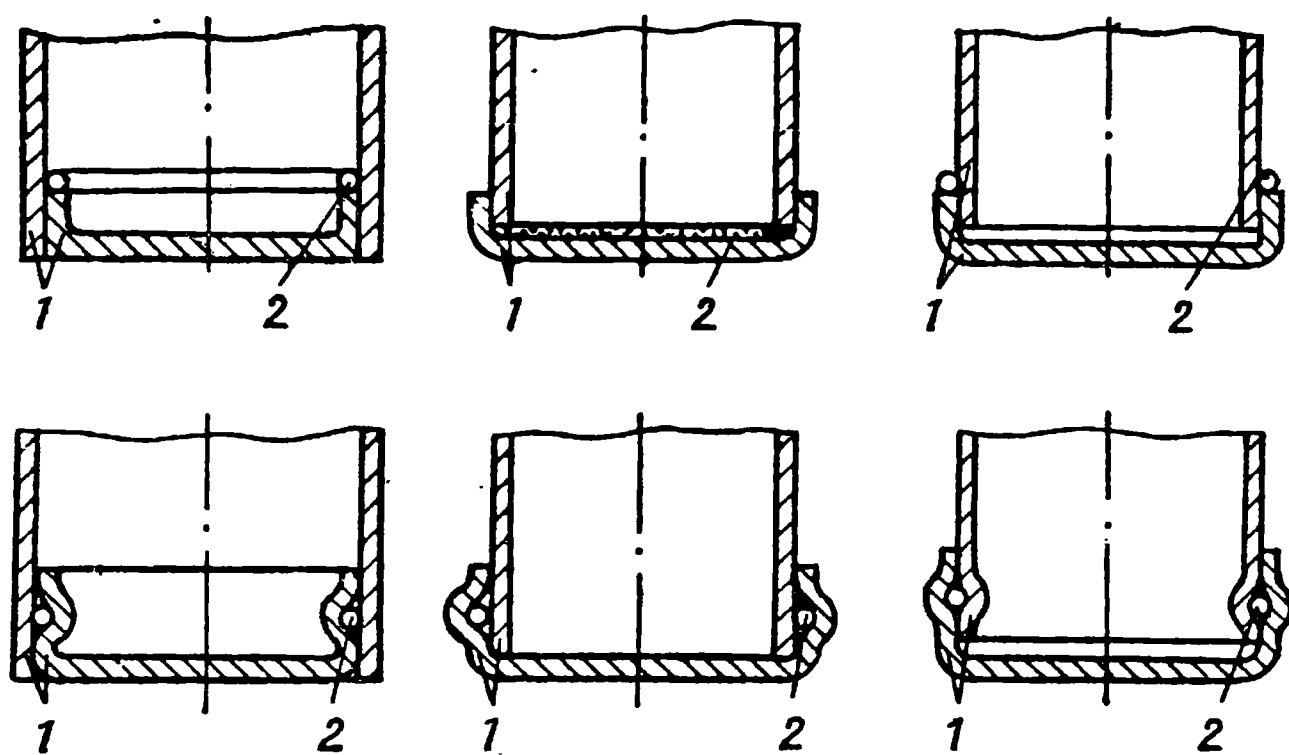


Рис. 82. Способы размещения припоя в соединениях из штампованных деталей:

1 — соединяемые детали; 2 — припой

дение этого неперемного условия образования паяного шва должно быть также предусмотрено при конструировании, в процессе которого должны обеспечиваться не только прочностные показатели изделия, но и условия капиллярного течения припоев.

§ 1. Характеристика прочности паяных изделий

Прочность паяных соединений зависит от прочности применяемых припоев, правильного выбора их в зависимости от физико-химических свойств основного металла, а также от величины зазора, способа и режимов пайки. В первую очередь припой выбирают на основе показателей прочности и коррозионной стойкости паяных им швов. Признаком пригодности припоя является способность его взаимодействовать с паемым металлом без образования хрупких фаз.

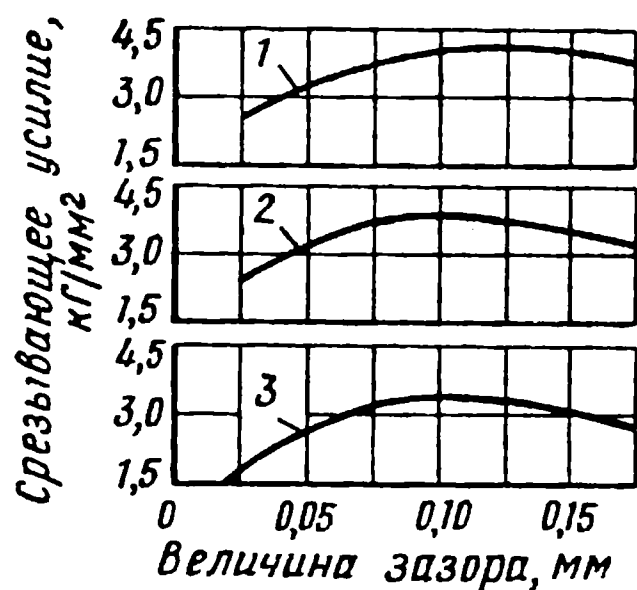


Рис. 83. Влияние величины зазора на прочность паяного соединения при срезе:

1 — медь; 2 — латунь; 3 — низкоуглеродистая сталь

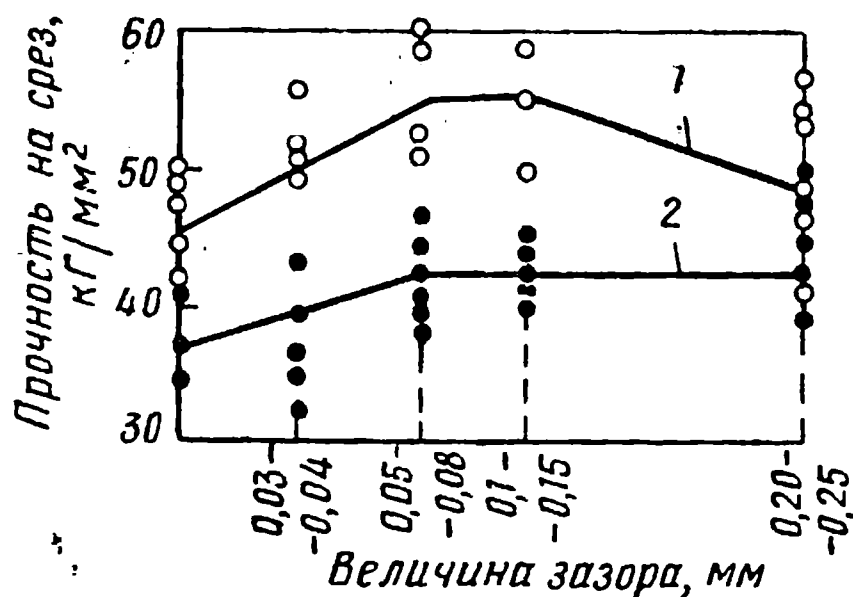


Рис. 84. Зависимость прочности соединения на срез от величины зазора при пайке сталей припоем ПСр45:

1 — сталь 45; 2 — Ст. 3

На прочность паяных соединений большое влияние оказывает величина зазора. Припой в шве находится в литом состоянии и, следовательно, прочность соединения будет лимитироваться его прочностью. При увеличенных зазорах капиллярное течение припоя в процессе пайки может прекратиться и не вся площадь шва заполнится им. При слишком малых зазорах также может не быть затекания припоя, в результате чего нарушится сплошность шва и механические свойства паяного соединения снизятся. На рис. 83 видно, что максимальная прочность нахлесточных соединений обеспечивается при зазорах 0,1 мм.

На рис. 84 показана зависимость прочности от величины зазора телескопических соединений, паянных серебряным припоем. Как следует из кривых, максимальная прочность при пайке стали 45 имеется при зазорах 0,05–0,15 мм, что объясняется хорошим заполнением такого зазора и оптимальными условиями взаимодействия припоя с основным металлом. Для стали марки Ст.3 максимальная прочность наблюдается при более широком зазоре. Прочность паяных соединений при всех зазорах превышает прочность припоя ПСр 45, что связано с легированием его в процессе пайки компонентами основного металла.

В стыковых соединениях, паянных высокотемпературными припоями, наблюдается другая зависимость прочности от величины зазора.

На рис. 85 приведена зависимость предела прочности стыковых соединений железа Армко, паянных медью, от отношения величины зазора h к диаметру образца d . Пунктиром нанесены значения прочности, полученные при расчете по формуле, учитывающей эффект

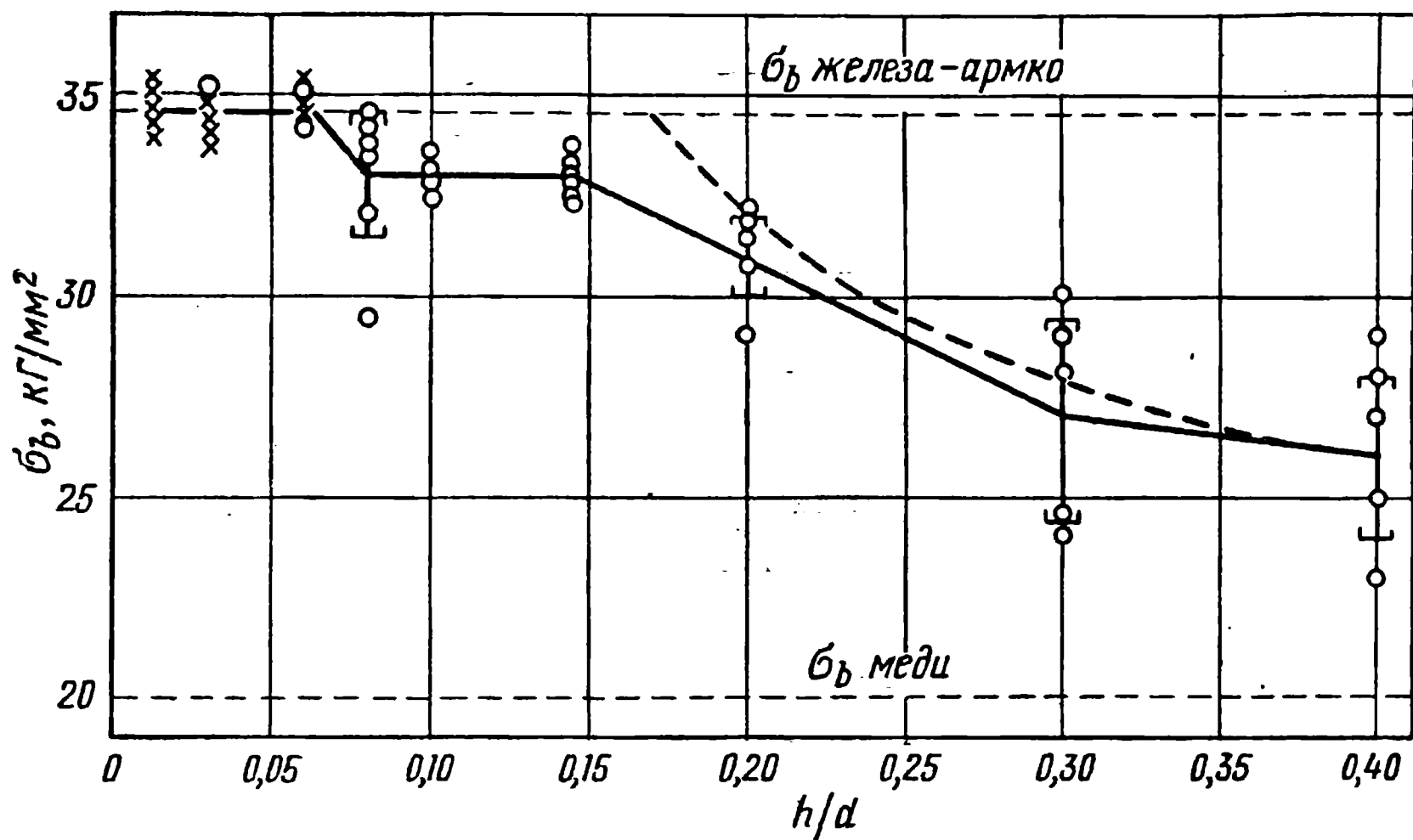


Рис. 85. Зависимость предела прочности от величины зазора при пайке железа Армко медью встык:

O — разрушение по шву; X — разрушение по основному металлу

контактного упрочнения в результате возникновения в медной прослойке напряженного состояния объемного растяжения [41]:

$$\sigma_b = \sigma_b^M \{1 + [3 \sqrt{3} \kappa (1 + \epsilon)^{3/2}]^{-1}\},$$

где σ_b^M и ϵ — соответственно предел прочности и относительное удлинение припоя в исходном состоянии;

κ — отношение ширины зоны сплавления к диаметру образца.

Как можно видеть из экспериментальной кривой, с уменьшением зазора прочность соединения возрастает, а с определенной величины зазора разрушение стыковых паяных соединений идет по основному металлу. В тех случаях, когда прочность припоя выше прочности основного металла и в процессе их взаимодействия при пайке не снижается в результате легирования компонентами основного металла, прочность паяных соединений не зависит от величины зазора в широком интервале изменения (рис. 86).

На прочность паяных соединений большое влияние оказывает технология пайки. Так, прочность в сильной степени изменяется в зависимости от чистоты поверхностей, точности сборки и полноты удаления окисной пленки в процессе флюсования. Чем тщательнее

проведена подготовка перед пайкой, тем стабильнее и выше будет качество паяных соединений.

В зависимости от режима пайки прочность паяного соединения может изменяться в широких пределах. С увеличением температуры пайки обычно усиливается влияние нагрева на снижение свойств основного металла, повышается растворимость последнего в расплаве

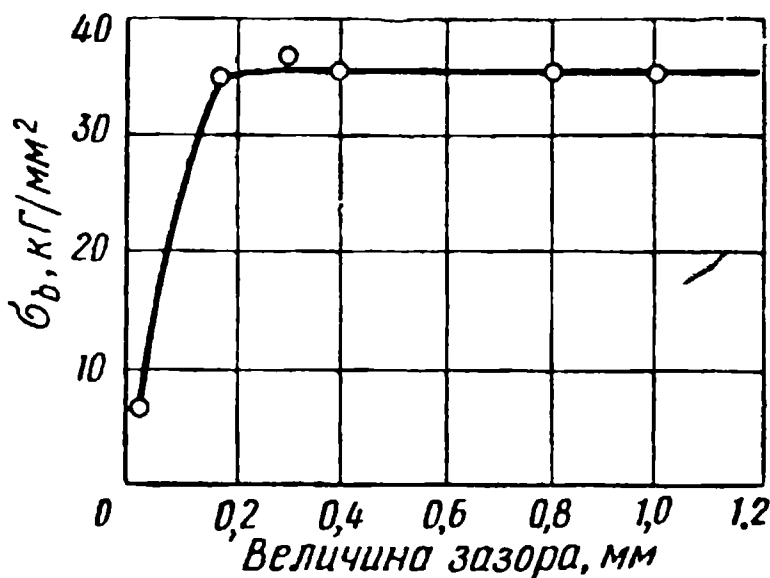


Рис. 86. Зависимость прочности стыковых соединений от величины зазора при пайке стали марки Ст.3 припоем на железной основе

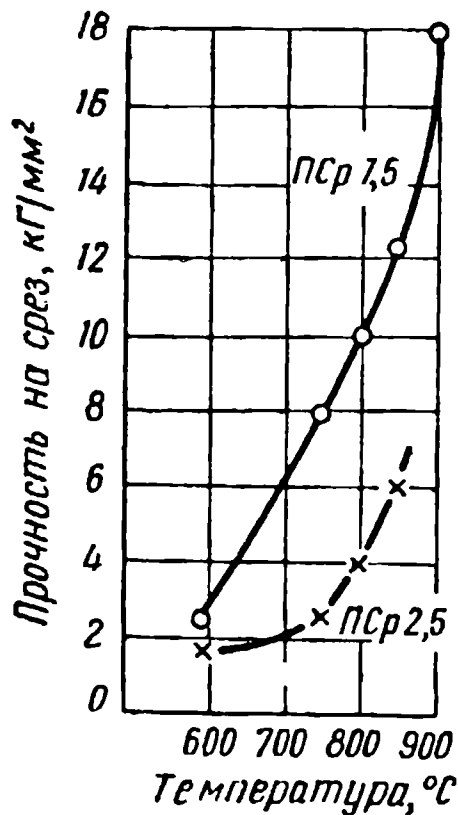


Рис. 87. Зависимость прочности от температуры пайки при соединении меди припоями ПСр7,5 и ПСр2,5

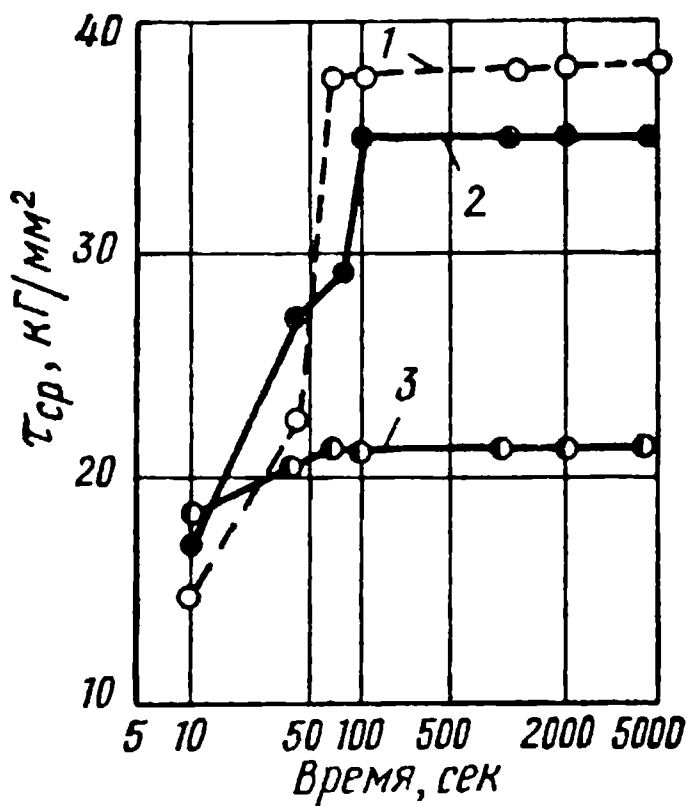


Рис. 88. Зависимость предела прочности на срез образцов стали марки Ст.3, паянной припоями на железной основе (1 и 2) и медью (3) от выдержки при температуре пайки

припоя, создается возможность эрозии в галтельных участках. Однако при применении высокотемпературной пайки низкотемпературными припоями с повышением температуры пайки прочность соединения резко возрастает (рис. 87), что объясняется главным образом растворением основного металла в расплаве припоя.

Время выдержки при пайке также оказывает значительное влияние на прочность паяного соединения. Увеличение времени выдержки до определенного предела приводит к повышению прочности. Например, при пайке стали X18H9T серебряным припоем ПСр40 с применением индукционного нагрева при выдержке около 0,5 мин предел прочности на срез не превышает 17 кг/мм². При более длительной выдержке прочность достигает 32 кг/мм².

На рис. 88 приведены кривые изменения предела прочности паяных соединений в зависимости от времени выдержки при пайке в среде водорода с точкой росы —50° С. Кривая показывает, что

максимальная прочность достигается при выдержке около 1 мин, необходимой для смачивания основного металла расплавом припоя и заполнения зазора.

Данные по прочности соединений, паянных серебряными припоями, приведены в табл. 38.

При повышении температуры эксплуатации паяных изделий прочность соединений, паянных серебряными припоями, заметно снижается, поэтому если изделие работает при нагреве выше 300—400° С, то можно применять только припой, легированные марганцем и никелем, например ПСр37,5. Значения предела прочности на срез при повышенных температурах, полученные при испытании соединений внахлестку, приведены в табл. 39, а соединений, паянных жаропрочными припоями на основе меди при различных температурах испытания,— в табл. 40 [37].

Как видно из данных табл. 40, жаропрочные припои на медной основе могут работать до температур 600° С. Жаропрочные припои на никелевой основе сохраняют достаточную прочность при более

Т а б л и ц а 38

Основной металл	Прочность на срез кг/мм ²		
	ПСр40	ПСр45	ПСр25КН
X18H9T	24—29	18—26	19—24
40XНМА	33—46	—	—
30ХГСА	35—46	35—41	35—43
Медь	>25	>25	>25

Т а б л и ц а 39

Основной металл	Марка припоя	Предел прочности, кг/мм ² , при температуре, °С			
		200	300	400	600
X18H9T	ПСр45	—	16—24	14,5—15	3—4
ЭИ654	ПСр40	22—32	15—17	5—9	—
X18H9T	ПСр37,5	—	31—35	—	11—18
ЭИ654	ПСр25КН	27—33	12—19	6—11	—

высоких температурах. Например, припой № 20 может работать в конструкциях до температуры 900° С. Если при 700° С припой ВПр1 при пайке нержавеющей сталей обеспечивает прочность не выше 10 кг/мм², то припой № 20 — до 24 кг/мм². Довольно высокая

Т а б л и ц а 40

Основной металл	Марка припоя	Предел прочности, кг/мм ² , при температуре, °С					
		—60	—20	200	400	500	600
X18H9T	ВПр1	43—58	37—50	30—40	19—22	—	9—16
CH2	ВПр1	25—30	21—30	20—30	19—24	12—20	—
CH3	ВПр1	19—22	21—25	19—23	21—25	9—13	—

прочность и пластичность припоя № 20 объясняются тем, что его состав по основным компонентам — никелю, хрому и марганцу — не выходит за пределы области твердого раствора.

Предел прочности соединений, паянных оловянносвинцовыми припоями, составляет 5—7 кГ/мм². При работе в условиях пониженных температур предел прочности несколько возрастает, но одновременно с этим падает относительное удлинение. Значения предела прочности на срез соединений, паянных оловянносвинцовым припоем ПОС40, приведены в табл. 41.

Т а б л и ц а 41

Основной металл	Предел прочности, кГ/мм ² , при температуре испытания, °С					
	—196	—183	—96	—60	+20	+85
Медь МЗ	3,5	3,3	3,4	3,5	2,7	1,6
Латунь Л63	2,9	2,9	3,1	2,7	2,2	1,4
Сталь 20	6,0	5,5	5,5	5,1	2,8	2,2
Сталь Х18Н9Т	3,0	3,4	3,0	5,0	3,2	2,0

В процессе пайки в отдельных случаях жидкий припой проникает между зерен основного металла, что приводит к снижению прочности и способствует хрупкому разрушению паяных соединений. В некоторых случаях, например при пайке сталей латунью, из-за образования межкристаллитных трещин в паяных швах применение латунных припоев ограничено.

Разрушение или понижение прочности металла в контакте с расплавленными припоями происходит в результате многих причин, но основная из них — условия внешней среды. Под влиянием расплавов припоев и флюсов в процессе пайки происходит изменение физико-химических свойств основного металла.

Действие металлических расплавов как активных сред на твердые металлы заключается в следующем:

1. В уменьшении поверхностной энергии твердых металлов при адсорбции на них расплавов. Процессы адсорбции неизбежны, так как активные среды, покрывая поверхность адсорбируемого тела, приводят систему в более устойчивое состояние, с меньшим запасом энергии. Вследствие уменьшения поверхностной энергии твердого тела снижается сопротивление отрыву и появляются хрупкие трещины.

2. В проникновении активных молекул расплавов металлов в микротрещины на поверхности твердых металлов и расклинивании их. Поверхностно активные вещества, адсорбируясь на поверхностях, образованных дефектами, способствуют дальнейшему их развитию, что приводит к понижению прочности и повышению деформируемости и, в конечном счете, вызывает разрушение подвергаемого пайке металла.

3. В образовании между основным металлом и расплавом твердых растворов или интерметаллических соединений, обладающих повышенной хрупкостью. Охрупчивание металлов особенно наблюдается по границам зерен, так как ввиду дефектности кристаллической решетки облегчается внедрение в нее атомов расплавленного металла.

4. В поверхностном растворении основного металла в расплаве.

Воздействие на твердые металлы расплавов более легкоплавких металлов осуществляется через поверхность. Наличие на ней загрязнений, окисных пленок и т. п., а также состояние ее предповерхностных слоев — наличие остаточных напряжений, наклепа, различных дефектов от субмикроскопических до макроскопических — имеет очень большое значение. Если на поверхности основного металла имеются пленки с неметаллической связью, то они затрудняют доступ расплава к твердому металлу и ухудшают условия взаимодействия между ними.

Состояние поверхностного слоя основного металла определяет эффективность воздействия расплава. Если твердый металл подвергался механической обработке, способствующей развитию деформации, например резанию, шлифованию, то воздействие расплава усиливалось. Так, образцы из стали 20 после токарной обработки в контакте с расплавленным оловом разрушались по плоскости действия максимальных касательных напряжений. При этом поверхность образцов покрывалась кольцевыми трещинами по следам обработки резцом.

Если основной металл полировали или накатывали, что приводило к «залечиванию» поверхностных дефектов, то воздействие расплава значительно снижалось. Это свидетельствует о том, что расплавленный металл взаимодействует со значительным объемом твердого металла. В процессе проникновения расплава происходит уменьшение поверхностной энергии дефектов и их адсорбционное расклинивание.

Дальнейшее взаимодействие ведет к проникновению атомов жидкого металла в решетку твердого или к химическому взаимодействию между ними. При пайке, когда процесс осуществляется в условиях удаления окисной пленки с поверхности основного металла, воздействие расплавленных припоев более активное, чем на воздухе.

Если при пайке применяют флюсы, то адсорбционное понижение прочности основного металла происходит в результате воздействия расплава флюса и припоя. На рис. 89, а приведена микроструктура поверхностного слоя железа Армко, нагревавшегося токами высокой частоты под слоем флюса при 1150°C в течение 3 мин. Здесь видно, как флюс на значительную глубину проник к границам зерен основного металла. Совместное влияние флюса и припоя видно на рис. 89, б.

Образовавшиеся в результате воздействия расплавов флюса и припоя трещины по границам зерен заполнены припоем. Появление трещин при контакте с расплавленными флюсом и припоем наиболее вероятно, когда основной металл находится в напряженном состоянии. Так, межкристаллитное проникновение припоев часто

наблюдается для медных сплавов в деформированном состоянии, в отожженном же состоянии его, как правило, не бывает.

Для сталей и никелевых сплавов межкристаллитное разрушение более вероятно в том случае, когда они образуют с расплавленным припоем легкоплавкие фазы. Как правило, склонность к образова-

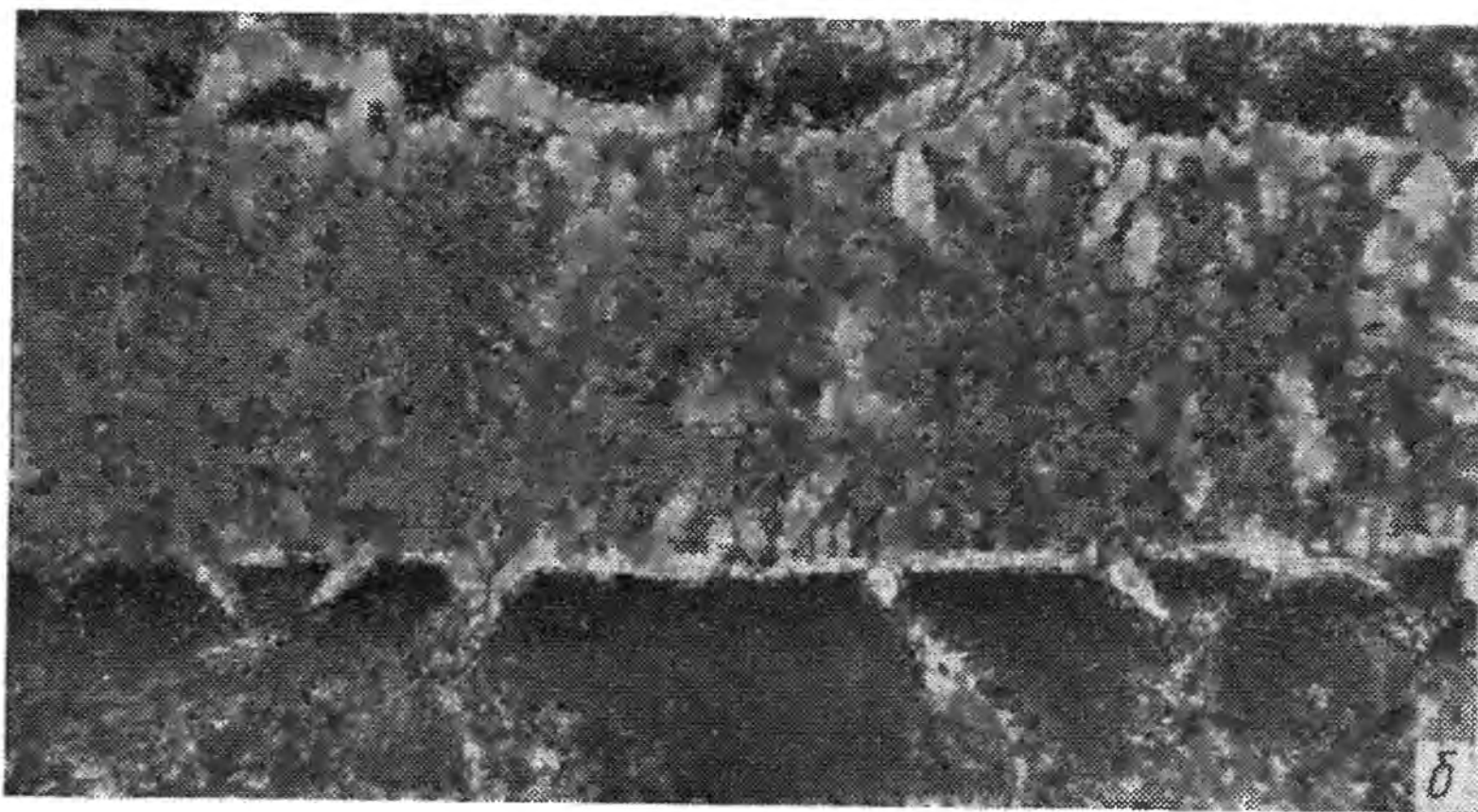
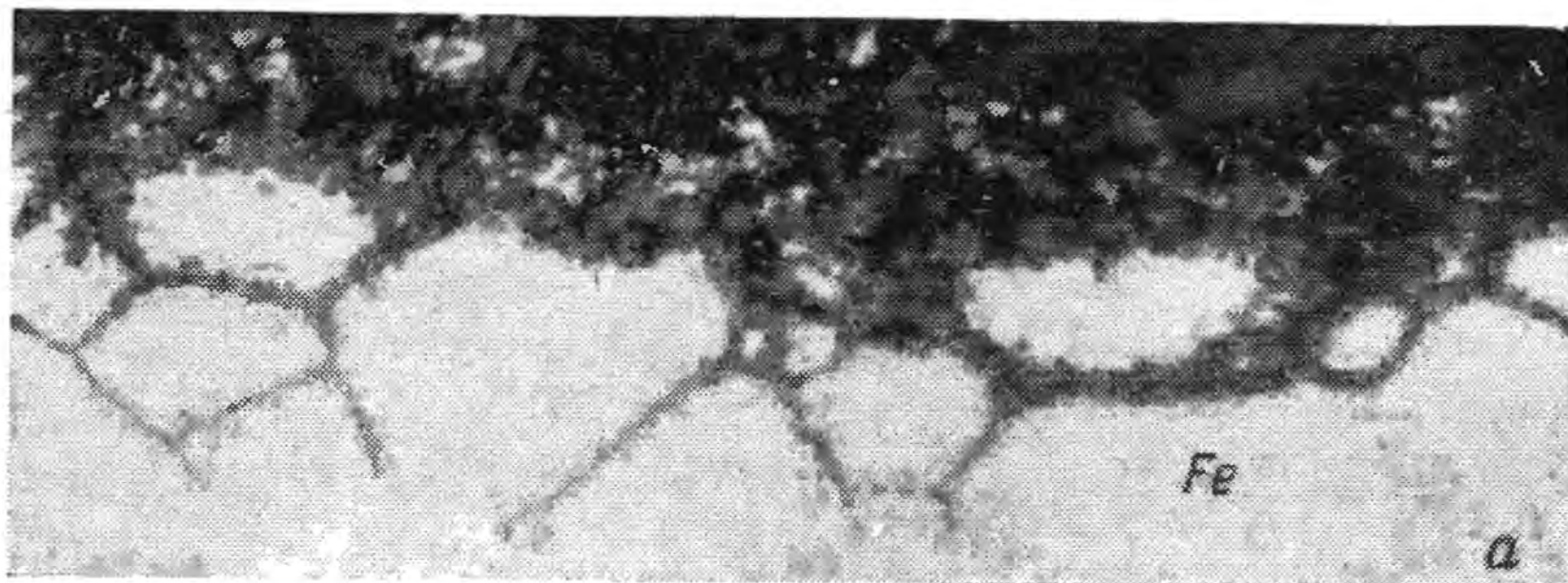


Рис. 89. Образование трещин в поверхностном слое металла в результате воздействия расплавов флюса и припоя, $\times 200$:

a — поверхностный слой железа Армко, нагревавшегося под слоем флюса при температуре 1050°C в течение 3 мин; *б* — микроструктура шва при пайке стали Ст.3 с флюсом № 200 экспериментальным припоем

нию трещин возрастает при наличии растягивающих напряжений, при неравномерном нагреве, увеличении скорости и продолжительности нагрева.

Основным компонентом, вызывающим охрупчивание соединений, паянных серебряными и медноникелевыми припоями, является медь; причем с увеличением содержания меди в припое охрупчивание возрастает. Поэтому в припои на серебряной и никелевой основе, применяемые для изделий, работающих при высоких температурах, не следует вводить медь.

Склонность металлов к хрупкому разрушению при контакте с расплавленным припоем зависит также от способа нагрева при пайке. При нагреве токами высокой частоты проникновение жидкого припоя между кристаллами паяемого металла и, как следствие, хрупкое разрушение паяных швов происходят более интенсивно, что, по-видимому, связано с наличием вибрации, возникающей при индукционной пайке.

Для уменьшения склонности сталей к хрупкому разрушению под действием расплавленных припоев рекомендуется на соединяемые детали наносить никелевое покрытие, добиваться устранения напряжений при сборке деталей под пайку, применять припои, не вызывающие хрупкого разрушения, выбирать соответствующие режимы пайки.

§ 2. Расчет паяных соединений на прочность

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

Прочность паяного соединения при одном и том же основном металле и припое можно регулировать величиной перекрытия соединяемых элементов, т. е. изменением площади шва. Если прочность паяных соединений не позволяет полностью использовать рабочие сечения элементов изделия, то наряду с выбором более прочного припоя и увеличением площади шва необходимо переходить на такие разновидности пайки, как диффузионная, которая обеспечивает более высокие свойства паяных соединений. При установлении зазоров следует иметь в виду, что прочность паяного соединения зависит от сочетания основного материала и припоя.

Прочность паяных соединений в настоящее время изучена недостаточно, поэтому при проектировании паяных конструкций и расчете их на прочность часто необходимо экспериментально проверить влияние на прочность того или иного сочетания основного металла и припоя, величины соединительного зазора, способа и режима пайки. В отдельных случаях испытания проводят на макетных образцах, имитирующих изделие.

В сварных швах часто наиболее слабым участком является не наплавленный металл, а прилегающие к нему зоны термического влияния. В случае общего нагрева при пайке зоны термического влияния отсутствуют. При местном нагреве основной материал, прилегающий к паяному шву, несколько ослаблен. Однако это ослабление в связи с рассредоточенным нагревом менее значительное, чем при сварке, и не оказывает существенного влияния на прочность

паяного соединения. Так, по данным В. П. Фролова, при пайке термообработанных алюминиевых сплавов марок АВ, АК6 в интервале 480—520 С с местным нагревом прочность снижается меньше, чем при сварке. Поэтому специальной термической обработки с целью повышения прочности зон термического влияния паяного шва не производят. Для повышения прочности основного материала или снижения собственных напряжений в основном металле или паяном шве иногда проводят общую термическую обработку.

При расчете прочности паяных соединений исходят из тех же предпосылок, что и сварных. Если элемент паяной конструкции работает на продольное растягивающее напряжение, то из условия равнопрочности расчет стыковых паяных соединений производится по формуле

$$\sigma = \frac{P}{F} \leq [\sigma]_p,$$

где F — площадь поперечного сечения наиболее слабого из соединяемых пайкой элементов конструкции;

$[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение для основного металла изделия при растяжении.

При работе элемента паяной конструкции на сжатие расчет производят по формуле

$$\sigma = \frac{P}{F} \leq [\sigma]_{сж},$$

где $[\sigma]_{сж}$ — допускаемое напряжение для основного металла при сжатии.

В нахлесточных паяных швах величину нахлестки определяют по формуле

$$[\sigma]_p F = b l [\tau']_{ср},$$

где l — величина нахлестки;

b — ширина шва;

$[\tau']_{ср}$ — допускаемое напряжение в паяном шве при срезе.

Величина нахлестки

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

Протяженность нахлесточных швов в телескопических соединениях определяют по формуле

$$l = \frac{[\sigma]_p F}{2\pi R [\tau']_{ср}},$$

где R — радиус охватываемой трубы.

При тавровом соединении в конструкциях, работающих на изгиб, напряжения на срез определяют по формуле

$$\tau = \frac{QS}{IS_b},$$

где Q — сила в элементе, испытывающем поперечный изгиб;
 S — статический момент площади пояса относительно центра тяжести сечения;
 I — момент инерции всего сечения;
 S_b — толщина вертикальной стенки, соответствующая ширине шва.

Обычно напряжения на срез в поясных паяных швах при поперечном изгибе незначительны и много ниже допускаемых.

В ступенчатом паяном соединении при расчете необходимо одновременно учитывать срезающие и растягивающие напряжения (рис. 76, б, 1):

$$P = [\tau']_{cp} bl + [\sigma']_p b (a + c),$$

где $[\sigma']_p$ — допускаемое напряжение на растяжение в паяном шве;
 a и c — толщина ступеней соединения.

Стыковое соединение с накладками в конструкции рассчитывают с учетом равномерного распределения нагрузки по площади стыкового и нахлесточного швов.

§ 3. Концентрация напряжений в паяных соединениях

Паяные стыковые соединения работают под нагрузкой аналогично сварным с мягкой прослойкой, прочность которых была изучена О. А. Бакши, А. И. Киселевым и др.

Особенности паяных стыковых соединений заключаются в том, что предел текучести паяного шва (мягкой прослойки) меньше предела текучести основного металла, модуль упругости паяного шва E' меньше модуля упругости основного металла E . В мягких прослойках при сварке, как правило, E' имеет величину, мало отличающуюся от E .

При работе паяного стыкового соединения в пределах упругих деформаций прослойка упрочняется вследствие ряда факторов. Прочностные свойства припоя в результате насыщения основным металлом повышаются, в частности возрастает его предел текучести.

Продольные деформации в основном металле $\epsilon_z = \frac{\sigma}{E}$ вызывают поперечное сокращение образца, равное $\mu\epsilon_z$; в то же время продольные деформации в прослойке $\epsilon'_z = \frac{\sigma}{E'}$ и поперечное сокращение $\mu\epsilon'_z$ больше, чем $\mu\epsilon_z$ (где μ — коэффициент поперечного сокращения).

В паяных соединениях стержней с круглым поперечным сечением в результате неодинакового поперечного сокращения стержня и прослойки на границе с зоной сплавления возникают сжимающие напряжения, а кольцевая прослойка подвергается равномерному растяжению по радиальным направлениям $\sigma_r = E'(\epsilon'_z - \epsilon_z) \mu$.

В прослойке образуются также растягивающие напряжения по касательной $\sigma_t = \sigma_r$.

Таким образом, в пределах упругих деформаций кольцевая прослойка испытывает трехосные растягивающие напряжения σ_z , σ_r , σ_t . Концентрация этих напряжений не велика, так как σ_r и σ_t значительно меньше σ_z . Напряжения σ_r и σ_t способствуют повышению предела текучести и понижению деформации прослойки.

В пластическом состоянии поле напряжений в мягкой прослойке толщиной S_0 изображено на рис. 90. В паяном шве образуются напряжения: продольные σ_z , радиальные σ_r , касательные σ_t и тангенциальные $\tau_{zr} = \tau_{rz}$ в кольцевых поверхностях стержня.

Из теории пластичности известно, что наибольшие по величине напряжения возникают в прослойке на контактных поверхностях.

Если допустить, что модули упругости прослойки E' и основного металла E примерно одинаковые, то

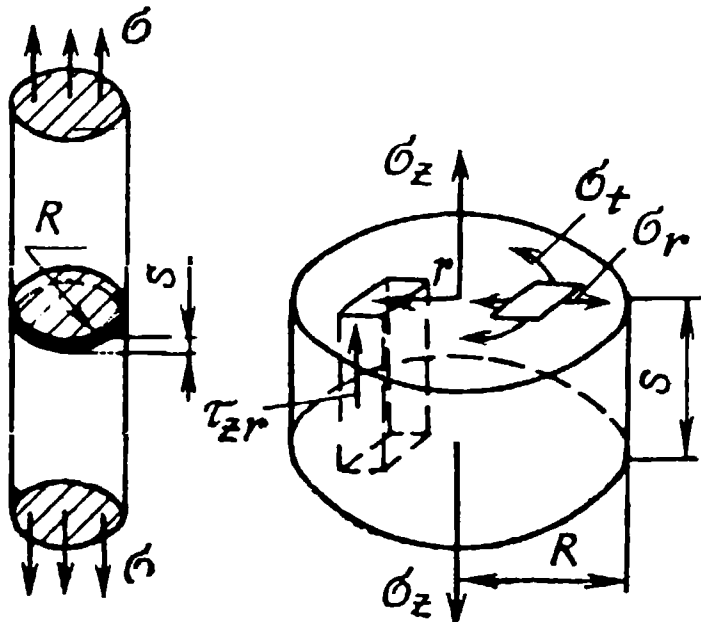


Рис. 90. Стыковое соединение с мягкой прослойкой (паяный шов) и поле напряжений

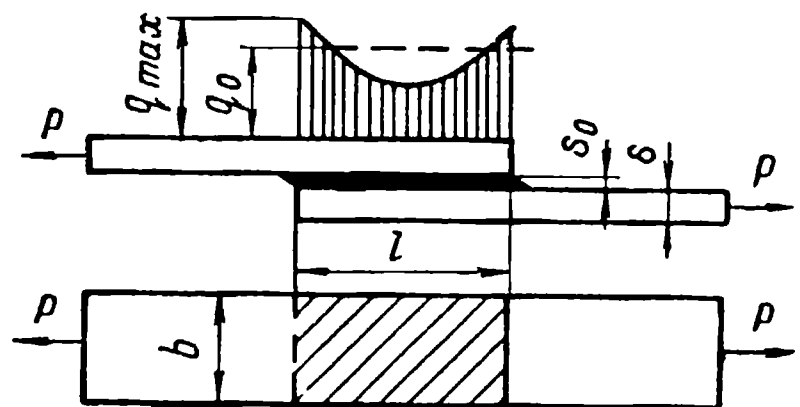


Рис. 91. Паяное соединение внахлестку

при достижении тангенциального напряжения на контактных плоскостях $\tau_{zr} = \tau_{rz} = \tau_t$ нормальные напряжения в прослойке составят:

$$\sigma_z = \sigma_t \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{S_0} (R - r) \right],$$

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_t \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{S_0} (R - r),$$

где σ_t — предел текучести прослойки при одноосном напряженном состоянии;

R — радиус стержня;

r — радиус, определяющий положение точки в сечении.

Наибольшие напряжения будут при r , равном нулю:

$$\sigma_z = \sigma_t \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R}{S_0} \right], \quad \sigma_r = \sigma_t = \sigma_t \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R}{S_0}.$$

Так как в тонких прослойках отношение R/S_0 очень велико, то напряженное состояние описывать последними формулами нельзя. Задолго до образования в сечении полной текучести напряжения σ_z достигают таких значений, что происходит хрупкое разрушение стержня. То же самое происходит в стержнях с другим поперечным сечением.

Характер работы паяного шва при модуле упругости E' , приближающемся к весьма малой величине, отличается от случая, когда $E' = E$. Однако и в этом случае возникновение σ_z на контактных поверхностях было бы возможным лишь при весьма больших значениях σ_z , приводящих к разрушению стержней. Таким образом, при всех промежуточных значениях $E' \neq E$ мягкие прослойки при пайке встык разрушаются хрупко.

В нахлесточных соединениях распределение касательных напряжений q по длине нахлестки в направлении действия сил происходит неравномерно и в значительной степени аналогично условиям работы сварных фланговых швов. Для соединения двух деталей с равными площадями поперечных сечений F (рис. 91) наибольшее значение $q_{\max}$ на единицу длины паяного шва в концевых точках определяется уравнением

$$q_{\max} = \frac{\alpha P}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha l} \right),$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{2Gb}{EFS_0}};$

G — модуль упругости паяного шва при сдвиге;

b — ширина шва;

E — модуль упругости основного металла при растяжении;

S_0 — толщина мягкой прослойки (паяного шва);

l — длина нахлестки.

Если из условия статической равнопрочности паяного шва и основного металла принять $l = 2\delta$; $F = \delta b$ (где δ — толщина образца основного металла), то

$$\alpha l = \sqrt{\frac{2Gb l^2}{EFS_0}} = \sqrt{\frac{2Gb 4\delta^2}{Eb\delta S_0}} = 2 \sqrt{\frac{2G\delta}{ES_0}}.$$

Коэффициент концентрации напряжений в паяном шве

$$\beta = \frac{q_{\max}}{q_0} = \frac{\alpha P}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha l} \right) \frac{l}{P} = \frac{\alpha l}{2} \left(\frac{1 + \operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha l} \right).$$

Значения коэффициентов концентрации β задают в функции $\frac{2G\delta}{ES_0} = Z$ (рис. 92).

Примем модуль упругости мягкой прослойки латунного припоя Л63 равным $10\,000 \text{ кг/мм}^2$, $G = 4000 \text{ кг/мм}^2$, модуль упругости стали $E = 20\,000 \text{ кг/мм}^2$, то $G/E = 0,4$. Чем меньше величина отношения G/E , тем соответственно меньше коэффициент концентрации.

На рис. 93 показана зависимость касательного напряжения τ от угла сдвига θ . Тангенс угла φ_0 наклона прямой выражает при этом условную величину модуля упругости G_0 при пластической деформации. Очевидно, что выравнивание касательных напряжений и устранение их концентрации возможны лишь при очень больших пластических деформациях. При меньших пластических деформациях в паяных швах возникает концентрация напряжений, которая монотонно снижается в процессе деформирования.

Пластические деформации в нахлесточных паяных соединениях сопровождаются снижением концентрации напряжений в крайних точках соединений и выравниванием эпюры напряжений по длине соединения, что характерно для паяных швов.

Паяные соединения встык склонны к разрушениям в хрупком состоянии. Паяные нахлесточные соединения сохраняют свои пластические свойства и этим самым устраняются концентрации напряжений, которые наблюдаются при их работе в пределах упругих деформаций.

Для сопоставления коэффициентов концентрации напряжений в нахлесточных соединениях с паяными швами и в нахлесточных

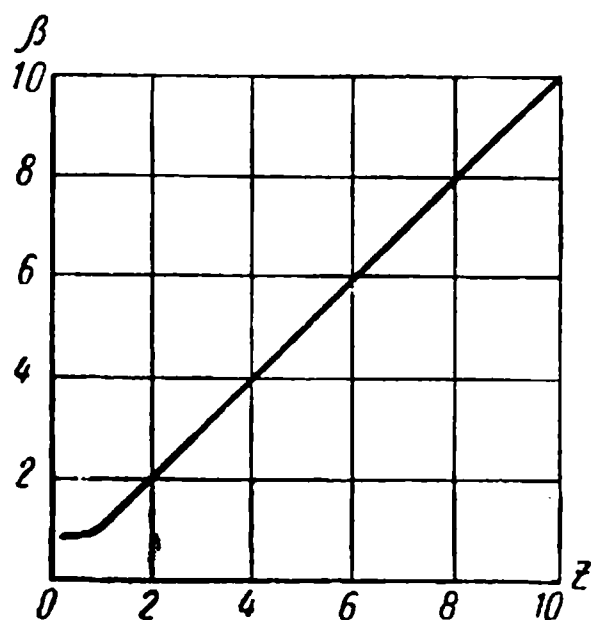


Рис. 92. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от величины Z

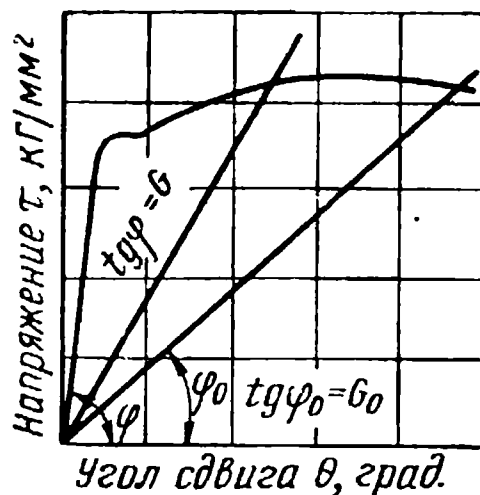


Рис. 93. Зависимость угла сдвига от касательных напряжений

соединениях со сварными швами (с применением угловых лобовых швов) были выполнены специальные модели, имитирующие эти соединения, но в крупном масштабе с целью установки на них тензодатчиков. Толщина моделей была принята равной 1 мм. Модели испытывали под статической нагрузкой при растяжении и изгибающим моментом.

На основе измерения деформаций в каждой исследуемой точке в двух взаимно перпендикулярных направлениях определялись напряжения по формулам:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_x + \mu \epsilon_y);$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_y + \mu \epsilon_x),$$

где ϵ_x — относительная деформация, направленная по оси X ;
 ϵ_y — относительная деформация, направленная по оси Y ;
 μ — коэффициент Пуассона, равный 0,3.

Наибольшая величина концентраций напряжений в паяных соединениях при заданном нагружении $P = 1000 \text{ кг}$ составляла 600 кг/см^2 . Наибольший коэффициент концентрации напряжений равнялся 2,5.

При повторении экспериментов на образцах из оптически прозрачного материала толщиной 5 мм вырезали модели, имитирующие

распределение напряжений в паяном нахлесточном соединении и в сварном с двумя лобовыми швами. Величины максимальных напряжений определяли путем пропускания через деформированную модель поляризованного монохроматического пучка света.

В паяном соединении коэффициент концентрации составил свыше 9,5, а в сварном — около 11,7.

Испытания оптических моделей дали возможность с большей точностью, чем в металлических образцах, определить коэффициент концентрации напряжений, так как при испытании образцов напряжения измеряли электротензометром на базе 10 мм, что следует признать совершенно недостаточным.

Оба метода изучения концентрации напряжений в паяном и сварном нахлесточном соединении показали, что коэффициенты концентрации при пайке меньше, чем при сварке. Это объясняется более рациональной формой паяного соединения по сравнению с угловыми лобовыми швами, получаемыми при сварке.

На основе экспериментов, проведенных в МВТУ им. Баумана на образцах из малоуглеродистой стали Ст.3 и стали 10, найдена зависимость прочности нахлесточных соединений при пайке от величины нахлестки. В качестве припоя применяли медноцинковый сплав Л63 с температурой плавления около 900°C и с пределом прочности 30 кг/мм^2 . В качестве флюса применяли буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Зависимость прочности нахлесточного соединения при пайке от величины нахлестки для стали 30ХГСА в состоянии поставки приведена на рис. 94. Эксперименты подтвердили, что величина нахлестки, равная (2—3) δ , для малоуглеродистой стали обеспечивает равнопрочность с основным металлом. С увеличением прочности основного металла при том же припое величина нахлестки, обеспечивающая равнопрочность с основным металлом, увеличивается.

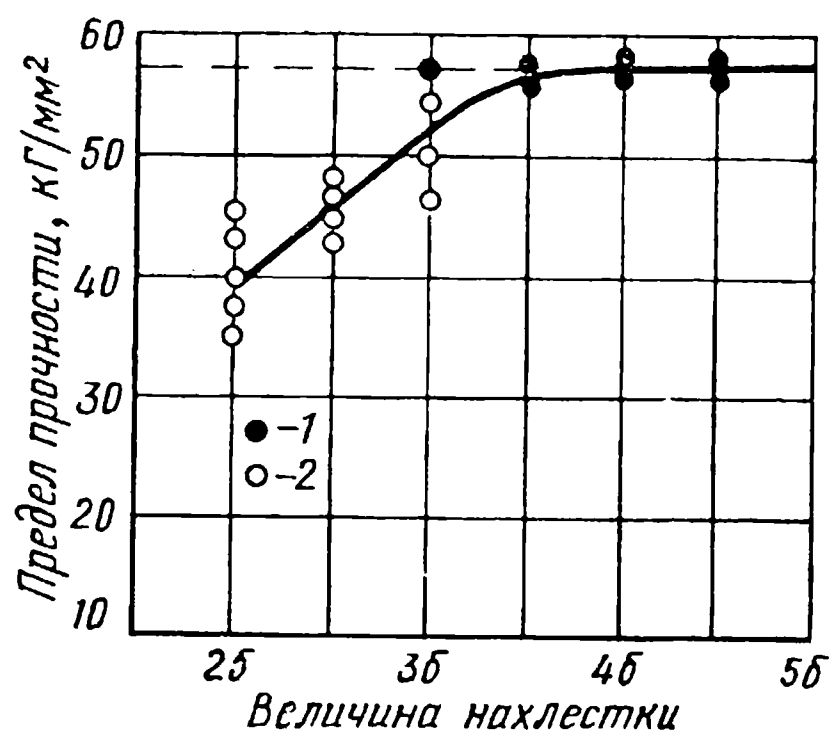


Рис. 94. Прочность паяных соединений в зависимости от величины нахлестки: ● — разрушение по основному материалу; ○ — разрушение по шву

§ 4. Собственные напряжения и деформации в паяных конструкциях

Собственными, или внутренними, напряжениями называют напряжения, возникающие в материале без приложения внешних сил [42]. Существование собственных напряжений было открыто в 80-х годах прошлого столетия русским ученым Н. В. Калакуцким. В зависимости от объема, в котором уравниваются собственные напряжения, их подразделяют на собственные напряжения первого

рода, уравнивающих в макрообъемах, соизмеримых с размерами изделия; второго рода, уравнивающих в микрообъемах в пределах одного или нескольких зерен металла, и третьего рода, уравнивающих в ультрамикрообъемах в пределах кристаллической решетки металла. Собственные напряжения первого рода определяют теоретически методами сопротивления материалов, с помощью теории упругости или пластичности, а также экспериментально. Собственные напряжения второго и третьего рода определяют опытным путем на основе анализа рентгенограмм.

В зависимости от направления в пространстве собственные напряжения могут быть линейные или одноосные, плоскостные или двухосные и объемные или трехосные. Основной особенностью собственных напряжений является то, что они образуют взаимоуравновешенную систему сил.

В паяных конструкциях собственные напряжения могут быть результатом предшествующей обработки, связанной с деформированием металла или обработкой резанием, а также образоваться при сборке в результате неподвижного закрепления элементов паяемого изделия. Непосредственно при пайке собственные напряжения могут возникнуть в результате неравномерного местного нагрева, а также структурных и фазовых превращений в металле. Значения собственных напряжений, возникающих в процессе пайки, зависят от состава и структуры паяемых металлов, соотношения толщин соединяемых элементов деталей, величины зазора и технологии пайки. Наибольших значений собственные напряжения достигают при пайке разнородных материалов.

При изготовлении паяных конструкций приходится соединять пайкой металлы с резко различными физико-химическими свойствами, а также металлы со стеклом, графитом, керамикой, полупроводниками и т. п. Так, в машиностроении, в производстве инструмента широко применяют пайку пластинок из твердых сплавов с конструкционными сталями. Различие в значениях коэффициентов линейного расширения указанных материалов приводит к образованию в паяном шве собственных (внутренних) температурных напряжений.

Ниже приведены значения коэффициентов линейного расширения металлов ($\alpha \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), применяемых в паяных конструкциях:

Алюминий	23,1	Молибден	5,3
Вольфрам	4,4	Медь	16,5
Железо	11,5	Никель	13,5
Кадмий	31,0	Олово	22,5
Кремний	6,9	Свинец	28,1
Кобальт	12,5	Серебро	18,7
Магний	26,1	Цинк	39,5
Марганец	22,0	Хром	8,4

Коэффициенты линейного расширения сплавов близки к коэффициентам линейного расширения основы сплава. Например, коэффициенты линейного расширения алюминиевых сплавов АМц и АМг соответственно равны $23,3 \cdot 10^{-6}$ и $23,6 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Коэффициенты линейного расширения низкоуглеродистых сталей мало отличаются

от коэффициента линейного расширения железа. Наиболее распространенная нержавеющая сталь Х18Н9Т имеет коэффициент линейного расширения $14,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Чем больше различия в коэффициентах линейного расширения соединяемых металлов, тем выше термические напряжения, возникающие в шве после пайки.

Рассмотрим причины возникновения и способы борьбы с собственными напряжениями при пайке.

Допустим сначала, что элементы изделия, подвергающиеся пайке, обладают одинаковыми физико-механическими свойствами и что толщина их обеспечивает равномерное остывание. Этот случай — наиболее благоприятный. Оба элемента при остывании деформируются совместно. Зона сплавления между ними очень узкая. Поэтому даже при неодинаковом деформировании ее и паяемых элементов в них не могут возникнуть существенные усилия. Остаточные деформации в элементах при этом незначительны. Однако местные остаточные напряжения в зоне шва в отдельных случаях могут ухудшить прочность соединений.

Допустим, что производится пайка элементов с неодинаковыми физико-механическими свойствами, имеющими разные площади поперечного сечения. Модуль упругости, площадь поперечного сечения и коэффициент температурного расширения обозначим соответственно E_1, F_1, α_1 (для элемента 1) и E_2, F_2, α_2 (для элемента 2). Обозначим температуры, с которых начинается образование упруго-пластических деформаций элемента 1, через T_1 , а элемента 2 — через T_2 .

Рассмотрим случай пайки симметричных соединений [43]. При температуре T_1 в элементе 1 начинается накопление упруго-пластических деформаций. Если бы он остывал свободно, то его сокращение после остывания составило бы

$$\delta_1 = \alpha_1 (T_1 - T_0) l,$$

где T_0 — температура соединения после полного остывания.

Соответственно свободная деформация элемента 2 после полного остывания

$$\delta_2 = \alpha_2 (T_2 - T_0) l.$$

На рис. 95 дана схема образования упруго-пластических деформаций соединения при его остывании. При $T = T_0$ свободные деформации соответственно равны δ_1 и δ_2 . Разность их $\Delta = \delta_1 - \delta_2$.

В действительности элементы жестко соединены и поэтому при остывании деформируются совместно. Сечения их остаются плоскими, а вследствие этого элемент 1 должен упруго или упруго-пластически удлиняться на величину Δ_1 , а элемент 2 — укорачиваться на Δ_2 . В элементе 1 образуются деформации растяжения, а в элементе 2 — сжатия (рис. 96).

Положение поперечного сечения спаянных элементов определяется условиями статического равновесия — взаимного уравнивания внутренних сил.

Напряжения по длине элементов распределяются неравномерно. По концам на свободных поверхностях они равны нулю. Наибольшие напряжения по середине образца. Если паяные образцы имеют значительную длину, то на некотором ее участке напряжения распреде-

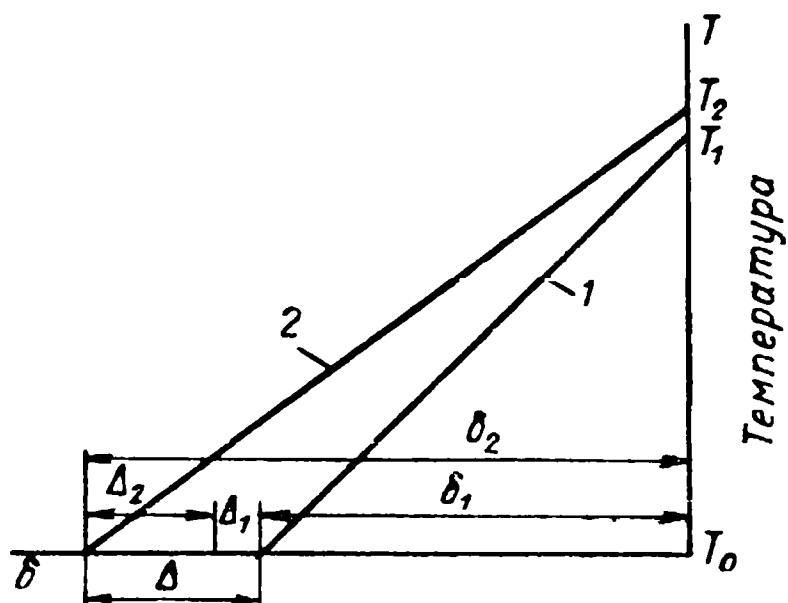


Рис. 95. Схема образования упруго-пластических деформаций спаянных пластин (1 и 2) в результате охлаждения после пайки

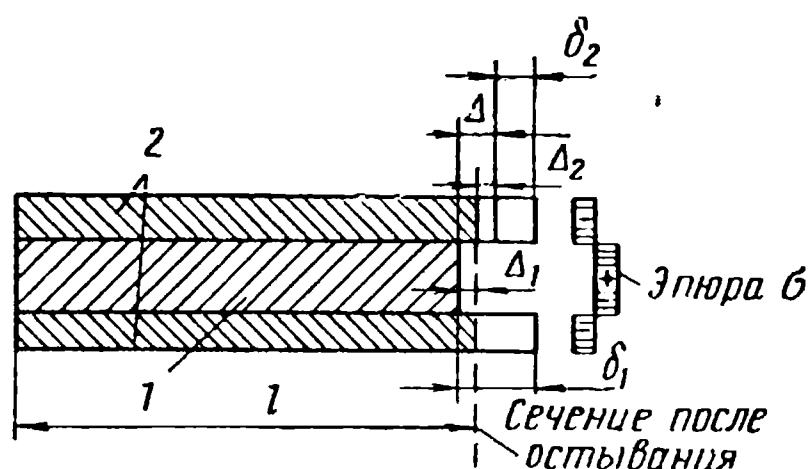


Рис. 96. Схема образования остаточных напряжений в шве в результате охлаждения при пайке разнородных металлов:

1 — шов; 2 — пластины из разнородных металлов

ляются равномерно (рис. 97). Если длина элементов незначительна, то напряжения по длине распределяются по закону квадратной параболы (рис. 98).

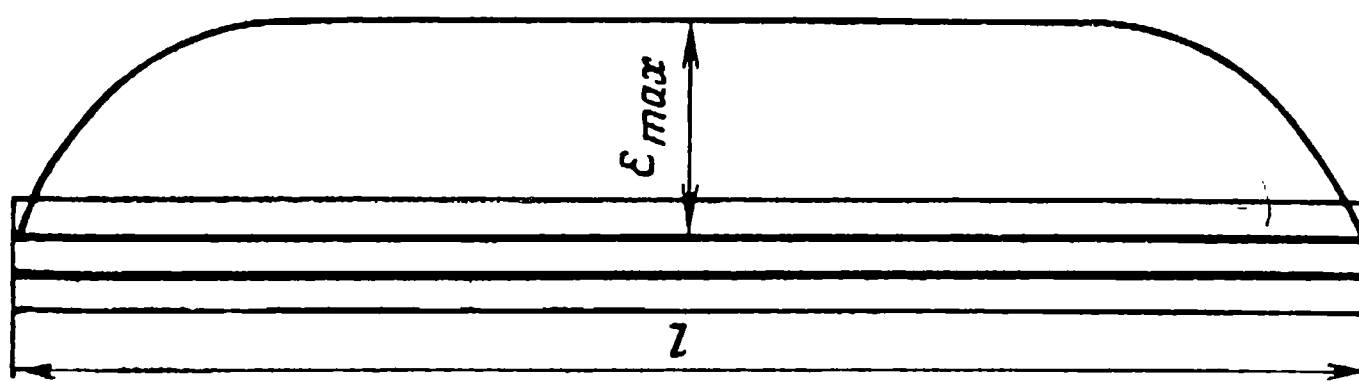


Рис. 97. Распределение упругих деформаций по длине шва при большой величине нахлестки

Предположим, что длины элементов невелики и упругие деформации в них определяются соотношением

$$\varepsilon = \frac{4\varepsilon_{\max}}{l^2} x (l - x), \quad (1)$$

где ε — упругая деформация на расстоянии x от конца элемента;
 l — длина соединяемых деталей;
 $\varepsilon_{\max}$ — наибольшая упругая деформация посередине;
 x — текущая координата.

На длине dx абсолютная величина упругой деформации составляет εdx , полная деформация элемента l равна

$$\Delta_1 = \int_0^l \varepsilon dx = \int_0^l \frac{4\varepsilon_{\max}}{l^2} x (l - x) dx = \frac{2}{3} \varepsilon_{\max} l, \quad (2)$$

откуда для элемента l находим

$$\varepsilon_{1\max} = 1,5 \frac{\Delta_1}{l}. \quad (3)$$

Аналогичным образом вычисляем наибольшую относительную деформацию посередине элемента 2, которая равна

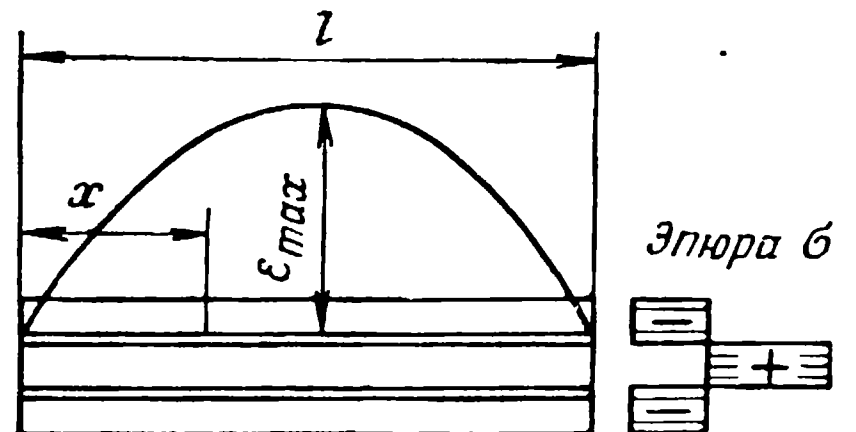
$$\varepsilon_{2\max} = 1,5 \frac{\Delta_2}{l}. \quad (4)$$

Как было сказано ранее, должно быть выполнено условие уравнивания внутренних сил:

$$2\varepsilon_{1\max}E_1F_1 - \varepsilon_{2\max}E_2F_2 = 0, \quad (5)$$

откуда

$$\frac{\varepsilon_{1\max}}{\varepsilon_{2\max}} = \frac{E_2F_2}{2E_1F_1}. \quad (6)$$



Сумма деформаций

$$\Delta_1 + \Delta_2 = \Delta. \quad (7)$$

Рис. 98. Распределение упругих деформаций по длине шва при малой величине нахлестки

Вставляя в уравнение (7) значения Δ_1 и Δ_2 из уравнений (3) и (4), находим

$$\frac{2}{3} \varepsilon_{1\max}l + \frac{2}{3} \varepsilon_{2\max}l = \Delta. \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (6) и (8), получаем

$$\varepsilon_{1\max} = \frac{1,5 \frac{\Delta}{l}}{1 + \frac{2E_1F_1}{E_2F_2}}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{2\max} = \frac{1,5 \frac{\Delta}{l}}{1 + \frac{E_2F_2}{2E_1F_1}}. \quad (10)$$

Следовательно, наибольшие нормальные напряжения $\sigma_{1\max}$ и $\sigma_{2\max}$, возникающие при остывании элементов 1 и 2, соответственно равны

$$\sigma_{1\max} = \frac{1,5\Delta \frac{E_1}{l}}{1 + \frac{2E_1F_1}{E_2F_2}}; \quad (11)$$

$$\sigma_{2\max} = \frac{1,5\Delta \frac{E_2}{l}}{1 + \frac{E_2F_2}{2E_1F_1}}. \quad (12)$$

Если толщины соединяемых элементов одинаковы, то $F_1 = F_2$ и

$$\sigma_{1\max} = \frac{1,5\Delta \frac{E_1}{l}}{1 + 2 \frac{E_1}{E_2}}. \quad (13)$$

Наибольшее значение $\sigma_{1\max}$ имеет, когда $\frac{E_1}{E_2}$ приближается к нулю, т. е. когда E_2 велико по сравнению с E_1 .

Если $E_1 = E_2 = E$ и разность деформаций элементов 1 и 2 является следствием лишь различных теплофизических свойств деталей (коэффициентов температурных расширений), то $\sigma_{1\max} = \Delta E/2l$.

Аналогичным образом находим величину

$$\sigma_{2\max} = \frac{1,5\Delta \frac{E_2}{l}}{1 + \frac{E_2}{2E_1}}. \quad (14)$$

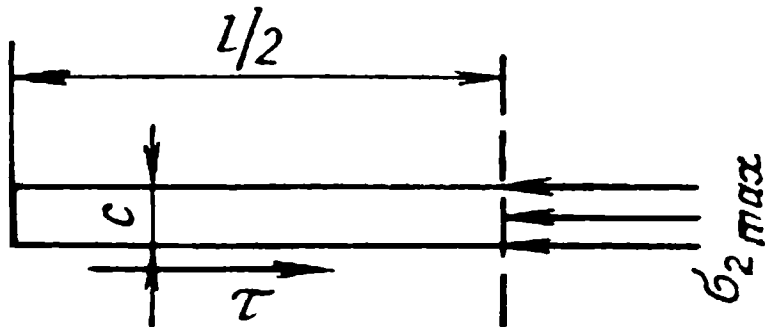


Рис. 99. Схема возникновения срезающих напряжений в паяных швах

В этом случае напряжение $\sigma_{2\max}$ растет с увеличением модуля упругости E_1 .

Напряжения $\sigma_{1\max}$ и $\sigma_{2\max}$ тем больше, чем значительнее величина Δ — разность свободных деформаций соединяемых деталей, отнесенная к единице длины. При значительной величине Δ остаточные напряжения могут достигать предела текучести.

Между соединяемыми элементами возникают касательные напряжения. Для их определения в плоскости спая рассмотрим равновесие отрезанного участка (рис. 99):

$$\sigma_{2\max}cb - \tau \frac{l}{2} b = 0, \quad (15)$$

где b и c — соответственно ширина и толщина соединяемых элементов;

τ — касательное напряжение в плоскости спая.

Из этого соотношения находим

$$\tau = \frac{\sigma_{2\max}c}{\frac{l}{2}}. \quad (16)$$

Касательное напряжение τ растет с увеличением отношения толщины элемента к его длине. Обычно c/l во много раз меньше единицы, поэтому срезающие напряжения в плоскости шва значительно меньше нормальных остаточных напряжений в элементах.

В рассматриваемом случае деформации паяных элементов симметричны. В результате пайки возникают продольные сокращения.

Рассмотрим теперь другой случай — соединение двух элементов с площадями поперечных сечений F_1 и F_2 , модулями упругости E_1 и E_2 , имеющими различные коэффициенты термического расширения (рис. 100).

При остывании свободные деформации элементов 1 и 2 будут неодинаковыми. Разность их по-прежнему обозначим Δ .

Как и в предыдущем случае, будем считать, что распределение нормальных остаточных деформаций и напряжений по длине соединяемых элементов происходит неравномерно, что остаточные напряжения и деформации имеют максимальное значение посередине элемента.

В соответствии с параболическим законом остаточные деформации по длине можно выразить формулами

$$\varepsilon_{1\max} = \frac{1,5\Delta}{l}; \quad \varepsilon_{2\max} = -\frac{1,5\Delta}{l}.$$

В рассматриваемом случае можно записать два условия статического равновесия. Если бы изгибающие моменты отсутствовали,

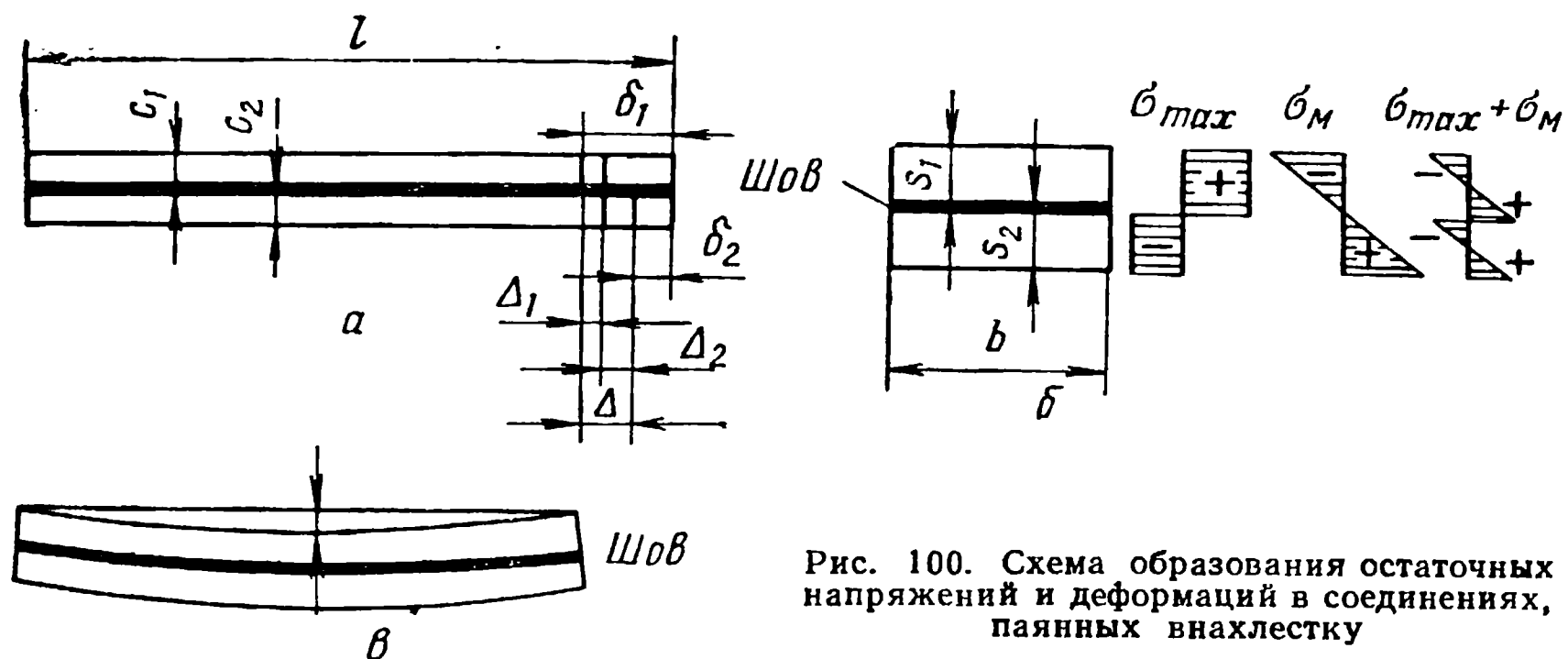


Рис. 100. Схема образования остаточных напряжений и деформаций в соединениях, паянных внахлестку

то остаточные напряжения при охлаждении двух пластин можно было найти по формулам:

$$\sigma_{1\max} = \frac{1,5 \frac{\Delta E_1}{l}}{1 + \frac{E_1 F_1}{E_2 F_2}};$$

$$\sigma_{2\max} = \frac{1,5 \frac{\Delta E_2}{l}}{1 + \frac{E_2 F_2}{E_1 F_1}}.$$

Внутренние силы в поперечном сечении (рис. 100, б) в рассматриваемом случае приводятся к паре

$$\sigma_{1\max} F_1 = \sigma_{2\max} F_2. \quad (17)$$

Момент этой пары сил

$$M = \sigma_{1\max} F_1 \left(\frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2} \right). \quad (18)$$

Для взаимного уравновешивания внутренних сил необходимо приложить момент M противоположного знака.

Напряжения от момента M в паяном соединении определяются по формуле

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{1\max} F_1 \left(\frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2} \right)}{W}, \quad (19)$$

где W — момент сопротивления, равный $\frac{(c_1 + c_2)^2}{6} b$.

Суммарные остаточные напряжения должны быть найдены суммированием напряжений, определенных по формулам (11) и (12), с напряжениями, вызванными от момента, соответствующего формуле (19).

Рассмотрим частный случай, когда $F_1 = F_2$ и $c_1 = c_2 = c$.

В этом случае остаточные напряжения от продольного сокращения

$$\sigma_{1\max} = \frac{1,5\Delta \frac{E_1}{l}}{1 + 2 \frac{E_1}{E_2}}. \quad (20)$$

Остаточные напряжения от момента

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{1\max} bc \left(\frac{c}{2} + \frac{c}{2} \right)}{(2c)^2 \frac{b}{6}} = \frac{3}{2} \sigma_{1\max}. \quad (21)$$

Эпюра суммарных остаточных напряжений будет иметь вид, как показано на рис. 100, б.

Искривление элементов при этом изобразится, как показано на рис. 100, в.

Таким образом, в паяных конструкциях, как и в сварных, возможно образование остаточных деформаций, вызывающих продольные и поперечные усадки — сокращения элементов, а в случае асимметрии — деформаций изгиба, сопровождаемых искривлением элементов. В большинстве случаев деформации при пайке меньше по величине, чем при сварке, и лишь при пайке разнородных материалов они могут оказаться значительными.

Следует отметить, что в паяных деталях из металлов с различными физико-механическими свойствами устранить остаточные напряжения обычными способами, например термически высоким отпуском, невозможно. Действительно, в процессе нагрева собственные напряжения релаксируются. Однако при остывании и неодинаковой деформации в элементах с разными свойствами неизбежно накапливаются упруго-пластические деформации, которые сопровождаются остаточными напряжениями. Таким образом, после окончания отпуска в паяных соединениях этого рода возникнут остаточные напряжения вследствие неравномерного их остывания.

Пример. Определить остаточные напряжения, образующиеся при пайке двух пластин 1 из низколегированной стали Ст.1 с пластиной 2 из аустенитной стали типа 1X18H9. Пластины паяют припоем при 740°C . Длины пластин l приняты равными 1 м. Площади поперечных сечений $F_1 = F_2 = F$. Коэффициент термического расширения пластины 1 в рассматриваемом интервале температур $\alpha_1 \approx 14,1 \cdot 10^{-6}$, для пластины 2 соответственно $\alpha_2 \approx 19,0 \cdot 10^{-6}$. Относительные величины модулей упругости E_1 и E_2 для пластин 1 и 2 в функции температуры приведены на рис. 101. При T_0 модуль $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$.

Свободное сокращение пластины 1 при ее остывании до 20°C

$$\delta_1 = \alpha_1 (T_1 - T_0) l = 14,1 (740 - 20) 10^{-6} l = 1,022 \cdot 10^{-2} l.$$

Свободное сокращение пластины 2

$$\delta_2 = \alpha_2 (T - T_0) l = 19,0 (740 - 20) 10^{-6} l = 1,368 \cdot 10^{-2} l.$$

Разность свободных сокращений

$$\Delta = \delta_2 - \delta_1 = 1,368 \cdot 10^{-2} l - 1,022 \cdot 10^{-2} l = 0,346 \cdot 10^{-2} l.$$

Принимаем, что распределение упругих деформаций по длине пластины происходит по закону квадратной параболы.

Чтобы определить остаточные напряжения, необходимо относительные деформации $\epsilon_{1\text{max}}$ и $\epsilon_{2\text{max}}$ умножить на средние значения модулей упругости в процессе охлаждения пластин от температуры 700°C . Их средние значения могут быть определены по кривым рис. 101:

$$E_{1\text{сред}} = (0 + 0,30 + 0,60 + 0,80 + 0,90 + [+ 0,95 + 0,98] \frac{E}{7} \approx 0,65E;$$

$$E_{2\text{сред}} = (0,60 + 0,72 + 0,82 + 0,88 + 0,94 + + 0,96 + 0,98) \frac{E}{7} \approx 0,84E.$$

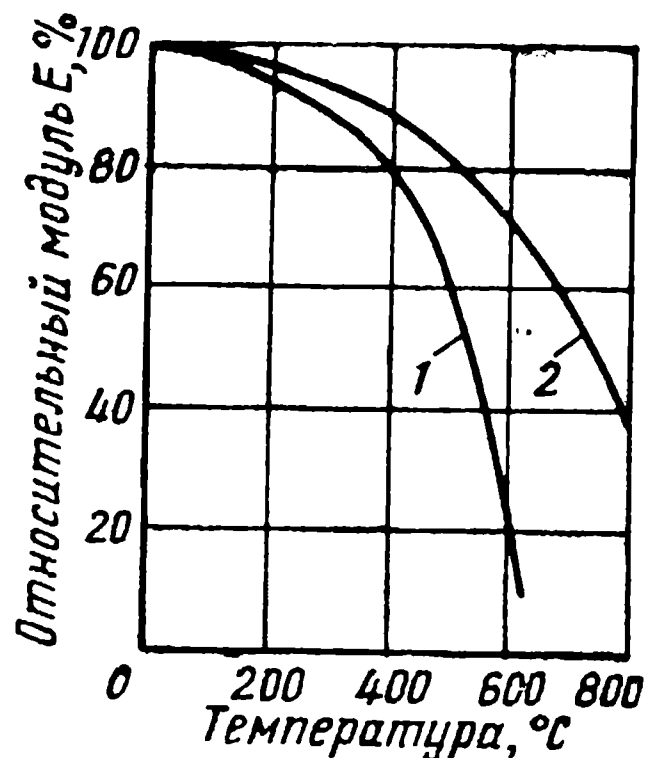


Рис. 101. Зависимость модуля упругости E от температуры: 1 — низколегированная перлитная сталь ($\alpha = 14,1 \cdot 10^{-6}$); 2 — сталь 1X18H9 ($\alpha = 19,0 \cdot 10^{-6}$)

Поэтому наибольшее остаточное напряжение от продольного сокращения в пластинах 1 и 2 определяем по формуле (11):

$$\sigma_{1\text{max}} = \frac{1,5 \cdot 0,346 \cdot 10^{-2} \cdot 0,65 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{1 + \frac{0,65 \cdot 10^6}{0,84 \cdot 10^6}} = 4000 \text{ кг/см}^2;$$

$$\sigma_{2\text{max}} = \frac{1,5 \cdot 0,346 \cdot 10^{-2} \cdot 0,84 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{1 + \frac{0,84 \cdot 10^6}{0,65 \cdot 10^6}} = 4000 \text{ кг/см}^2.$$

Эти же значения можно было получить непосредственно из условия $F_1 = F_2$.

Если пределы текучести меньше этих значений, то напряжения достигают σ_T (предела текучести).

В пластине 1 остаточные напряжения растягивающие, в пластине 2 — сжимающие.

Касательные напряжения в плоскости паяного шва находят по формуле (16):

$$\tau = \frac{2\sigma_{2\text{max}}}{l} = \frac{2 \cdot 400 \cdot 0,5}{100} = 40 \text{ кг/см}^2.$$

Снижение собственных напряжений в случае соединения, например, пластинок твердого сплава со стальным корпусом, коэффициенты

линейного расширения которых резко различаются, достигается или применением припоев со сравнительно низкой температурой плавления, или увеличением толщины шва.

При применении легкоплавких серебряных припоев в результате снижения температуры пайки при охлаждении относительный сдвиг между корпусом инструмента и пластинкой твердого сплава уменьшается. Как следствие этого, собственные напряжения будут иметь меньшую величину. Однако недостатком такого способа снижения собственных напряжений является низкая теплостойкость инструмента и высокая его стоимость.

При увеличении толщины слоя припоя в паяном шве собственные напряжения распределяются по большей толщине и, следовательно, имеют меньшее значение. Однако следует учитывать, что увеличение зазора ведет к снижению прочности паяного соединения. Чтобы этого избежать, увеличение толщины слоя припоя при пайке инструмента делается искусственно, путем помещения в зазор между соединяемыми пайкой поверхностями деталей компенсационных прокладок из железной, медной и никелевой фольги или сетки толщиной 0,4 мм. Для этой цели применяют железоникелевый сплав пермаллой, содержащий 45% Ni. Применение компенсационных прокладок в 1,5 раза повысило прочность твердосплавного паяного инструмента, что позволило производить его закалку после пайки, когда требуется повысить механические свойства стального корпуса.

Уменьшения собственных напряжений при пайке твердосплавного инструмента можно достигнуть использованием соответствующей формы паза для пластинки твердого сплава. Для снижения внутренних напряжений можно применять также релаксационный отпуск инструмента и обработку холодом.

Наименьшие собственные напряжения возникают при соединении пластинок твердого сплава и стального корпуса инструмента пайкой по одной плоскости. Собственные напряжения, образующиеся в процессе пайки, складываясь с рабочими напряжениями, дополнительно нагружают элементы конструкции и вызывают преждевременный выход ее из строя. Поэтому при конструировании и изготовлении паяных изделий необходимо знать причины возникновения собственных напряжений в паяных швах и пути их уменьшения.

Глава VII

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ
ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ

Технология пайки включает комплекс последовательно выполняемых операций, основными из которых являются подготовка поверхности соединяемых деталей, сборка, пайка и обработка деталей после пайки. Этот комплекс операций в том или ином объеме имеет место при всех способах пайки. Поэтому, несмотря на их разнообразие, технология пайки имеет много общего. Независимо от применяемого способа пайки для получения качественных паяных соединений требуется:

1. Тщательная очистка соединяемых поверхностей деталей перед пайкой от загрязнений и окисных пленок. Если при сварке загрязнения и окисные пленки в зоне шва приводят лишь к снижению прочностных и других характеристик сварного соединения, то при пайке они препятствуют взаимодействию между основным металлом и расплавленным припоем и, следовательно, образованию спаев.

2. Соблюдение при сборке деталей под пайку установленных соединительных зазоров.

3. Удаление окисной пленки с соединяемых поверхностей основного металла и припоя в процессе пайки. Для получения паяного соединения недостаточно очистить соединяемые поверхности металлов перед процессом пайки. Необходимо также обеспечить надежные условия удаления окисной пленки непосредственно в процессе пайки.

4. Равномерный нагрев соединяемых поверхностей деталей до температуры пайки. Если при сварке плавлением для образования шва необходимо лишь местное расплавление кромок соединяемых деталей, то при пайке требуется обеспечить одинаковые условия взаимодействия, с одной стороны, между флюсом (газовой средой), припоем и основным металлом, а с другой — между расплавленным припоем и основным металлом. Принимая во внимание, что взаимодействие протекает в соединительном зазоре $\sim 0,1—0,2$ мм, легко представить, насколько важно иметь при пайке равномерную температуру нагрева.

Только соблюдение этих общих для всех способов пайки условий протекания процесса пайки гарантирует высокое качество паяных соединений.

§ 1. Подготовка поверхностей деталей к пайке

Подготовка поверхностей деталей к пайке включает очистку их от загрязнений и окисных пленок, а в некоторых случаях также нанесение покрытий, улучшающих условия пайки или повышающих прочность и коррозионную стойкость паяных соединений. Без тщательной очистки соединяемых поверхностей деталей от загрязнений и окислов невозможно осуществить процесс пайки, так как расплавленный припой не смачивает загрязненных и окисленных поверхностей и не затекает в зазор между ними. Поэтому перед сборкой под пайку детали очищают от консервирующей смазки, загрязнений, краски, окалины, следов коррозии.

Обезжиривание. Загрязнения жирового происхождения и смазку удаляют с поверхности деталей путем обезжиривания, т. е. погружают их в водные растворы щелочей, после чего во избежание коррозии промывают в воде и сушат. Обезжиривание проводят до полного удаления жировых веществ, в противном случае при пайке они обугливаются и препятствуют растеканию припоя по поверхности основного металла.

Для обезжиривания сталей чаще всего используют горячие щелочные растворы, например 10%-ный раствор едкого натра при температуре 70—80° С. Детали из меди и медных сплавов обезжиривают в ваннах более сложного состава, например 50 г тринатрий фосфата, 50 г кальцинированной соды, 15 г жидкого стекла, 1 л воды. Рабочая температура ванны 60—80° С. Детали выдерживаются в ней 1—30 мин в зависимости от состояния поверхности. После этого их тщательно промывают водой. Обезжиривание считается законченным, если поверхность деталей полностью смачивается водой.

Для обезжиривания иногда применяют также органические растворители: бензин, четыреххлористый углерод, ацетон, трихлорэтилен. Для удаления загрязнений и смазки с мелких деталей сложной формы иногда применяют ультразвуковую очистку в специальных ваннах, в которых промывочная среда подвергается колебаниям ультразвуковой частоты.

Зачистка и травление. Окисные пленки с поверхности деталей при подготовке под пайку удаляют механическими или химическими средствами. В качестве механических средств применяют: обдувку песком или дробью, обработку режущим инструментом, шлифовальным кругом, металлической проволочной щеткой и т. п. Механическими средствами очищают главным образом стали, медь и ее сплавы, никель и никелевые сплавы.

Обдувка песком дает удовлетворительные результаты, однако этот способ подготовки деталей используют редко, так как он вызывает профессиональные заболевания. Зачистка металлической проволочной щеткой также не рекомендуется, так как при такой подготовке поверхности окисная пленка втирается в имеющиеся на поверхности металла мельчайшие углубления и поры, в результате чего смачивание ее припоем ухудшается.

Шероховатость паяемой поверхности, создаваемая резцом или шлифовальным кругом, способствует растеканию флюса и припоя, так как риски являются мельчайшими капиллярами. При этом чем меньше паяемый металл растворяется припоем, тем большее влияние на смачивание его поверхности припоем имеют наносимые при механической зачистке риски.

При подготовке под пайку поверхности алюминия, магния, титана и сплавов на их основе лучшие результаты дает не механическая зачистка, а травление. В массовом производстве травление применяют для всех металлов и сплавов. Для большинства металлов методы травления перед пайкой аналогичны методам подготовки деталей под гальванические покрытия, поэтому для указанных целей можно использовать травильные ванны гальванических цехов.

Травление деталей из углеродистых и низколегированных сталей производится в растворах соляной или серной кислоты, например в ванне состава: 0,5 л соляной кислоты; 30 г поваренной соли; 5 г препарата КС; 1 л воды. Температура ванны не должна превышать 40° С. Продолжительность травления от нескольких минут до одного часа в зависимости от состояния поверхностей деталей.

Для травления нержавеющей сталей применяют более сильные травители, состоящие из водных растворов смесей кислот: серной, соляной, азотной и фтористоводородной, например травитель состава: 23% серной кислоты; 27% соляной кислоты; 0,15% препарата КС; 0,1% клея сульфированного; остальное вода. Травление производится при температуре 40—50° С.

Детали из меди и медных сплавов рекомендуется травить в смеси водных растворов серной и соляной кислот, например в ванне состава: 50 г серной кислоты и 50 г соляной кислоты на 1 л воды. Температура ванны 15—25° С. Продолжительность травления до 10 мин. После травления стальные и медные детали тщательно промывают в проточной холодной воде, затем в горячей, после чего сушат.

Для травления алюминия и его сплавов применяют 10%-ные водные растворы едкого натра или едкого кали, подогретые до температуры 60—70° С. Затем детали промывают в холодной воде и осветляют в 30%-ном водном растворе азотной кислоты, после чего промывают в холодной воде и сушат до полного удаления влаги.

В результате травления деталей перед пайкой происходит разъедание их поверхности, что способствует растеканию припоев, увеличению площади контакта основной металл — припой и улучшению сцепления между ними. Иногда с этой целью специально производят глубокое травление мест пайки более сильными травителями. Например, для глубокого травления углеродистых и низколегированных сталей применяют 25—30%-ные водные растворы соляной кислоты. В результате такого травления прочность паяных соединений возрастает.

После травления, промывки и сушки во избежание окисления детали необходимо немедленно направлять на сборку и пайку.

Покр ы т и я. В ряде случаев перед пайкой на поверхность соединяемых деталей наносят покрытия: технологические, барьерные и покрытия-припой.

В качестве технологических покрытий наносят такие легкопаяемые металлы, как медь, никель, серебро, которые улучшают процесс смачивания труднопаяемых металлов и в процессе пайки полностью растворяются. При неполном растворении технологического покрытия снижается прочность паяного соединения, поэтому их наносят тонким слоем (5—10 мкм).

Барьерное покрытие должно хорошо смачиваться расплавленным припоем, но не растворяться в нем, так как оно должно сохраняться до конца процесса пайки без нарушения сплошности и связи с основным металлом.

На алюминиевые сплавы в качестве барьерного покрытия наносят никель химическим или гальваническим способом. Никель в качестве барьерного покрытия применяют и при пайке меди припоем ПСр72 с целью предотвращения взаимодействия основного металла с расплавом припоя и предупреждения образования пор.

В последние годы в промышленности начинают применять покрытия-припой, наносимые на паяемые детали гальваническим путем, испарением в вакууме, металлизацией или другими способами. Иногда наносят не припой, а только один из его компонентов, например если на медную деталь нанести серебро, то в процессе пайки образуется сплав серебро—медь типа стандартного серебряного припоя ПСр72. Если при пайке температура будет поддерживаться эвтектической (779° С), то образующийся при контактном плавлении меди с серебром сплав будет точно соответствовать эвтектике.

§ 2. Сборка деталей и узлов перед пайкой

При сборке деталей и узлов перед пайкой производится фиксация отдельных их частей относительно друг друга, установление равномерного соединительного зазора, нанесение флюса и припоя, а также принимаются меры по ограничению растекания припоя по поверхности, не подлежащей пайке. При любых способах пайки в процессе сборки целесообразно закреплять элементы паяемого изделия в простейших зажимных приспособлениях или фиксировать их с помощью кернения, развальцовки, точечной сварки или другими способами.

Для повышения производительности труда паяльщиков и улучшения качества сборки и пайки иногда применяют различные вспомогательные приспособления, что особенно выгодно в массовом производстве. Приспособления, применяемые при сборке, должны быть простыми по конструкции, удобными в работе и легкими. При конструировании приспособлений необходимо учитывать не только размеры, форму и вес паяемых деталей, но также и способ нагрева. Приспособления не должны быть массивными, так как это удлиняет процесс нагрева при пайке и приводит к непроизводительному расходу электроэнергии. В случае пайки погружением в соляные ванны

или расплавленные припой материал приспособления не должен реагировать с расплавом солей или металлов и загрязнять их. Ввиду того, что при нагреве прочность основного металла снижается, применять в приспособлениях пружинные зажимы не всегда целесообразно, так как это часто ведет к поводке, а иногда и к разрушению тонкостенных деталей в процессе высокотемпературной пайки. Пружинные зажимы могут вызывать смещение зафиксированных элементов паяемых деталей.

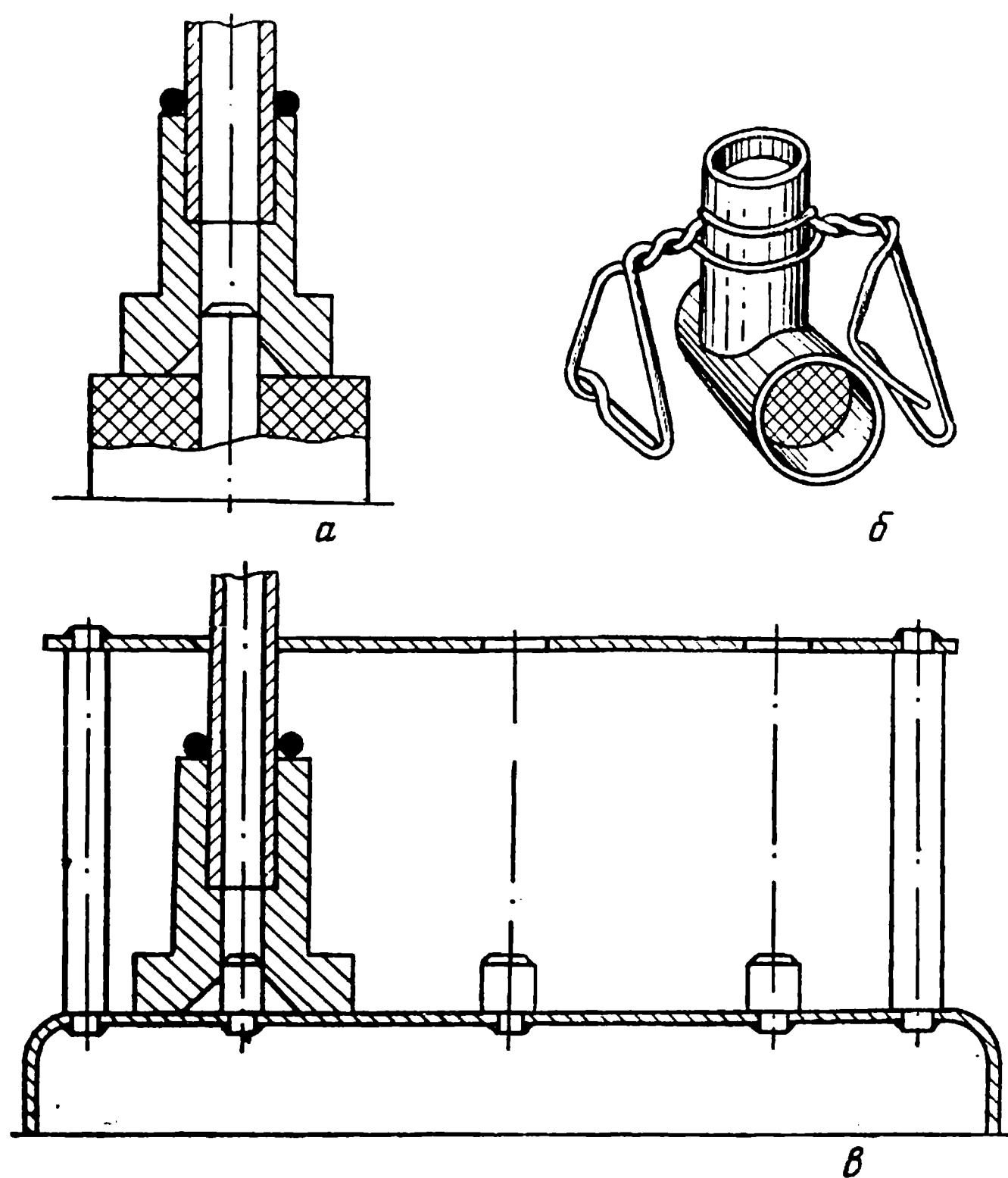


Рис. 102. Простейшие приспособления, применяемые при сборке и пайке:

a и *б* — одиночные; *в* — групповое

Наиболее простые приспособления, применяемые при сборке и пайке, приведены на рис. 102 [44]. Правильная фиксация деталей в приспособлениях и дозировка припоя позволяют почти полностью исключить операции по дополнительной механической обработке паяных швов.

От того, насколько точно собраны и хорошо закреплены элементы паяемого изделия, зависит его прочность и соответствие размеров чертежу. При сборке изделий простой формы из сравнительно толстостенных элементов можно применять самые простые способы фикса-

ции, такие, как кернение, точечная сварка, клепка и т. п. Для деталей сложной конфигурации при наличии тонкостенных элементов, которые при пайке могут коробиться, необходимо применять приспособления, которые бы надежно фиксировали положение отдельных элементов изделия и позволяли равномерно нагреваться и охлаждаться в процессе пайки.

Равномерный соединительный зазор между паяемыми деталями обеспечивается кернением, насечкой, прокладками или фиксацией в приспособлении. При пайке тонкостенных конструкций для прижатия элементов изделия и соблюдения равномерного зазора приме-

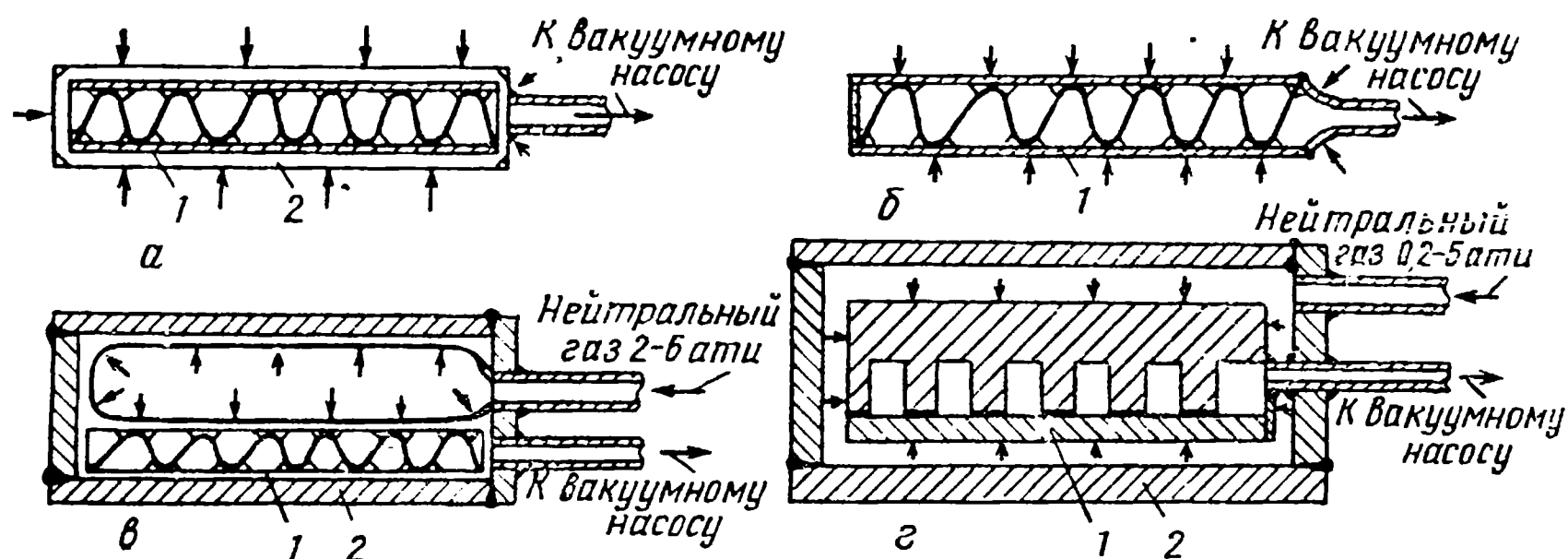


Рис. 103. Приспособление для прижатия частей паяемых изделий с применением вакуума:

1 — паяемое изделие; 2 — контейнер; 3 — стальной мешок

няют также вакуум, который создают или в тонкостенном контейнере, или непосредственно в объеме паяемой детали (рис. 103, а и б). При пайке в толстостенных контейнерах равномерный прижим в процессе пайки наряду с созданием вакуума может быть осуществлен специальным стальным тонкостенным сосудом (мешком), в который подают нейтральный газ под избыточным давлением (рис. 103, в), или избыточное давление создают непосредственно в контейнере (рис. 103, г).

Способы нанесения флюса на место пайки зависят от применяемого нагрева. При пайке в печи флюс наносят на предварительно обезжиренные места пайки в виде паст или тонким слоем из кипящего насыщенного водного раствора тетраборнокислого натрия, борной кислоты или флюсов на их основе. При пайке в соляных ваннах флюсующей средой является расплав солей, дополнительно флюс на место пайки обычно не наносят. При пайке погружением в латунные или серебряные расплавленные припои флюс наносят на место пайки заранее. Пастообразные флюсы после нанесения необходимо просушить до полного удаления влаги, и только после этого детали погружают в расплав припоя. При пайке погружением в оловянно-свинцовые и другие легкоплавкие припои флюсование производят, погружая детали на 3—5 мин в водный раствор хлористого цинка. При пайке газовыми горелками во избежание сдувания порошкообразных флюсов газовым пламенем их обычно разводят

водой и в таком виде наносят на шов перед пайкой. В процессе пайки флюс можно вносить на разогретом конце прутка—припоя. При пайке паяльниками флюс наносят перед пайкой с помощью кисти. Количество наносимого перед пайкой флюса в каждом отдельном случае определяется опытным путем.

Необходимое количество припоя вносят в соединительный зазор при сборке или в процессе пайки. Из пластичных припоев можно изготавливать кольца, шайбы, втулки и т. п., которые устанавливают в соединительный зазор, в специальные проточки в паяемых элементах деталей или сверху шва. Хрупкие и малопластичные припои изготавливают в виде литых прутков, которые можно применять только при ручной пайке горелками или паяльниками. Более целесообразно готовить из хрупких припоев порошки, которые потом смешивают с флюсом или специальным связующим и наносят на место пайки в виде паяльных порошков, паст или пленок на полимерной связке. При пайке в печи с индукционным нагревом и соляных ваннах можно применять припой в виде зерен, паяльной пасты, таблеток, спрессованных из порошков припоя и флюса, в виде слоя припоя, предварительно наносимого на паяемый материал путем прокатки, а также в виде гальванического покрытия. При ручной пайке низкотемпературными припоями их иногда используют в виде трубок диаметром 2—5 мм, заполненных флюсом.

Для закрепления припоя применяют точечную сварку или приклеивают его акриловой смолой. Большое значение при сборке имеет точная дозировка количества вносимого припоя, так как это наряду с экономией устраняет необходимость зачистки шва после пайки.

В некоторых случаях при пайке необходимо ограничивать растекание припоя. Для этой цели места, подлежащие защите, покрывают известковым или меловым раствором. Иногда для этой цели применяют пасту из окислов алюминия, хрома, титана, замешанную на воде или спирте. Однако если флюс проникает под слой покрытия, то такая защита оказывается неэффективной.

При пайке сталей медью для предупреждения растекания припоя места, подлежащие защите, хромируют. Образующаяся в этом случае при нагреве поверхностная пленка окислов хрома препятствует смачиванию детали медью. Ограничить растекание припоя можно соответствующим конструированием, предусмотрев в необходимых местах резкое увеличение зазора путем создания выточек, уступов, скашивания углов. При пайке ограничить растекание припоя можно также охлаждением детали сразу после образования в паяном шве галтелей. Однако наилучшим способом предупреждения растекания припоя является точная дозировка припоя и соблюдение режима пайки.

§ 3. Пайка -

Выбор способа пайки определяется техническими требованиями к изделию, конструкцией паяемой детали, материалом, из которого она изготовлена, применяемым припоем, количеством изготавливаемых

деталей и оснащённостью предприятия оборудованием. При изготовлении небольшого количества деталей экономически наиболее целесообразно применить для пайки газовые горелки. При наличии на предприятии соответствующего оборудования можно использовать для этой цели индукционные и другие способы нагрева. При массовом производстве деталей наиболее рациональна механизированная пайка в печах с применением контролируемых газовых сред.

Процесс пайки определяется режимом пайки: температурой и условиями нагрева, выдержкой при температуре пайки и условиями охлаждения. В некоторых случаях режим пайки характеризуется также давлением, прикладываемым к соединяемым деталям в процессе пайки.

Минимальная температура нагрева при пайке, необходимая для заполнения зазора припоем, равна или несколько выше температуры перехода припоя в жидко-твёрдое состояние. Эта температура называется минимальной температурой пайки. В обычных условиях пайка производится при более высокой температуре — рабочей. Рабочая температура пайки — это оптимальная температура, при которой припой активно взаимодействует с паяемым материалом и заполняет соединительный зазор, обеспечивая максимальные характеристики паяного соединения.

Повышение температуры пайки улучшает условия растекания припоя по паяемой поверхности и ускоряет процесс диффузионного взаимодействия между припоем и основным металлом. Однако это в свою очередь может привести к структурным изменениям в основном металле за счёт выделения эвтектических, карбидных и других составляющих и, следовательно, к снижению механических и коррозионных свойств соединения. Изменения эти особенно заметны при пайке закалённых сталей, нагрев которых выше температур высокого отпуска резко снижает прочность. Высокотемпературный нагрев усиливает также процесс растворения паяемого металла в расплавленном припое, что может вызвать образование в шве хрупких структур и ослабить связь в основном металле по границам зерен. Кроме того, при высоких температурах может происходить выгорание легирующих компонентов и изменение состава основного металла и припоя. Поэтому температуру пайки обычно выбирают на 30—50 град выше температуры плавления припоя, а при пайке некоторыми тугоплавкими припоями, например меднофосфористыми с содержанием серебра, — даже несколько ниже температуры ликвидуса припоя. ¶

В общем случае нагрев не должен быть выше максимальной температуры пайки. Максимальная температура пайки — это предельно допустимая температура, выше которой в процессе пайки существенно ухудшаются свойства припоя, флюса или паяемого материала.

Скорость нагрева при пайке определяется в основном теплопроводностью материала, природой источника нагрева и толщиной стенок паяемого изделия. При низкой теплопроводности материала и больших толщинах стенок нагревать паяемое изделие нужно медленно во избежание коробления и образования трещин.

Выдержку при температуре пайки выбирают на основе экспериментальных данных; она должна быть такой, чтобы обеспечить расплавление припоя, заполнение им зазора и образование галтелей. В зависимости от способа пайки она может быть от нескольких секунд до часа и более. Кратковременные выдержки обычно бывают при индукционной пайке и пайке погружением, наиболее длительные — при диффузионной пайке. Выдержка в значительной мере определяется свойствами основного металла и припоя. Чем менее активно припой взаимодействует с основным металлом при температуре пайки, тем большей должна быть выдержка.

Режим охлаждения после пайки назначается таким, чтобы предупредить излишнее окисление металла изделия и не вызвать разрушения шва, когда припой еще находится в твердо-жидком состоянии. Максимальные скорости охлаждения ограничиваются опасностью образования трещин вследствие чрезмерных термических напряжений и возникновения пористости в связи с сокращением времени пребывания металла шва в жидком состоянии, в течение которого растворенные в расплавленном металле газы не успеют выделиться.

При производстве паяных изделий необходимо руководствоваться следующими особенностями технологии существующих способов пайки.

П а й к а в п е ч а х. Пайка в печах бывает с воздушной, нейтральной, активной атмосферами и в вакууме. Пайка в печах с воздушной атмосферой осуществляется путем нагрева в печи деталей с заранее нанесенными на них флюсом и припоем. Этот способ пайки обеспечивает равномерный и глубокий прогрев больших по размерам деталей и позволяет получать прочные паяные соединения. Его применяют для пайки алюминиевых деталей и реже для соединения стальных и медных деталей. Недостатком этого способа пайки является значительное окисление основного металла в процессе нагрева.

Пайка в печах с контролируемой атмосферой — наиболее передовой способ соединения деталей. Этот процесс осуществляется путем нагрева собранных деталей с нанесенным припоем в печах с нейтральной или активной атмосферой. При этом способе пайки основной металл не окисляется не только в процессе пайки, но часто и в процессе охлаждения. После пайки, например, детали можно продвигать в камеру охлаждения, также заполненную контролируемой атмосферой. Детали выгружают при температуре около 100—200° С, чтобы не допускать появления на их поверхности окалины или шклов побежалости. Благодаря этому паяные детали получают со светлой и блестящей поверхностью. Данным способом можно паять конструкционные и инструментальные углеродистые стали, большинство конструкционных легированных сталей, жаропрочные и нержавеющие стали, а также другие металлы.

Поскольку водород и диссоциированный аммиак сравнительно дороги и взрывоопасны, то их следует применять только для пайки небольших по размерам деталей в печах с малым рабочим пространством. При использовании печей с большим рабочим пространством в качестве восстановительной среды следует применять продукты

неполного сгорания газов, которые хотя и имеют более слабые восстановительные свойства, но менее взрывоопасны.

В ряде случаев состав газовой восстановительной среды определяется металлом изделия. Так, пайку сталей с высоким содержанием хрома можно вести, лишь применяя водород или аммиак, подвергнутые весьма тщательной очистке от кислорода и паров воды, путем пропускания газов через дунитовый¹ или палладиевый катализаторы с последующей многоступенчатой сушкой. При пайке в печи припой наносят заранее в виде проволоки, фольги, медного покрытия на соединяемых поверхностях или в виде паяльной пасты.

Процесс пайки в печи регулируется временем выдержки деталей при температуре пайки, обычно превышающей на 50—100° С температуру плавления припоя. Время выдержки при пайке в печи обычно 5—10 мин, считая с момента установления температуры плавления припоя.

Процесс пайки в печи может быть периодическим и непрерывным. Для периодического процесса применяют электрические печи камерного типа. Непрерывный процесс пайки отличается большой производительностью и осуществляется в конвейерных электрических печах. Эти печи по своему устройству аналогичны печам для светлого отжига.

Главными преимуществами процесса пайки в печах с контролируемой атмосферой являются высокое качество пайки, хороший вид изделий, а также большая производительность процесса. К недостаткам печного нагрева следует отнести сложность применяемого оборудования и большую энергоемкость процесса.

Пайку в вакууме успешно применяют для соединения деталей из титана и его сплавов, а также легированных сталей, жаропрочных и тугоплавких сплавов без применения флюсов. Этот вид пайки достаточно экономичен, совершенно безопасен и проводится в вакуумных печах или контейнерах, загружаемых в обычные печи.

При пайке в вакууме наиболее глубокое разрежение необходимо создавать в том случае, когда в качестве основного металла применяются сплавы, содержащие алюминий, хром, титан и другие элементы, образующие стойкие окислы. При пайке высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов для предупреждения окисления в процессе нагрева и улучшения смачивания их расплавленным припоем наносят медные и никелевые покрытия. Покрытия позволяют значительно снизить необходимый при пайке вакуум.

При пайке в вакууме продолжительность выдержки после достижения необходимой температуры составляет 5—10 мин. После пайки детали охлаждают вместе с печью или контейнером до температуры 200—250° С, после чего камеру пайки заполняют воздухом и извлекают паяные детали. Паяные швы, полученные при применении вакуума, отличаются чистотой, плотностью и высокой коррозионной

¹ Дунит — распространенный минерал, каталитическая активность которого определяется содержанием в нем окислов железа, никеля, хрома, а также следов металлов платиновой группы.

стойкостью. Однако расходы, связанные с пайкой в вакууме, по сравнению с другими способами пайки выше, поэтому этот вид пайки целесообразно применять только для ответственных изделий. Кроме того, охлаждение паяемых деталей под вакуумом удлиняет цикл пайки, в то время как производительность вакуумных печей и без того низкая.

И н д у к ц и о н н а я п а й к а. При индукционной пайке в отличие от других способов тепло, необходимое для нагрева соединяемых деталей и припоя, передается не окружающей средой, а возникает в самих деталях в результате воздействия переменного магнитного поля высокой частоты и индуцированных в результате этого в массе металла токов. Соединяемые детали при индукционной пайке после нанесения на них припоя и флюса располагают в индукторе и нагревают до температуры пайки. Необходимая интенсивность и характер индукционного нагрева достигаются подбором соответствующей частоты тока, продолжительности его включения и главным образом применением соответствующих индукторов. Для пайки разнообразных деталей требуется большое число индукторов самых различных размеров и очертаний. Наибольшее применение находят одно- и двухвитковые индукторы. Многовитковые индукторы применяют лишь в тех случаях, когда требуется равномерно прогреть большую площадь детали.

Зазоры между индуктором и деталью могут меняться от 2 до 20 мм, они зависят от размера и конфигурации деталей, а также характера нагрева. При больших зазорах получается более равномерный нагрев, но ухудшается коэффициент передачи индуктором энергии. В случаях, когда требуется равномерный нагрев, необходимо надежно центрировать детали относительно индуктора. Для усиления местного нагрева витки индуктора в необходимых случаях можно максимально приблизить к детали. Например, при соединении массивной детали с тонкой витки индуктора располагают ближе к массивной детали. Для прогрева массивной детали до необходимой температуры и на требуемую глубину приходится периодически выключать ток, чтобы дать возможность теплу распространиться от более нагретых поверхностных слоев в глубь металла.

При замыкании витков индуктора через паяемую деталь может быть прожог индуктора или оплавление детали. Чтобы предупредить это, индукторы иногда обматывают асбестовым шнуром, пропитанным жидким стеклом, или покрывают эмалью. Для защиты отдельных участков деталей от сильного нагрева их экранируют листовой медью толщиной 1,5—2 мм. Если экран подвержен интенсивному нагреву, его делают пустотелым и охлаждают изнутри водой.

Следует следить, чтобы при индукционном нагреве предварительно нанесенный на место пайки припой не образовал замкнутого витка, т. е. не изготовлялся в виде сплошного кольца; в таком случае он будет очень быстро нагреваться и плавиться за счет индуцированных токов.

Индукционный нагрев позволяет также вести пайку в газовых средах и в вакууме. В этом случае паяемую деталь помещают в кон-

тейнер, который нагревают в индукторе. Вместо контейнера можно применить герметичную прозрачную камеру из стекла или кварца.

Процесс индукционной пайки может быть легко механизирован и автоматизирован с периодической или непрерывной подачей деталей к месту пайки. Поскольку индукционный нагрев протекает весьма быстро и ограничен по зоне, коробление и окисление деталей незначительное. Существенный недостаток индукционной пайки — значительная стоимость оборудования.

П а й к а с о п р о т и в л е н и е м. При этом способе пайки нагрев осуществляется теплом, выделяемым электрическим током при прохождении через паяемую деталь и токоподводящие элементы. Пайку сопротивлением можно проводить на точечных, стыковых и роликовых контактных сварочных машинах. Специальные машины для пайки сопротивлением принципиально ничем не отличаются от сварочных.

Поскольку в контактных сварочных машинах применяется ток низкого напряжения, то твердые флюсы при пайке непригодны, так как они являются изоляторами. Пайка сопротивлением обычно производится без флюсов и других средств защиты основного металла и припоя от окисления, так как нагрев протекает очень быстро, а припой защищен от окисления основным металлом. Качество паяных соединений получается высоким при минимальном короблении деталей. Припой в виде фольги толщиной 0,05—0,15 мм наносят на соединяемые поверхности гальваническим путем, металлизацией и др.

Режим пайки устанавливают опытным путем в зависимости от толщины соединяемых деталей, свойств основного металла и припоя. Сжимающее давление на электродах 10—80 кГ/см².

Пайку сопротивлением можно проводить также, применяя угольные или графитовые электроды. Нагрев в этом случае осуществляется за счет теплоотвода от электродов и протекает сравнительно медленно, поэтому для защиты основного металла и припоя от окисления необходимо применять флюсы или контролируемые газовые среды.

Преимущества пайки сопротивлением на контактных машинах — высокая производительность и возможность наблюдать за процессом формирования паяного соединения. Недостаток — трудность подвода контактных зажимов к месту пайки, что не позволяет применить его для деталей сложной конфигурации.

П а й к а п о г р у ж е н и е м. При пайке погружением нагрев деталей может осуществляться как в расплавах солей, так и в расплавах припоев. При нагреве в расплавленных солях пайка протекает во много раз быстрее, чем при нагреве в печи, что делает этот способ весьма производительным. В качестве нагревательной среды применяют расплавы солевых смесей, в которые частично или полностью погружают паяемые детали. Хорошие результаты пайки стальных деталей получаются в соляной ванне следующего состава: 75% хлористого бария, 20% хлористого натрия, 5% тетраборнокислого натрия. Оптимальная температура при пайке сталей медью 1120—1130° С, латунию 930—940° С, т. е. на 30—50 град выше температуры плавления соответствующего припоя.

При использовании многотигельных печей-ванн целесообразен двухступенчатый нагрев деталей под пайку, т. е. в первой ванне нагревают детали до какой-то промежуточной температуры, а во второй производят пайку. Температура первой ванны может быть подобрана с таким расчетом, чтобы в ней можно было нагревать паяные изделия и под закалку.

После пайки детали вынимают из соляной ванны, охлаждают на воздухе до температуры 200—250° С, после чего погружают в ванну с горячей водой для удаления остатков солей. Иногда из

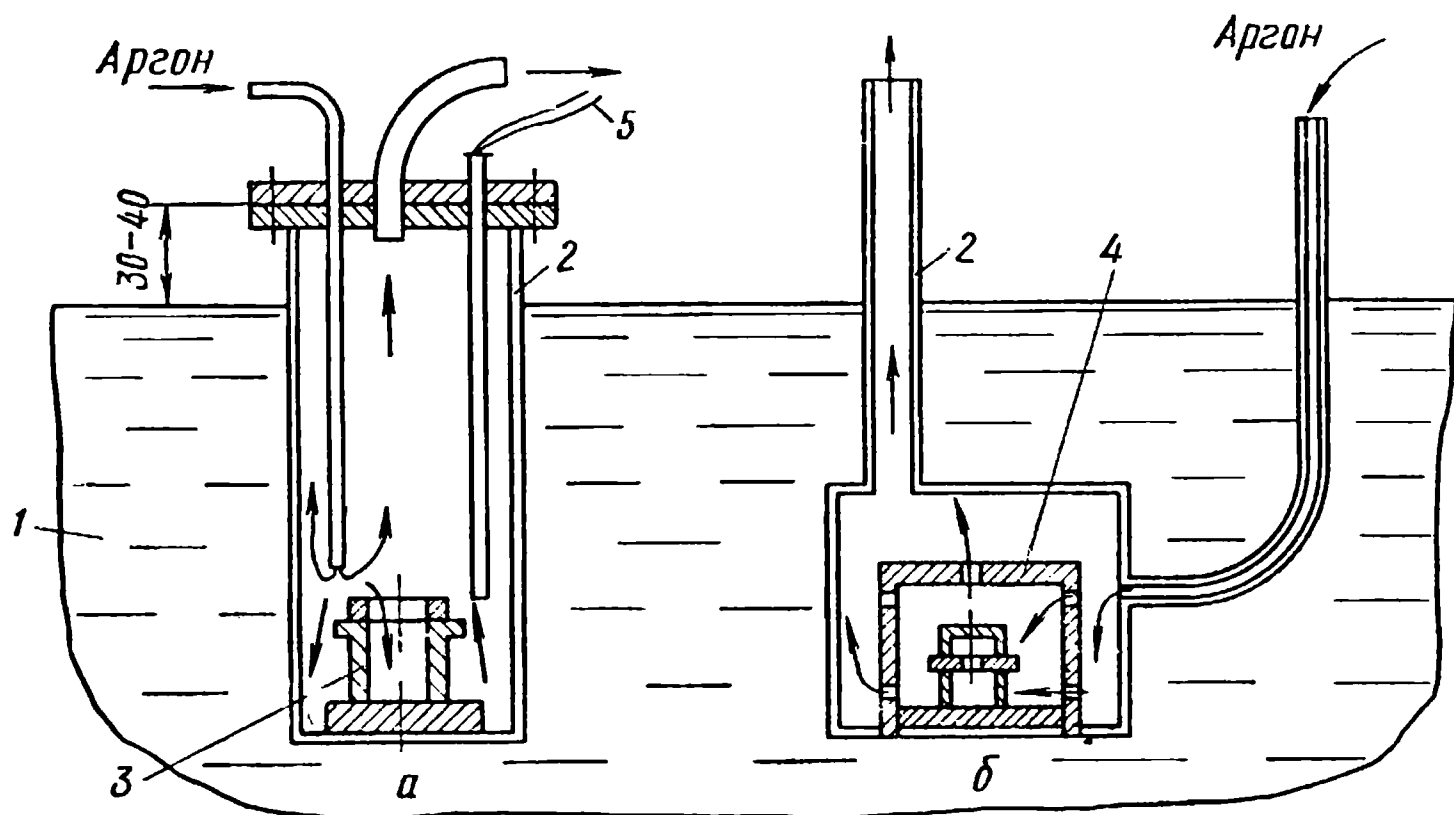


Рис. 104. Примеры косвенного нагрева при пайке в соляных ваннах с частичным (а) и полным (б) погружением контейнера:

1 — расплав солей; 2 — контейнер; 3 — паяемая деталь; 4 — экран; 5 — термометр

соляной ванны деталь переносят в ванну с расплавленной щелочью с температурой 300—400° С, что позволяет произвести термическую обработку и получить светлую поверхность детали. Однако таким способом можно паять только детали без внутренних полостей, из которых очень трудно удалить соли после пайки.

При косвенном нагреве в соляных ваннах (рис. 104, а) деталь помещают в контейнер, в котором создают контролируемую газовую среду или вакуум. Контейнер подогревают до 100—150° С для удаления с поверхности влаги, после чего погружают в соляную ванну, нагретую до температуры пайки. После определенной выдержки контейнер извлекают из ванны, охлаждают до 400—500° С на воздухе, затем в воде.

При пайке в контейнерах скорость нагрева в соляных ваннах снижается. Для повышения ее поднимают температуру ванны, делают контейнеры полностью погружаемые в расплав солей (рис. 104, б) или уменьшают зазор между стенками контейнера и стенками помещенных в них паяемых деталей. Для обеспечения равномерного нагрева деталей в процессе пайки в контейнере иногда устанавливают специальные экраны.

Пайка в соляных ваннах обеспечивает высокую производительность процесса, хорошее качество паяных соединений и предохраняет от обезуглероживания стальные детали. Этот способ позволяет также точно поддерживать температурный режим в пределах ± 5 град, что создает благоприятные условия для применения механизации и автоматизации процесса пайки.

При способе пайки погружением в расплавленные припой собранные в узел детали с заранее нанесенным флюсом опускают на некоторую глубину в ванну расплавленного припоя, который является нагревательной средой. Благодаря контакту нагретого припоя с деталями они быстро нагреваются до температуры пайки, происходит затекание припоя в соединительные зазоры и образование паяных соединений. После этого детали извлекают из ванны и охлаждают.

Пайку погружением широко применяют в производстве радиаторов двигателей внутреннего сгорания, коллекторов электромоторов и других деталей электро- и радиотехнических изделий. Режим пайки устанавливают опытным путем. При погружении в ванну детали нельзя держать слишком долго в припое, так как основной металл может раствориться, что приведет к порче деталей, а также к загрязнению основным металлом расплавленного припоя. Температуру в ванне поддерживают на 50—100 град выше температуры ликвидуса припоя в зависимости от количества припоя и веса погружаемых деталей. Для того, чтобы ванна обладала достаточным запасом тепла, необходимо, чтобы вес расплавленного припоя превышал вес погружаемых деталей не менее чем в 20 раз.

Пайка способом погружения в припой обеспечивает высокое качество паяных соединений независимо от квалификации рабочего, характеризуется большой производительностью процесса вследствие быстрого нагрева и пайки, широкими возможностями механизации и автоматизации процесса. Недостаток этого способа заключается в том, что требуется одновременно применять большое количество припоя, который, находясь в расплавленном состоянии, подвергается сильному окислению и частичному загрязнению основным металлом, довольно быстро растворяющимся в припое.

Кроме обычного метода погружения, для пайки печатных плат применяют способ пайки волной и струей расплавленного припоя, а также способ селективной пайки в восходящих потоках расплавленного припоя. Принципиальная схема пайки волной припоя рассмотрена во введении. При пайке струей припоя печатная плата движется в горизонтальном направлении над стационарной восходящей струей расплавленного припоя и соприкасается своей нижней поверхностью с ее гребнем, имеющим протяженность не менее ширины платы.

Во время контакта расплавленного припоя с концами проводников деталей радиомонтажа происходит их пайка, обеспечивающая получение надежного электрического соединения.

При селективной пайке (рис. 105) расплавленный припой выходит потоками из специальных, расположенных под паяемыми деталями

наконечников, размещенных в строгом соответствии с положением на плате монтажных соединений. Собранный плат опускается на эти наконечники сверху, проводники смачиваются потоками припоя и запаиваются.

Этим способом преодолеваются многие затруднения старого способа пайки путем плоского погружения плат в расплавленный припой. Непрерывная циркуляция расплавленного припоя способствует более эффективной передаче тепла паяемым деталям, обеспечивает большую равномерность температуры и состава припоев, создает

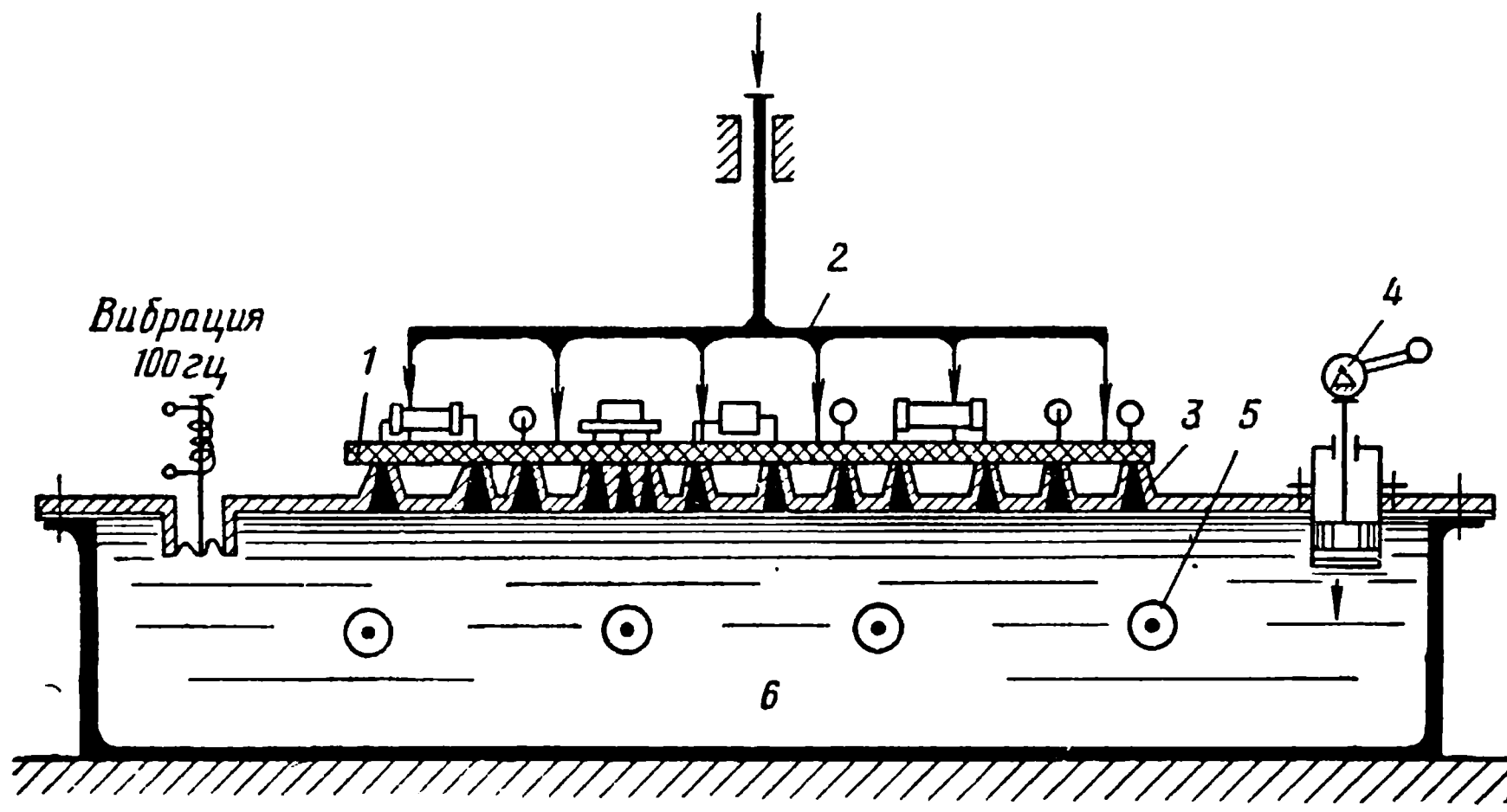


Рис. 105. Схема процесса селективной пайки:

1 — плата; 2 — прижим; 3 — фильера; 4 — поршень; 5 — электронагревательные элементы; 6 — припой

свободную от окислов рабочую поверхность зеркала ванны и способствует более эффективному затеканию припоя в зазоры. Скорость горизонтального движения печатных плат при пайке волной припоя колеблется в пределах 10—20 мм/сек. В качестве припоя используют оловянносвинцовые и оловянносвинцовокадмиевые припои эвтектического состава, которые имеют наилучшие технологические свойства и дают наиболее надежные в эксплуатационном отношении паяные соединения.

Радиационная пайка. При изготовлении тонкостенных листовых конструкций применяют пайку кварцевыми лампами. Этот способ пайки отличается быстротой нагрева и возможностью точной регулировки температуры пайки. В зависимости от конструкции паяемого изделия блоки кварцевых ламп можно устанавливать с одной и с двух сторон. Схема процесса пайки при применении двустороннего нагрева приведена на рис. 106.

Блоки кварцевых ламп можно устанавливать также вне камеры нагрева, которую в этом случае заполняют газовой средой или вакуумируют. Высокие скорости нагрева и возможность точной регулировки температуры делают этот способ пайки весьма перспективным.

В последние годы для пайки применяют нагрев расфокусированным лучом лазера. Основными параметрами режима лазерного нагрева являются выходная энергия излучения, длительность импульса, фокусное расстояние объектива и дефокусировка. Выходная энергия излучения и дефокусировка определяют плотность энергии излучения. Длительность импульса излучения позволяет изменить характер воздействия светового потока на металл. При малой длительности импульса наблюдается интенсивное испарение металла. При увеличении длительности импульса испарение уменьшается за счет более равномерного подвода тепла. В результате расфокусировки луча плотность энергии излучения может изменяться, что позволяет обеспечить сравнительно равномерный нагрев, необходимый при пайке. Принципиальная схема лазерной установки приведена на рис. 107. Испарение поверхностного слоя нагреваемого металла, а следовательно,

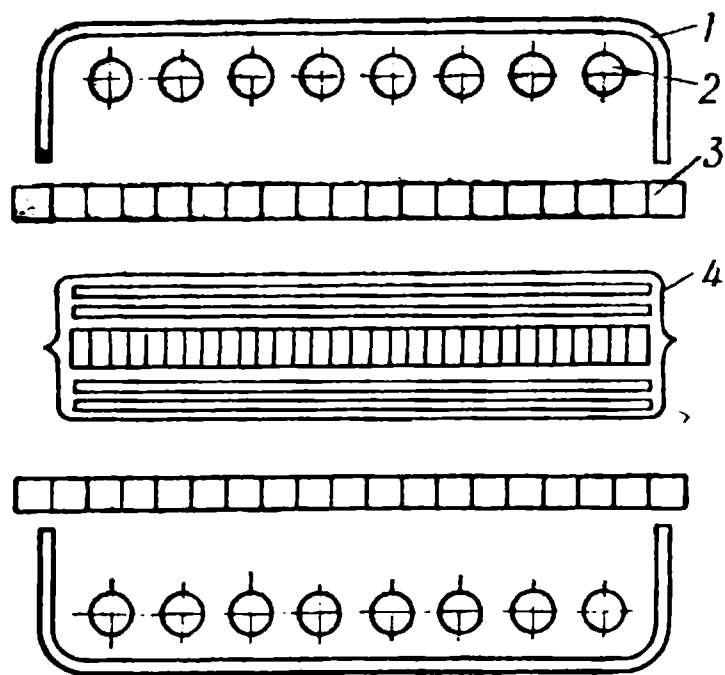


Рис. 106. Схема нагрева изделия при радиационной пайке кварцевыми лампами:

1 — рефлектор; 2 — кварцевая лампа; 3 — опорная решетка; 4 — конвектор с панелью сотовой конструкции

и окисной пленки при лазерном нагреве позволяет при дозировании выходной энергии излучения устойчиво получать точечные «бездиффузионные» спаи.

П а й к а г о р е л к а м и. Газовые горелки и в первую очередь стандартные ацетилено-кислородные горелки с широким и нормаль-

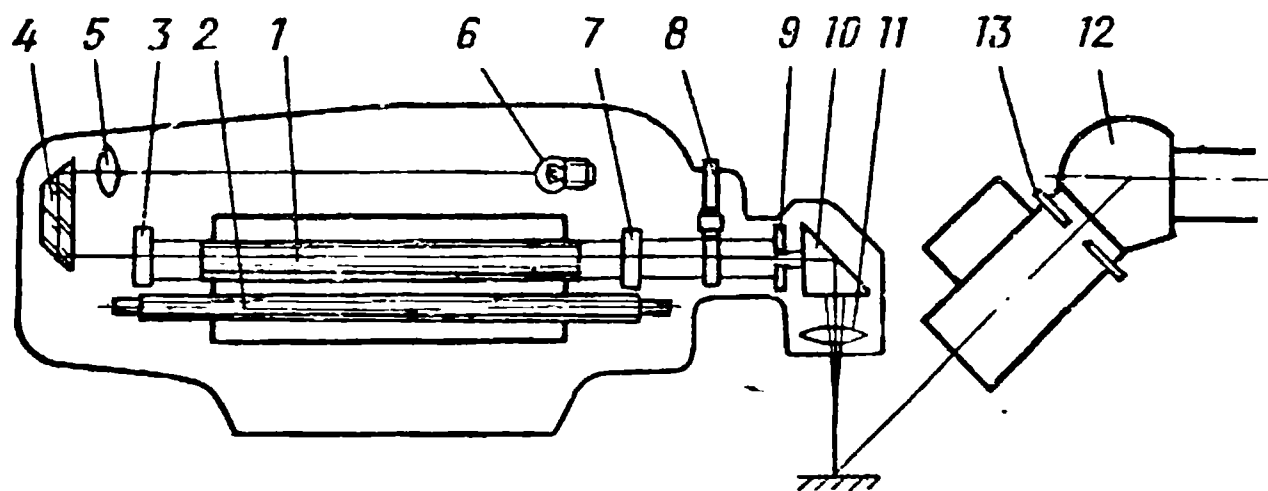


Рис. 107. Оптическая схема лазерного нагрева (установка УЛ-2м):

1 — кристалл; 2 — лампа накачки; 3 — зеркало заднее (непрозрачное); 4 — призма; 5 — линза-конденсатор; 6 — лампа подсветки; 7 — зеркало переднее (полупрозрачное); 8 — светофильтры; 9 — диафрагма; 10 — призма; 11 — объектив; 12 — микроскоп; 13 — шторка

ным факелом являются достаточно мощным источником тепла, хорошо поддающимся регулированию с помощью подбора наконечников. Они применяются большей частью для пайки высокотемпературными припоями крупногабаритных деталей. Вместо ацетилена в них целесообразно использовать пропан, как более дешевый и не реагирующий с флюсами во время пайки. Кроме того, пропано-

кислородное пламя не ослепляет паяльщиков. Для пайки деталей небольших размеров, если температура плавления применяемых припоев не превышает 900°C , рекомендуется применять воздушно-бензиновые и воздушно-керосиновые горелки.

Контроль температуры нагрева деталей при пайке горелками можно осуществлять с помощью термочувствительных карандашей. В практике достаточно надежным методом контроля степени нагрева является температура плавления флюса или припоя.

Процесс пайки деталей горелками может быть механизирован путем применения поворотных столов и конвейеров. Недостатки этого способа пайки — трудность контроля температуры нагрева, необходимость высокой квалификации паяльщиков, возможность коробления деталей, вызываемого местным нагревом.

П а й к а п а я л ь н и к а м и. Этот способ низкотемпературной пайки отличается быстротой нагрева благодаря непосредственному металлическому контакту паяльника с подвергающимися пайке деталями. Его применяют главным образом при пайке низкотемпературными припоями тонкостенных деталей из сталей, меди и медных сплавов. При подготовке паяльника к работе его рабочую кромку зашлифовывают под углом $40\text{—}45^{\circ}$ и облуживают припоем. При пайке паяльник всей рабочей поверхностью касается места соединения, предварительно покрытого флюсом. Одновременно к нагретому месту подводят в виде проволоки или прутка припой, который плавится и затекает в зазор. Небольшое количество необходимого для пайки припоя можно вносить в соединение при помощи рабочей части паяльника. Для очистки паяльника от образующихся в процессе работы окисных пленок применяют хлористый аммоний.

Ультразвуковые паяльники применяют иногда для предварительного облуживания поверхности алюминия и его сплавов низкотемпературными припоями. После облуживания пайку можно производить обычными паяльниками. Ультразвуковое облуживание целесообразно проводить при температурах не выше 350°C , так как при более высоких температурах начинает разрушаться также и основной металл. Главными недостатками ультразвуковых паяльников являются сравнительно невысокая производительность и необходимость сложного, хотя и не громоздкого оборудования.

Абразивные паяльники, как и ультразвуковые, применяют только для пайки алюминия. Температура пайки абразивным паяльником зависит от температуры плавления применяемого припоя, например при использовании оловянно-цинкового припоя, содержащего 10% Sn, температура пайки около 220°C . Паяльник прост в изготовлении. В случае облуживания и пайки плоских деталей он более производителен, чем ультразвуковой. При применении абразивного паяльника соединяемые детали подогревают до температуры плавления припоя, облуживают при помощи абразивного стержня или круга и затем подвергают пайке обычным способом.

Основным недостатком паяльников, как источника нагрева, является малый запас аккумулированного тепла, что не позволяет применять их для пайки массивных деталей.

§ 4. Обработка деталей после пайки

После пайки паяные детали подвергают дальнейшей обработке: удалению остатков флюса, зачистке наплывов припоя и термической обработке.

Для удаления остатков флюсов деталь промывают в холодной или горячей воде, в специальных растворах или зачищают металлической щеткой, обдувают песком и т. п. Остатки флюсов, содержащих хлористые соли щелочных и щелочноземельных металлов, необходимо удалять особенно тщательно, так как они оказывают активное коррозионное воздействие на металл.

Остатки хлоридных флюсов с алюминиевых сплавов удаляют промывкой в горячей и холодной проточной воде, после чего изделие погружают на 5—10 мин в 5%-ный раствор хромового ангидрида для пассивирования поверхности. Детали, паянные припоями 34А и эвтектическим силумином, можно пассивировать также 5%-ным раствором азотной кислоты. Детали из алюминиевых сплавов, паянные припоем П575А, можно анодировать и подвергать фосфатному оксидированию.

Медные и латунные детали после пайки с применением флюсов на основе хлористого цинка для удаления остатков флюса обрабатывают в специальном пассивирующем растворе при температуре 40—50° С в течение 10—15 мин. Затем следует промывка в горячей воде и сушка нагретым воздухом. Состав пассивирующего раствора: 13 г калиевого хромпика, 8 г серной кислоты, 0,1 г хлористого натрия, 5 г уксусной кислоты, 0,1 л воды. Для изделий больших габаритов и сложной конфигурации, паянных оловянносвинцовыми припоями с применением коррозионноактивных флюсов, можно применять обработку 10%-ным раствором хромпика, нагретым до температуры 60—70° С. Изделие целиком погружают в ванну с таким раствором или раствор заливают во внутренние полости. После удаления раствора изделие промывают горячей водой и сушат теплым воздухом.

Остатки боратных флюсов сложного состава после пайки в большинстве случаев образуют прочную стекловидную пленку, которая не растворима в воде и может быть удалена только опескоструиванием или другими механическими средствами. Со стальных деталей, паянных медноцинковыми и серебряными припоями, остатки тетраборнокислого натрия можно удалить обработкой в 10%-ном растворе серной кислоты, в которую добавляют 200 г на 1 л хромовой кислоты H_2CrO_4 . Детали погружают на 10—15 мин в этот раствор, подогретый до температуры 20—40° С.

Канифольные флюсы не растворяются водой и для их удаления применяют спирты, бензин или трихлорэтилен. Поскольку канифольные флюсы не вызывают коррозии, то не всегда их надо удалять с поверхности шва.

Остатки флюсующих паст, приготовленных на жировой основе, удаляют с паяных швов хлопчатобумажными салфетками, смоченными растворителями.

Если после удаления остатков флюса швы подлежат механической обработке, то в случае коррозионноактивных флюсов особенно необходима повторная промывка, так как могут быть вскрыты включения флюса.

Если после пайки производится термическая обработка, то после затвердевания припоя последующее охлаждение производится в охлаждающей среде. При этом если изделие нагревается в специальном приспособлении, то и охлаждение изделия во избежание коробления также необходимо производить в закрепленном положении.

Детали из углеродистых и легированных сталей можно подвергать любому виду термической обработки: отжигу, нормализации, закалке, отпуску. В отдельных случаях при наличии коробления паяные детали подвергают правке как в холодном состоянии, так и при нагреве. Допустимая величина относительной деформации при холодной правке для низкоуглеродистых сталей составляет 2—3%, а для аустенитных сталей и сплавов — до 8%. Если необходимая степень деформации превышает эти значения, то правку следует проводить при нагреве выше температуры рекристаллизации основного металла.

Глава VIII

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Конструкционные металлы и сплавы отличаются по составу и физико-химическим свойствам, поэтому требуется различный подход при решении задач, связанных с подготовкой их к пайке, удалением окисной пленки в процессе пайки, выбором припоя и режимов пайки.

§ 1. Пайка меди и ее сплавов

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

При пайке меди в газовых восстановительных средах следует иметь в виду, что обычная техническая медь подвержена так называемой «водородной болезни», т. е. растрескиванию по границам зерен. Это объясняется тем, что при взаимодействии с медью водород растворяется в ней, восстанавливает закись меди, расположенную на границах зерен, а образующиеся при этом под большим давлением пары воды разрывают металл, имеющий при высокой температуре низкую прочность. Бескислородную медь и медь вакуумной переплавки паять можно и в восстановительных атмосферах, не опасаясь ее растрескивания по границам зерен.

При пайке медных сплавов, легированных такими активными металлами, как алюминий, бериллий, хром и др., целесообразно их покрывать перед пайкой слоем никеля или меди толщиной 5—10 мкм.

По никелю и меди припой хорошо растекается без флюса не только в восстановительной среде или вакууме, но даже в инертной атмосфере с образованием прочных паяных соединений.

При пайке меди и ее сплавов сравнительно тугоплавкими припоями на основе меди или серебра можно использовать почти все известные флюсы на основе соединений бора, но при этом следует иметь в виду, что при пайке медными припоями лучшие результаты дают флюсы № 200 и 201, а при пайке серебряными припоями—флюсы № 284 и 209.

Для пайки алюминиевых бронз эти флюсы непригодны, так как они не растворяют окислов на их поверхности, но если в них ввести кремнефтористый натрий (10—20%) или флюс для пайки алюминия (до 50%), то пайку алюминиевых бронз можно производить без нанесения на них никелевых или медных покрытий.

При пайке бериллиевых и кремнистых бронз для удаления окисной пленки применяют флюс № 209.

При пайке меди оловянносвинцовыми и другими легкоплавкими припоями можно применять любой из известных флюсов, но целесообразнее пользоваться спиртоканифольным флюсом, остатки которого не вызывают коррозии меди, и поэтому их можно не смывать после пайки.

При пайке латуней и бронз спиртоканифольный флюс непригоден, потому что он может растворять окислы только на чистой меди. В этом случае можно использовать такие более активные флюсы, как ЛК-2, ЛТИ-120 и др., которые во влажной атмосфере вызывают незначительную коррозию. Поэтому остатки этих флюсов следует после пайки удалять с помощью смывки или смеси бензина с безводным спиртом.

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

При соединении деталей из медных сплавов, конструкция которых позволяет паять с приложением давления, в качестве припоя можно использовать серебряные покрытие (10—20 мкм) или тонкую серебряную фольгу. Находясь в контакте с медью, серебро в результате контактного плавления при нагреве выше 779° С образует припой типа ПСр72. Пайка этим методом производится обычно в вакууме или в газовых средах без применения флюсов.

При пайке бериллиевых бронз необходимо выбирать припой с температурой солидуса выше 800° С, так как после пайки их необходимо подвергать термической обработке при температуре около 780° С. При высокотемпературной пайке бронз ввиду их краснотекучести следует обращать внимание на конструирование фиксирующих приспособлений и добиваться, чтобы они не препятствовали расширению

деталей при нагреве и, следовательно, не создавали в них напряжений, приводящих к растрескиванию в процессе пайки.

Ориентировочные данные о прочности паяных соединений при применении высокотемпературного и низкотемпературного припоев приведены в табл. 38—41. Следует иметь в виду, что прочность паяных соединений зависит от режима и условий пайки.

§ 2. Пайка конструкционных сталей

Углеродистые и низколегированные стали. Эти стали обладают сравнительно низкой прочностью, но они дешевы, поэтому их широко используют в строительных металлоконструкциях. В машиностроении они применяются реже. Процесс пайки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, как правило, не вызывает особых затруднений и может быть осуществлен всеми известными способами. Особенно легко паять низкоуглеродистые стали. При пайке высокоуглеродистых сталей требуется лишь более тщательная подготовка соединяемых поверхностей.

Высокотемпературная пайка углеродистых и низколегированных сталей производится обычно медью, медноцинковыми и другими припоями на медной основе. Серебряные припои, хотя и образуют высокопрочные швы, но из-за дефицитности их применяют редко.

Меднофосфористые припои могут быть использованы только при пайке неответственных деталей из углеродистых сталей, которые не подвергаются ударным и вибрационным нагрузкам, а также не работают при низких температурах.

Встречаются вполне обоснованные попытки использовать чугуны в качестве припоев для пайки углеродистых и низколегированных сталей. Это направление весьма перспективно, особенно в том случае, если для пайки удастся использовать высокопрочные и пластичные модифицированные чугуны. Положительным комплексом свойств обладает припой системы железо—углерод—марганец, известный под маркой ВЗМИ-49. Пайку углеродистых и низколегированных сталей этим припоем можно проводить как в газовых средах, так и с применением флюсов.

Окисная пленка, образующаяся на поверхности углеродистых и низколегированных сталей, химически нестойкая. Она легко восстанавливается в газовых средах и растворяется всеми флюсами, рекомендуемыми для пайки сталей. В контролируемых средах для углеродистых и низколегированных сталей самым распространенным способом является пайка медью в печи с восстановительной атмосферой. Для соединения тонкостенных элементов деталей из углеродистых и низколегированных сталей широко применяют оловянносвинцовые и свинцовые припои. В качестве флюса наибольшее распространение получили водные растворы хлористого цинка.

При пайке сталей мартенситного класса, например 30ХГСА, оловянносвинцовыми припоями нередко возникают трещины под действием жидкого припоя. При этом наблюдается определенная закономерность: чем больше олова в применяемом припое и чем выше

собственные напряжения в паяемой детали, тем большая вероятность возникновения в ней трещин в процессе пайки. Для устранения этого перед пайкой необходимо производить отпуск закаленных сталей. При сборке заготовок из таких сталей под пайку необходимо стремиться не создавать собственных напряжений и производить пайку припоями, содержащими не более 40% Sn. В остальном подготовка поверхности, сборка, нанесение припоев и флюсов, процесс пайки и обработка после пайки углеродистых и низколегированных сталей осуществляются по обычной технологии.

В ы с о к о л е г и р о в а н н ы е к о н с т р у к ц и о н н ы е с т а л и. Эти стали также можно паять всеми способами с применением рекомендованных выше припоев и флюсов. Затруднения в процессе пайки встречаются только в тех случаях, когда легирующие элементы, например хром, образуют на поверхности стали химически устойчивые окислы. В этом случае применяют более активные флюсы, а в качестве газовой среды используют трехфтористый бор в смеси с азотом или аргоном. При этом следует иметь в виду возможность поверхностного азотирования стали в процессе пайки, что при небольших толщинах (менее 1 мм) может привести к повышению прочности и снижению пластичности конструкционных сталей.

При пайке закаленных высоколегированных сталей следует иметь в виду возможность отжига в процессе пайки и, следовательно, снижение их механических свойств. Во избежание этого пайку ведут при температуре высокого отпуска (620°C) с применением припоя ПСр40 и флюсов № 284 или 209, которые обеспечивают получение высококачественных паяных соединений.

Возможен и другой вариант высокотемпературной пайки конструкционных сталей без снижения прочности основного материала. Это — совмещение процесса пайки с закалкой и последующим отпуском. Такая термическая обработка паяных изделий дает возможность не только сохранить прочность основного металла, но и существенно повысить прочность паяных соединений. Однако термическая обработка паяных изделий к настоящему времени мало изучена.

Механические свойства многих сталей при весьма высоких температурах пайки (выше 1100°C) не снижаются, хотя такие температуры недопустимы с точки зрения термической обработки конструкционных сталей.

Н е р ж а в е ю щ и е и ж а р о п р о ч н ы е с т а л и. В связи с высоким содержанием хрома поверхность этих сталей покрыта химически устойчивой окисной пленкой, состоящей в значительной части из труднорастворимых в обычных флюсах окислов хрома. Поэтому пайка таких сталей несколько затруднена. Так, например, окисная пленка на нержавеющей и жаропрочных сталях в газовых восстановительных средах удаляется при температуре около 1200°C , в то время как на обычных конструкционных сталях окисная пленка восстанавливается в тщательно очищенном от примесей водороде даже при 900°C . Поэтому при пайке нержавеющей и жаропрочных сталей в качестве восстановительной атмосферы часто используют трехфтористый бор в смеси с инертными газами, который более активен и

восстанавливает окислы при более низких температурах. При пайке этих металлов на воздухе необходимо выбирать наиболее активные флюсы. Так, с припоями на медной или никелевой основе целесообразно использовать более тугоплавкие флюсы № 200 и 201, а при пайке серебряными припоями наиболее качественные паяные соединения получаются с применением флюсов № 284 и 209.

Длительный нагрев нержавеющей аустенитных сталей при температуре 500—700° С делает их склонными к интеркристаллитной коррозии, поэтому нагрев под пайку и охлаждение после пайки нужно производить быстро. При пайке медными и некоторыми серебряными припоями нержавеющей стали, например Х18Н9Т, растрескиваются только в том случае, если в момент пайки детали находились в напряженном состоянии. При высокотемпературной пайке сталей припоями на никелемарганцевой основе трещины в процессе пайки не возникают. Для предупреждения трещинообразования при пайке сталей нужно следить за тем, чтобы в процессе нагрева детали не находились в напряженном состоянии. В случае пайки нержавеющей сталей необходимо выбирать такие серебряные припои, которые не проникают по границам зерен и, следовательно, не вызывают растрескивания сталей, например припой ПСр40.

Для получения жаропрочных и кислотостойких паяных соединений необходимо применять припои на никелехромомарганцевой основе, например припой № 20. Из припоев на медной основе можно рекомендовать припой ВПр1.

§ 3. Пайка никеля и его сплавов

Электротехнические никелевые сплавы типа монель-металл и константан, представляющие собой сплавы никеля с медью и железом, имеют на своей поверхности химически не стойкую окисную пленку, которая легко восстанавливается в газовых средах, удаляется флюсами и при высокотемпературной пайке в вакууме разлагается на кислород и металл. Поэтому пайка этих сплавов никаких затруднений не вызывает. При пайке можно применять припои, флюсы и газовые среды, рекомендованные для сталей и медных сплавов.

Значительно труднее паять жаропрочные сплавы на основе никеля (нихромы), поверхность которых покрыта весьма стойкой окисной пленкой, содержащей окислы хрома. В случае легирования нихромов алюминием и титаном химическая стойкость окисной пленки возрастает, что затрудняет ее удаление. При пайке жаропрочных сплавов на основе никеля в восстановительных газовых средах необходимо добиваться тщательной очистки их от остатков кислорода с помощью платинового или дунитового катализатора, а также дополнительно осушать до точки росы (—70° С).

При пайке в вакууме или нейтральных газовых средах последние необходимо также тщательно осушать с помощью цеолита, перекиси бария или фосфорного ангидрида. Перед пайкой нихромы нужно покрывать слоем никеля толщиной 7—10 мкм, который обеспечивает

хорошее смачивание паяемых поверхностей в вакууме и нейтральных средах без применения флюсов.

При пайке (с местным нагревом) нихромов жаропрочными припоями рекомендуется применять флюсы № 200 и 201, а при пайке серебряными припоями — флюсы № 284 и 209. Серебряные и медные припои для пайки жаропрочных никелевых сплавов применяют редко из-за низких жаропрочности и коррозионной стойкости.

Если от паяных соединений требуется высокая жаропрочность и кислотостойкость, то следует применять припои на никелехромовой основе, легированные для снижения температуры плавления марганцем, бором или кремнием. При этом следует помнить, что припои, легированные марганцем, например № 20, дают более пластичные паяные соединения в сравнении с нихромовыми припоями типа «кольманой», легированными бором и кремнием.

При пайке никеля и его сплавов необходимо следить за тем, чтобы применяемые газовые среды не содержали соединений серы. При взаимодействии серы с никелем образуется легкоплавкая эвтектика, проникающая по границам зерен и вызывающая охрупчивание металла.

§ 4. Пайка чугуна

Чугуны разделяют на белые, серые, легированные, специальные и высокопрочные. Белые чугуны являются главным образом перелдальными и пайке подвергаются редко. Основная трудность при пайке чугуна — наличие в его структуре графита, затрудняющего смачивание поверхности основного металла расплавленным припоем. Для удаления графита обычно применяют пескоструйную обработку с последующим выжиганием графита окислительным пламенем газовой горелки или электрохимическую обработку в соляной ванне при температуре 450—510° С.

Для разрушения окисной пленки и защиты чугуна от окисления более целесообразно применять такие активные флюсы, как № 209 и 284, которые удаляют графит с поверхности чугуна в процессе пайки и благодаря этому обеспечивают надежное смачивание припоем соединяемых поверхностей.

При пайке чугунов в качестве припоев применяют обычно сплавы на медной основе, например латуни. Иногда применяют серебряные припои, содержащие никель, которые имеют сравнительно низкие температуры плавления и образуют прочные паяные соединения. Главное преимущество пайки чугунов серебряными припоями с флюсом № 284 или 209 в том, что нет необходимости принимать меры по удалению графита, а также и в том, что отпадает опасность перегрева чугуна до слишком высоких температур (выше 900° С). Перегрев чугуна связан со структурными превращениями, что при охлаждении приводит к выделению хрупкого цементита.

Если необходимо паять чугуны оловянносвинцовыми или другими низкотемпературными припоями, предварительно с паяемой поверхности следует удалить углерод путем обработки чугуна флюсом

№ 209 или 284 при температуре 600—700 С. Можно применить и электрохимическую обработку в соляной ванне. После такой подготовки процесс пайки чугуна не отличается от пайки углеродистых сталей.

§ 5. Пайка инструментальных сталей и твердых сплавов

В качестве инструментальных иногда применяют высокоуглеродистые стали, содержащие 0,6—1,2% С. Такие стали можно паять всеми способами с учетом технологических рекомендаций по пайке конструкционных сталей и чугуна.

Из-за недостаточной теплостойкости инструментальных сталей их легируют вольфрамом (до 18%), хромом (до 5%), ванадием (до 4%) и другими элементами, увеличивающими жаропрочность и позволяющими благодаря этому значительно повышать скорость резания. Такие инструментальные стали, называемые быстрорежущими, подвергают закалке с температур 1200—1300° С с последующим отпуском при температуре 560—580° С или обработке холодом. Поэтому быстрорежущие стали припаивают к корпусу инструмента из конструкционных сталей в указанном интервале температур, применяя при этом высокотемпературные никелевые припои или ферросплавы, например ферромарганец, содержащий 70—80% Мп. Пайку инструмента из быстрорежущих сталей производят в газопламенных печах, погружением в соляные ванны, а также индукционным способом с использованием флюсов № 200 и 201. Сразу после затвердевания металла шва производят закалку инструмента.

В настоящее время во всех областях техники наибольшее распространение получил твердосплавный инструмент. Поверхность твердых сплавов трудно смачивается расплавленными припоями, поэтому флюсование их при пайке только боратыми флюсами недостаточно. При пайке следует использовать более активные боратнофтористые флюсы, например № 200, 201 и др. Главным затруднением при пайке твердосплавного инструмента является большое различие в коэффициентах теплового расширения соединяемых материалов. Коэффициент теплового расширения металла корпуса инструмента почти в 2 с лишним раза выше, чем твердого сплава. После пайки и охлаждения это приводит к возникновению сильных внутренних напряжений в шве, что нередко вызывает растрескивание твердосплавной пластинки после кратковременной эксплуатации.

Для снижения внутренних напряжений в шве, кроме применения припоев с более низкой температурой плавления и компенсационных прокладок, корпус инструмента изготавливают из легированной стали типа 30ХГСА, которая после пайки и закалки на мартенсит почти вдвое снижает напряжения в твердосплавном инструменте по сравнению с напряжением, возникающим в инструменте с корпусом из стали У7 со структурой перлита. Это объясняется тем, что при превращении аустенита в мартенсит сталь 30ХГСА несколько увеличи-

вается в объеме, что снижает ее суммарное сужение при охлаждении после пайки.

Учитывая резкое различие коэффициентов теплового расширения соединяемых материалов, пайку твердосплавного инструмента нельзя вести при высоких температурах. Наилучший результат, т. е. наибольшая долговечность инструмента, достигается при пайке серебряными припоями, легированными для теплостойкости никелем или марганцем, однако ввиду дефицитности серебряные припои для пайки твердосплавного инструмента применяются редко.

Наибольшее распространение для пайки твердосплавного инструмента получили медноцинковые припои типа латуни Л63, легированной для повышения теплостойкости небольшими добавками никеля, марганца или алюминия. Эти припои сравнительно легкоплавки и пластичны, благодаря чему они обеспечивают получение высококачественных соединений при пайке твердосплавного инструмента.

Иногда для пайки инструмента применяют более жаропрочные медномарганцевые припои.

Твердосплавный инструмент можно паять различными способами, но наиболее перспективными являются пайка способом погружения и индукционная, которые дают возможность механизировать и даже автоматизировать этот процесс. Так, например, ВНИИПТуглемаш в содружестве с заводами создал автоматическую роторную линию для пайки горного твердосплавного инструмента способом последовательного погружения в расплавленные флюс и припой. Такая автоматизация позволила в десятки раз повысить производительность труда и на 30—40% увеличить срок службы твердосплавного инструмента.

Заслуживает также внимания разработанный ВНИИинструмент механизированный способ индукционной пайки твердосплавного инструмента с использованием таблеток, спрессованных из порошка припоя и флюса. Этот способ позволяет поднять производительность труда паяльщиков в несколько раз.

§ 6. Пайка титана и его сплавов

Титан и титановые сплавы обладают высокой химической активностью по отношению к газам. При взаимодействии с воздухом титан не только окисляется, но и образует нитриды. В результате взаимодействия с водородом на поверхности титана и титановых сплавов образуются также хрупкие гидриды. Поэтому газовые атмосферы, содержащие азот и водород, для пайки титана и титановых сплавов непригодны.

На поверхности титана всегда имеется альфированный слой, насыщенный атмосферными газами. Перед пайкой этот слой необходимо удалить пескоструйной обработкой или травлением в растворе состава, мл/л воды: 20—30 HF, 30—40 HCl. Время травления 5—10 мин при комнатной температуре. После такой обработки на поверхности титана все же остается тонкая окисная пленка, препятствующая сма-

чиванию титана припоем. Поэтому иногда пытаются паять титан с использованием специальных флюсов, по составу и химическому действию аналогичных флюсам для пайки алюминия. Но до настоящего времени хороших флюсов для пайки титана не разработано и соединения, паянные с применением флюсов, пока получаются недостаточно качественными.

Обычно пайку титана и его сплавов ведут в среднем вакууме или в аргоне первого состава, который тщательно очищен от примесей кислорода, азота и паров воды. Только в такой чистой атмосфере или в вакууме окисная и нитридная пленки на титане растворяются в металле при условии, что температура пайки выше 700°C . Поэтому процесс пайки титана ведут обычно при температуре $800\text{—}900^{\circ}\text{C}$, что способствует быстрой очистке поверхности титана и хорошему смачиванию его припоями. Пайку титановых сплавов при более высоких температурах производят довольно редко, особенно печную, так как при длительном нагреве при температуре выше 900°C титан склонен к росту зерна и к некоторому снижению пластических свойств. Поскольку предел прочности при этом практически не снижается, то в отдельных случаях титановые сплавы соединяют пайкой даже при 1000°C .

Водород, всегда находящийся в титане и снижающий его пластичность, удаляется в вакууме 10^{-4} мм рт. ст. при температуре около 900°C , поэтому пайка титана в вакууме предпочтительнее, чем пайка в нейтральной атмосфере. Однако при меньшем разряжении (с большим содержанием примесей) пластичность основного металла при пайке в вакууме может снижаться значительно, чем в среде аргона. Поэтому вопрос предпочтительности применения вакуума или аргона при пайке титана следует решать с учетом содержащихся в них примесей. Оценить предпочтительность вакуума или аргона по содержанию в титане примесей кислорода и паров воды можно с помощью графика (рис. 108), на котором представлены зависимости [45]

$$K_{\text{O}_2} = 1,43 \cdot 10^{-4} \frac{P_{\text{Ar}}}{P_{\text{в}}} \text{ и } K_{\text{H}_2\text{O}} = 1,43 \cdot 10^{-3} \frac{P_{\text{Ar}}}{P_{\text{в}}}$$

(где K_{O_2} и $K_{\text{H}_2\text{O}}$ — коэффициент предпочтительности среды соответственно по содержанию примеси кислорода и паров воды; P_{Ar} — давление аргона при пайке; $P_{\text{в}}$ — остаточное давление при пайке в вакууме).

Условие предпочтительности аргона перед вакуумом, вакуума перед аргонem, а также условия равноценности этих сред по содержанию в них примесей можно выразить следующим образом: $K < 1$; $K > 1$; $K = 1$.

При выборе припоя, способа и режимов пайки необходимо иметь в виду, что в паяном шве титан образует хрупкие интерметаллиды почти со всеми элементами, входящими в припой. Поэтому в качестве основы припоя часто выбирают серебро, которое образует с титаном интерметаллиды, предположительно менее хрупкие, чем с другими металлами. Иногда за основу припоев выбирают алюминий, который образует с титаном ограниченную область твердых растворов,

однако получаемые при этом соединения имеют низкую прочность и непригодны для ответственных конструкций.

На практике наибольшее распространение получили серебряные припои, которые (при пайке в печи при температуре $950\text{--}1000^\circ\text{C}$) обеспечивают высокую прочность паяных соединений. Так, например, при пайке титана ВТ1Д чистым серебром в атмосфере аргона предел прочности паяных соединений составляет $18\text{--}20\text{ кг/мм}^2$, а при пайке серебром, легированным марганцем (10—15%), предел прочности паяных соединений достигает 28 кг/мм^2 . При этом соединения, паян-

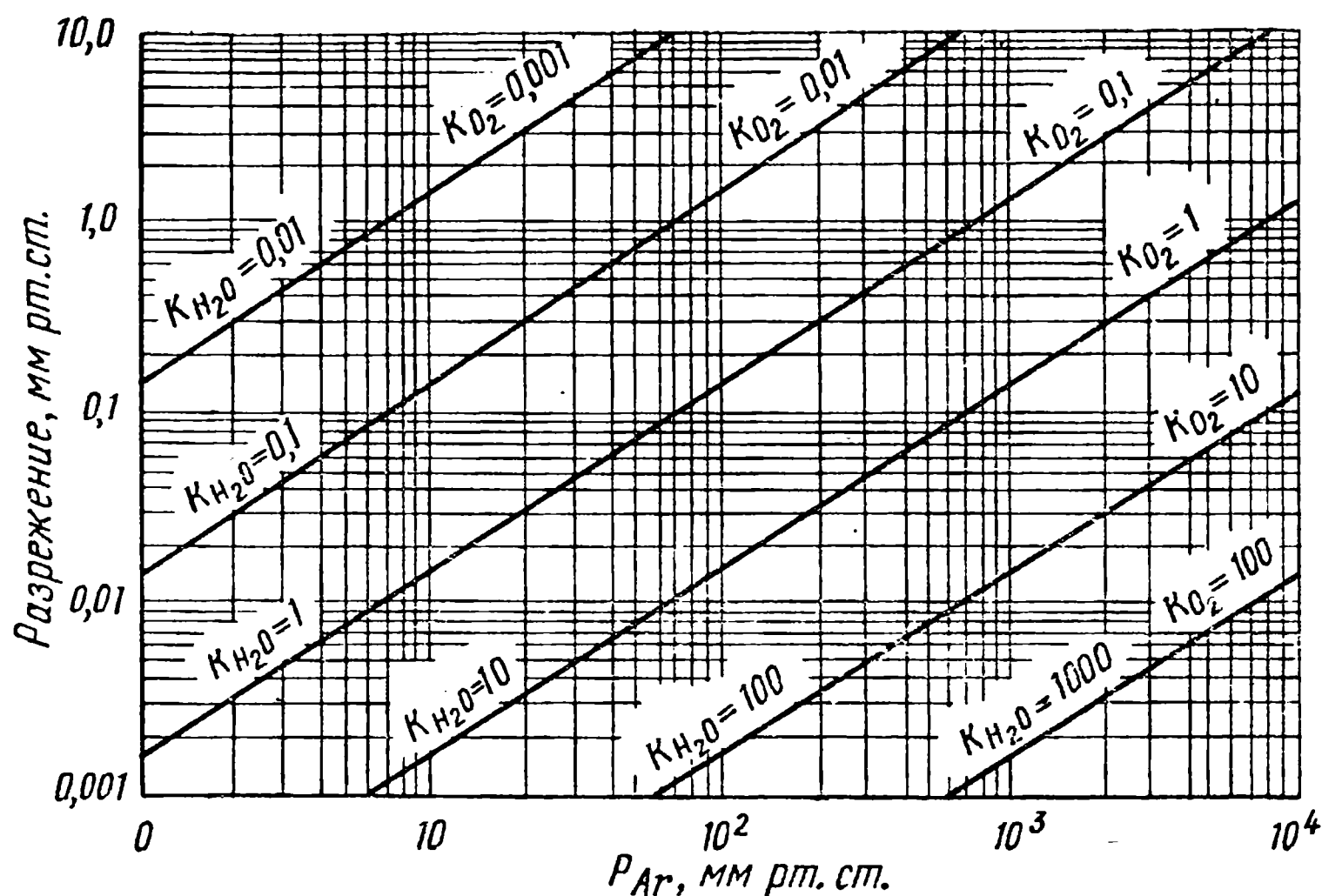


Рис. 108. Номограмма для определения коэффициента K в зависимости от давления аргона или разрежения в камере пайки

ные чистым серебром, неустойчивы против коррозии и в течение года (в городской атмосфере) их прочность снижается на 25—30%.

Еще более высокие значения прочности паяных соединений можно получить при высокотемпературной пайке титана припоями на основе никеля или меди, но эти металлы очень быстро растворяют титан, вызывая сильную эрозию и охрупчивание около паяных швов.

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

Пайка титановых сплавов оловянносвинцовыми и другими низкотемпературными припоями применяется редко. В этом случае перед пайкой титан покрывают никелем химическим или гальваническим

способом. Для увеличения сцепления никеля с титаном его нагревают до 250°C в течение 1 ч. После этого пайку ведут теми же припоями и флюсами, которые применяются для чистого никеля.

Как общее правило для того, чтобы избежать образования в паяном шве интерметаллидов и, следовательно, охрупчивания титана, в процессе пайки необходимо:

1) применять в качестве припоев металлы, которые имеют увеличенную растворимость в α -титане;

2) использовать многокомпонентные составы припоев, чтобы при таком же количестве вводимого в зону пайки припоя уменьшалась степень пересыщения α -титана.

При пайке титана с другими металлами, особенно при высокой температуре, паяные соединения получаются хрупкими и непрочными. Так, например, при пайке титана с медью серебряным припоем прочность паяного соединения, как правило, не превышает 10 кг/мм^2 , так как титан и медь быстро растворяются припоем в процессе пайки и образуют в паяном шве хрупкие интерметаллиды.

Для того чтобы избежать охрупчивания основного металла и повысить прочность паяных соединений, на титан или на оба соединяемых металла наносят такие покрытия, которые хорошо поддаются пайке и вместе с тем надежно защищают паяемые металлы от взаимодействия с припоем. Покрытие в данном случае является как бы барьером против образования интерметаллидов в паяном шве.

В качестве барьерных покрытий нужно выбирать такие металлы, которые хорошо поддаются пайке и не образуют хрупких интерметаллидов с основными металлами в диффузионной зоне при температуре пайки. На титан целесообразно наносить тугоплавкие металлы, которые могут образовать в контакте с титаном пластичные твердые растворы.

К титану по своим физико-химическим свойствам близок цирконий, поэтому все технологические рекомендации по пайке титана можно в значительной мере отнести к пайке циркония и циркониевых сплавов.

§ 7. Пайка тугоплавких металлов

К тугоплавким металлам относят вольфрам, молибден, тантал, ниобий и хром. Эти металлы играют важную роль в развитии новых отраслей техники, без них невозможно создать конструкции, выдерживающие высокие температуры, поэтому разработка надежных методов их соединения пайкой имеет большое значение.

В о л ь ф р а м применяют для изготовления деталей, которые в процессе работы нагреваются до высоких температур. Температура плавления вольфрама 3410°C . В конструкциях он способен надежно работать при температурах выше 2700°C . Основным недостатком вольфрама является высокий температурный порог хладноломкости ($300\text{—}500^{\circ}\text{C}$) и пониженная прочность после рекристаллизации, поэтому пайку вольфрама необходимо производить при температурах не выше температуры рекристаллизации (1450°C). При сварке плав-

лением рекристаллизация вольфрама и его охрупчивание неизбежны, поэтому при изготовлении деталей из вольфрама предпочтительнее применять пайку. При соединении вольфрама с другими металлами основная трудность заключается в значительном различии коэффициентов линейного расширения.

При пайке вольфрама требуется особо тщательно очищать поверхности деталей. Очистку производят механическими средствами или травлением в кислотах, например в смеси равных частей азотной и фтористоводородной кислот с последующей промывкой в горячей воде и спирте. Очистку можно вести также в горячем растворе едкого натра или электролитическим методом, применяя в качестве электролита разбавленный раствор азотнокислого натрия NaNO_3 . Способ очистки выбирают в зависимости от степени окисленности вольфрама. Для улучшения смачивания вольфрама расплавленными припоями иногда применяют предварительное гальваническое покрытие его никелем или медью.

Пайка вольфрама успешно производится во всех защитных и восстановительных средах, но чаще в вакууме, который обеспечивает получение более плотных паяных швов. Однако следует учитывать, что пайка изделий из тонколистового вольфрама в среде водорода приводит к охрупчиванию основного металла.

Для пайки вольфрама применяют припои с температурой плавления до 3000°C , в том числе чистые металлы: тантал, ниобий, никель, медь, молибден и сплавы: никель—титан, никель—медь, марганец—никель—кобальт и др. Ввиду активного взаимодействия никеля и припоев на основе никеля с вольфрамом при пайке ими необходимы малые выдержки.

Для соединения вольфрама перспективным является сочетание пайки с последующей диффузионной обработкой. В результате такой обработки получают паяные соединения с высокой температурой распая, т. е. вторичного расплавления металла паяного шва. При диффузионной обработке происходит диффузия и растворение, а также и испарение отдельных компонентов. Например, марганец кипит при температуре 2150°C , и при этой температуре он полностью испаряется. Поэтому при диффузионной обработке швов, паянных припоями, содержащими марганец, повышение температуры вторичного расплавления достигается за счет испарения марганца. При правильном сочетании припоя, температуры пайки и времени выдержки можно получить паяные соединения с температурой вторичного расплавления до 2760°C .

Для примера укажем на способ пайки вольфрама припоем системы платина—бор с добавкой порошка вольфрама. При температуре пайки $1000\text{—}1100^\circ\text{C}$ в результате реакционной диффузии в шве образуется сплав, работоспособный при 2000°C [46]. Преимуществом этого припоя является то, что пайку вольфрама можно проводить при температуре ниже температуры его рекристаллизации, т. е. без снижения механических свойств вольфрама.

Молибден имеет температуру плавления 2622°C и плотность его почти вдвое меньше вольфрама. Из него можно выполнять кон-

струкции, работоспособные до 2000°C . Однако он так же, как и вольфрам, сильно окисляется и без специальных покрытий не может работать при высоких температурах в воздушной атмосфере.

Основным затруднением при пайке молибдена является большое сродство его к кислороду, а также склонность к росту зерна при высоких температурах. Поэтому пайку молибдена необходимо производить в глубоком вакууме или в среде аргона, тщательно очищенного от кислорода и паров воды, с применением высокой скорости нагрева. Перед пайкой молибдена должна быть полностью удалена окисная пленка путем погружения в расплав: 70% NaOH и 30% Na_2CO_3 при температуре не выше 400°C или с помощью электролитического травления в 80%-ном водном растворе серной кислоты при температуре $50\text{—}60^{\circ}\text{C}$.

Для пайки молибдена пригодно большинство припоев, рекомендованных для пайки вольфрама. Например, припой, содержащий 80% Ni, 14% Cr и 6% Fe, обеспечивает получение паяного соединения с пределом прочности на срез $13,2\text{ кГ/мм}^2$ при 980°C .

Если пайка проводится при температурах выше температуры рекристаллизации молибдена (около 1100°C), то время выдержки при пайке должно быть минимальным. Для пайки молибдена со сталью рекомендуется припой на медной основе состава: 10% Ni; 10% Mn; 2—3% Cr; 1—2% Fe; 0,5% Si. При пайке со сталью X18H9T предел прочности паяного соединения при 600°C составляет $22\text{—}23\text{ кГ/мм}^2$.

Т а н т а л имеет температуру плавления 2996°C и плотность $16,6\text{ г/см}^3$. В отличие от рассмотренных тугоплавких металлов — вольфрама и молибдена — он обладает пластичностью.

Тантал интенсивно поглощает газы при нагревании, поэтому при пайке тантала предпочтителен вакуум не ниже $10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$ Сведения о пайке тантала в литературе встречаются редко.

В качестве припоев целесообразно использовать прежде всего такие металлы, как титан, ванадий, ниобий и молибден, которые образуют с танталом непрерывный ряд твердых растворов, что позволяет получать высокопрочные и пластичные паяные соединения. Имеются сведения об успешном применении сплавов из этих металлов, например припой, содержащий 85% Ti и 15% Mo, дает возможность производить пайку при 1850°C .

Н и о б и й имеет температуру плавления 2468°C и плотность $8,57\text{ г/см}^3$. Ниобий и его сплавы обладают высокой пластичностью и жаропрочностью. В природе ниобий часто встречается вместе с танталом и обладает сходными с ним свойствами. В связи с этим технология пайки ниобия и его сплавов аналогична пайке тантала.

С целью получения высокопрочных и пластичных паяных соединений для пайки ниобия целесообразно применять чистые металлы: титан, ванадий, цирконий, которые образуют с ниобием неограниченные твердые растворы. На основе этих металлов можно получить пластичные припои и жаропрочные паяные соединения, однако все они слишком тугоплавки и поэтому требуется оборудование, позволяющее производить пайку в высоком вакууме при температурах

1600—1900 °С. Иногда для пайки ниобия применяют и более легкоплавкие припои, например припой на основе меди, содержащий 30% Ni; 1—2% Fe; 1—2% Si; 0,2% В, который после длительной выдержки при температуре пайки (1150°С) обеспечивает получение достаточно прочных паяных соединений.

Хром высокой чистоты, содержащий вредные примеси в количестве не более 0,015%, пластичен даже при низких температурах. При температуре 800°С хром имеет прочность 19 кГ/мм², а удлинение до 85%; при температуре 1500°С его предел прочности составляет 3 кГ/мм², а удлинение — около 30%. Следовательно, хром и сплавы на его основе имеют хорошие перспективы для применения их в конструкциях, работающих при высоких температурах, особенно если учесть его сравнительно малую плотность (7,2 г/см³), а также и то что запасы хрома в земной коре превышают запасы остальных тугоплавких металлов, взятых вместе.

Главной трудностью при пайке хрома является необходимость удаления с его поверхности весьма стойкой окиси Cr₂O₃. Пайку хрома нужно вести в высоком вакууме не ниже 10⁻⁴ мм рт. ст. при температурах до 1350°С. При более высоких температурах хром в вакууме легко испаряется, поэтому пайку его в этом случае целесообразно вести в среде аргона. В качестве припоев следует выбирать такие металлы, с которыми хром образует пластичные и жаропрочные сплавы типа твердого раствора. К таким металлам относятся прежде всего железо и титан, которые образуют с хромом неограниченную область твердых растворов с минимальной температурой плавления. Для железа минимум составляет 1508°С, для титана 1390°С при содержании этих элементов в сплавах с хромом соответственно 78 и 55%.

Со многими металлами хром образует при сплавлении хрупкие интерметаллиды, поэтому при выборе или разработке припоя это надо учитывать.

Низкотемпературная пайка для тугоплавких металлов применяется редко. В случае необходимости паять их легкоплавкими припоями тугоплавкие металлы предварительно покрывают слоем никеля в 10—20 мкм, после чего подвергают термической обработке при температуре 200—250°С в течение 1 ч для улучшения сцепления покрытия с основным металлом. Пайку по покрытию проводят согласно рекомендациям, приведенным для никеля.

§ 8. Пайка бериллия

Изделия из бериллия наряду с малой плотностью (1,84 г/см³) имеют большую прочность (предел прочности 56 кГ/мм²). Температура плавления бериллия довольно высокая (1283°С), поэтому он является перспективным конструкционным материалом для летательных аппаратов, в приборостроении и для атомных реакторов.

Ввиду высокой химической активности поверхность бериллия в атмосферных условиях быстро покрывается окисной пленкой. Перед пайкой поверхность бериллия с целью удаления окислов нужно

протравить в растворе, содержащем 450—500 мл ортофосфорной кислоты, 50—55 г хромового ангидрида и 25—30 мл концентрированной серной кислоты. При подогреве ванны до 50—60° С растворение окисной пленки протекает более активно.

Известны попытки паять бериллий на воздухе при местном его нагреве. Однако хороших результатов при этом не было получено. Поэтому целесообразно пайку бериллия производить в печи при разряжении 10^{-5} — 10^{-6} мм рт. ст., а также в тщательно очищенных аргоне или гелии.

В качестве припоев для пайки бериллия с бериллием применяют эвтектические сплавы алюминия с кремнием или серебра с медью. Температура пайки, рекомендуемая различными авторами, колеблется в пределах 785—1060° С. При пайке серебряным припоем рекомендуется минимальная (5—10 мин) выдержка и быстрое охлаждение. При длительных выдержках вследствие различной скорости взаимной диффузии бериллия и припоя в паяном шве образуются пустоты.

При пайке бериллия алюминием выдержка при температуре пайки (870° С) приводит к упрочнению паяного шва. Предел прочности постепенно повышается с 9 до 19 кГ/мм² при выдержке в течение 96 ч. При скоростной пайке бериллия серебряным припоем прочность паяного шва получается около 10 кГ/мм². При пайке бериллия с другими металлами, например с никелем, монель-металлом или с титаном, обычно пользуются серебряными припоями и получают прочность паяных соединений в пределах 10—15 кГ/мм².

При низкотемпературной пайке бериллия применяют никелевые покрытия и используют флюс ЛК-2.

§ 9. Пайка алюминия и его сплавов

Главным препятствием при пайке алюминия является окисная пленка Al_2O_3 , которая почти мгновенно образуется при ее удалении. Окисная пленка алюминия является весьма стойким химическим соединением и имеет температуру плавления 2050° С. Ее не удастся растворить или восстановить обычными флюсами, применяемыми при пайке меди или стали. Из механических способов разрушения окисной пленки в процессе пайки представляют интерес абразивная и ультразвуковая пайка алюминия. При абразивной пайке асбест, выполняющий роль абразива, легко снимается с поверхности нагретого алюминия окисную пленку, а содержащийся в паяльном стержне припой, оплаваясь в контакте с алюминием, облуживает его поверхность. После облуживания паяные соединения первоначально обладают достаточной прочностью, но при эксплуатации во влажной атмосфере или в воде прочность их довольно быстро снижается в результате коррозии. Это объясняется тем, что применяемые при абразивной пайке оловянноцинковые припои имеют большую разность нормальных электродных потенциалов по сравнению с алюминием, а это вызывает электрохимическую коррозию.

Соединения, полученные с помощью ультразвукового паяльника, так же как и соединения, полученные абразивной пайкой, требуют нанесения гидрофобных (водоотталкивающих) покрытий, без которых коррозионная стойкость паяных соединений очень низкая.

Наиболее надежные паяные соединения удастся получить при пайке алюминия и его сплавов припоями на основе алюминия, которые имеют незначительную разность нормальных электродных потенциалов с основным металлом и поэтому не вызывают значительной коррозии в зоне паяных швов. При пайке применяют активные флюсы типа 34А, которые интенсивно удаляют окисную пленку алюминия в процессе пайки. Перед пайкой поверхность алюминиевых деталей очищают путем травления в щелочах, затем осветляют в азотной кислоте с последующей промывкой в воде. После очистки детали собирают под пайку с зазором 0,1—0,3 мм и подвергают пайке.

При пайке горелкой ацетилено-кислородное пламя применять нежелательно, так как оно взаимодействует с флюсом и снижает его флюсующие свойства. Предпочтительно бензино- или газовоздушное пламя, которое не ослепляет паяльщика и дает ему возможность производить пайку без очков.

После предварительного нагрева соединяемых деталей до 400—500° С вносят флюс и припой одновременно. Флюс 34А плавится раньше припоя и, растекаясь по поверхности, удаляет окисную пленку еще до начала плавления припоя. Благодаря этому расплавленный припой быстро затекает в зазоры и обеспечивает прочное соединение деталей.

В качестве припоя чаще всего используют эвтектические сплавы на основе алюминия, например, силумин или припой 34А. Процесс пайки силумином более труден из-за его высокой температуры плавления, близкой к температуре плавления алюминия и его сплавов. Преимущество соединений, паянных силумином, — высокая стойкость против коррозии даже в морской воде.

При пайке алюминия горелкой наибольшее распространение имеет припой 34А, который более легкоплавок, чем силумин, поэтому пайка им проще, отсутствует опасность оплавления паяемых деталей.

При пайке алюминия и его сплавов в печах обычно применяют те же флюсы и припой, что и при пайке горелкой, но наносят их на паяемые детали заранее. Припой наносят при сборке деталей, а флюс в виде пасты (на безводном спирте) непосредственно перед загрузкой деталей в печь. Температура пайки 600° С для силумина и 560° С для припоя 34А. Выдержка в печи при температурах пайки минимальная. После расплавления припоя и образования галтелей детали выгружают из печи и охлаждают на воздухе.

При пайке в соляной ванне применяются флюсы, не содержащие хлористого цинка (табл. 48). Эти флюсы медленнее растворяют окисную пленку, чем флюс 34А, но зато не разъедают поверхность паяемых деталей, как это наблюдается при длительных процессах пайки с флюсами типа 34А (Ф320, Ф380 и 34А). Во избежание коррозии немедленно после пайки нужно промыть детали от остатков флюса в проточ-

ной воде в течение 15—20 мин и обработать в 5%-ном растворе хромового ангидрида (5—10 мин).

Высокотемпературная пайка с флюсом горелкой, в печах и в соляной ванне снижает прочность закаленных алюминиевых сплавов, переводя их в отожженное состояние, поэтому пайку с флюсом типа 34А не рекомендуется применять для таких алюминиевых сплавов, температуры солидуса которых ниже 500° С.

Пайка алюминия и его сплавов в газовых средах припоями на алюминиевой основе является весьма перспективной, но еще не вполне решенной. Встречающиеся попытки паять алюминий в специальных газовых средах или в высоком вакууме заслуживают внимания, но в промышленности этот способ пока еще не применяется.

Наиболее интересны попытки проводить бесфлюсовую пайку алюминия путем контактно-реакционной пайки. В этом случае на поверхность алюминия наносят медь, серебро, цинк и другие металлы, которые дают с алюминием эвтектику. При необходимости произвести пайку алюминиевых деталей низкотемпературными припоями следует покрыть их поверхность химическим никелем, термически обработать при 250° С в течение 1 ч и паять паяльником с применением оловянно-свинцового припоя ПОС-61 и флюса ЛК-2. Такой способ пайки обеспечивает удовлетворительную стойкость паяных соединений в атмосферных условиях.

Значительный интерес представляет разработанный в последние годы коллективом ученых механизированный способ низкотемпературной пайки конструкций из листового алюминия, предварительно плакированного цинком или сплавом цинка с 5% алюминия. В результате отсутствия непосредственного взаимодействия расплава припоя с алюминием в процессе пайки обеспечивается высокая коррозионная стойкость паяных соединений. По плакированному слою пайка алюминия осуществляется припоем ПОСК51 с применением в качестве флюса стеарина [47].

Новым направлением в решении проблем соединения алюминия и его сплавов является вакуумная пайка в парах магния. В этой атмосфере в результате связывания магнием свободного кислорода в камере пайки происходит удаление окисной пленки с поверхности алюминия. Образующийся при этом на поверхности основного металла и припоя тонкий слой окислов магния не препятствует их взаимодействию и образованию спаев.

§ 10. Пайка магниевых сплавов

В чистом виде магний имеет низкую прочность, малую устойчивость против коррозии, легко окисляется при нагреве, поэтому как конструкционный материал не применяется. Промышленное применение имеют сплавы магния с алюминием, цинком, марганцем, церием и другими металлами.

Магниевые сплавы являются самыми легкими и дешевыми конструкционными материалами. Этим объясняются настойчивые стремления во всех странах разработать надежные методы их соединения

при помощи сварки и пайки и преодолеть основной недостаток — низкую коррозионную стойкость в атмосферных условиях. Трудности пайки магниевых сплавов объясняются широким интервалом кристаллизации большинства из них, наличием на их поверхности трудновосстановимой окисной пленки и легкой воспламеняемостью при нагреве.

При подготовке деталей из магниевых сплавов к пайке особое внимание уделяют очистке соединяемых поверхностей. С поверхности металла тщательно удаляют покрытия, консервирующую смазку и окислы. Поскольку окислы магния не восстанавливаются в среде водорода и в вакууме, то при соединении деталей из магния и магниевых сплавов применяют пайку в печи с использованием флюсов, погружением в расплавы флюсов и пайку горелкой. Вследствие коррозионной активности флюсов, применяемых для пайки магниевых сплавов, соединения должны быть сконструированы так, чтобы облегчить вытеснение флюса расплавленным припоем. С этой целью увеличивают зазоры до 0,2—0,25 мм. Флюсы (табл. 9) применяют в виде порошка или паст, замешанных на безводном спирте. При пайке горелкой применяют флюс в виде сухого порошка или пасты на спирте.

В качестве припоев (табл. 32) применяют сплавы главным образом на основе магния, цинка и кадмия. При применении припоев на основе цинка и кадмия коррозионная стойкость паяных швов низкая. При пайке в печи время выдержки должно быть минимальным, чтобы избежать чрезмерной диффузии припоя в основной металл, следствием которой является охрупчивание металла диффузионной зоны паяного соединения. При нагреве газопламенными горелками в процессе пайки пламя нельзя направлять непосредственно на соединяемые поверхности и флюс, так как при этом происходит интенсивное окисление металла и ухудшение свойств флюса. При пайке погружением собранные детали с нанесенным припоем погружают в ванну с расплавом флюса, нагретого до температуры пайки. При этом нагрев паяемой детали происходит быстро и равномерно, что исключает коробление. Перед погружением во флюсовые ванны деталь подогревают до 300—350° С.

Весьма перспективным является разработанный И. Е. Петруниным и И. Ю. Марковой способ контактно-реакционной пайки магниевых сплавов сопротивлением с выдавливанием жидкой фазы, обеспечивающий равнопрочность паяного соединения с основным металлом. При этом способе пайки в зазор вводят фольгу меди, никеля или цинка. После возникновения жидкой фазы в результате контактного плавления ее выдавливают.

После пайки детали из магниевых сплавов, паянные с применением флюсов, охлаждают и промывают в проточной воде, затем обрабатывают в специальном растворе, содержащем хромовую кислоту, с последующим кипячением в течение 2 ч в 5%-ном растворе хромпика. После такой обработки паяные магниевые детали оксидируют и на них наносят лакокрасочные покрытия. После контактно-реакционной пайки сопротивлением с выдавливанием жидкой фазы паяные швы не требуется защищать от коррозии.

§ 11. Пайка металлов с неметаллическими материалами

Пайкой можно соединять металлы со стеклом, кварцем, фарфором, керамикой, графитом, полупроводниками и другими неметаллическими материалами. Ввиду различия в физико-химических свойствах металлов и неметаллических материалов природа связи в зоне спая иная, чем в соединениях между металлами. Если при пайке металлов основным условием образования прочного паяного соединения является удаление с поверхности соединяемых металлов и припоя слоя окислов, то такие неметаллические материалы, как стекло, кварц, фарфор, керамика, состоят целиком из окислов и, следовательно, образование спая происходит между металлом и окислами элементов.

При пайке металлов с графитом и полупроводниками спай возникает между еще более различными по природе материалами. Ввиду резкого различия коэффициентов термического расширения и других свойств металлов и неметаллических материалов технологические процессы пайки последних разработаны в меньшей степени, чем для металлов. Механизм смачивания расплавленным припоем соединяемых деталей и образования спая при пайке металлов с неметаллами в настоящее время еще не раскрыт.

Технологические процессы получения спая между металлами (припоями) и неметаллическими материалами можно разделить на три группы:

1. Процессы, при которых спай образуется в результате введения расплавленного припоя непосредственно на соединяемую поверхность неметаллического материала.

2. Процессы, при которых на неметаллы, предварительно покрытые слоем металлов наносится припой и, таким образом, спай образуется в результате пайки по металлопокрытиям.

3. Процессы, при которых металлы соединяются с неметаллами в результате введения между ними легкоплавких стекла, глазури или эмали¹. В этом случае спай со стороны неметалла образуется в результате взаимодействия на границе твердый неметалл — расплав неметалла.

Соединение металлов с неметаллами с применением металлических связок производят серебряными припоями, содержащими значительное количество титана и циркония (25—50%), которые обладают способностью одновременно смачивать поверхность металлов и неметаллических материалов. Примером может служить пайка титана или железоникелекобальтового сплава с высокоглиноземистой керамикой или кварцем.

Основные трудности при пайке кварца с металлами вызываются большим различием коэффициентов линейного расширения соединяе-

¹ Соединение деталей из металлов и неметаллов, путем введения в зазор между ними расплавов стекла, эмали, глазури и т. п. по характерным признакам относится к пайке.

мых пар: у неметаллических материалов он в 5—7 раз меньше, чем у металлов.

Примером соединения металлов с неметаллами в результате совместного смачивания их расплавленным припоем является также пайка металлов с графитом. Для получения паяного соединения необходимо, чтобы припой одновременно хорошо смачивал оба материала. Для этого используют такие сильные карбидообразователи, как титан и цирконий, хорошо смачивающие графит. Поэтому припои, содержащие эти металлы в качестве основных компонентов, оказались вполне пригодными для соединения металлов с графитом. Недостатком припоев, содержащих титан и цирконий, является весьма низкая коррозионная стойкость в расплавах солей, в которых могут работать паяные соединения металла с графитом. Перспективным является припой состава: 35% Au; 35% Ni и 30% Mo, который пригоден для пайки молибдена с графитом и графита с графитом и образует соединения, устойчивые в среде расплавленных солей [48].

Вторая группа технологических процессов соединения металлов с неметаллами, когда на неметаллический материал перед пайкой наносят пленку металла, характерна для пайки металлов со стеклом и керамикой. В этом случае перед пайкой на поверхность стекла или керамики путем вжигания (серебра или платины), металлизацией, восстановлением окислов или другими способами наносят слой металла. После этого пайка принципиально ничем не отличается от обычной, применяемой при соединении металлов.

Так, например, для соединения металлической детали со стеклянной вжигание металла в последнюю производится следующим образом: стеклянную деталь покрывают суспензией порошка металла или соединений металла, например хлористой платины или окиси серебра, и нагревают с целью получения прочно сцепленной со стеклом пленки металла. После этого ее соединяют с металлической деталью путем обычной пайки оловом или оловянно-свинцовым припоем. В качестве флюса применяют водный раствор хлористого цинка. Если спай предназначен для работы при высоких температурах, в качестве припоев применяют серебро, медь или сплавы на их основе. Металлическое покрытие в этом случае должно быть особо прочно связано со стеклом.

Для получения хороших спаев стекло должно быть чистым, покрытие металлом должно быть плотным, сочленяемый металлический элемент также должен быть тщательно очищен от загрязнений и окисных пленок. При пайке необходимо избегать перегрева, чтобы металлическая пленка на стекле не растворилась в припое [49].

Третий случай соединения металлов с неметаллами путем применения переходных слоев из стекла, глазури, эмали также широко распространен. В соединениях металла со стеклом получаемых с применением легкоплавких промежуточных стекол, опасность образования трещин уменьшается, так как напряжения в спае металл—стекло значительно ниже, чем при пайке без переходного стекла. Этот способ позволяет предварительно покрывать металл стеклом при строго определенных режимах, а последующее соединение элементов

изделия сводится в простому сплавлению стекла со стеклом. Применение предварительного покрытия металла более легкоплавким стеклом рекомендуется также в тех случаях, когда соединяемый металл не смачивается стеклом, с которым он должен быть соединен. Известны попытки использовать легкоплавкие глазури (эмали) для присоединения минералокерамических пластинок к стальной державке инструмента.

Г л а в а IX

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПАЙКИ

§ 1. Печи для пайки

Печной нагрев наиболее соответствует технологическим особенностям пайки, обеспечивает высокое качество паяных соединений и при использовании средств механизации дает наиболее высокую производительность труда. Защита основного металла и припоя от окисления и удаление с их поверхности окисной пленки при пайке в печи обеспечиваются путем применения флюсов, контролируемых атмосфер и вакуума. Пайка в печи с применением контролируемых атмосфер и средств механизации является наиболее совершенным процессом получения паяных изделий.

В комплекс оборудования, применяемого при печной пайке, входят печи с устройством для транспортировки паяемых деталей, установки для производства контролируемых атмосфер или создания вакуума и приспособления для сборки и пайки. Печи по конструктивным особенностям и условиям нагрева паяемых деталей делят на следующие группы: 1) печи с ручной подачей; 2) с роликовым подом; 3) с ленточным конвейером; 4) шахтные, колпаковые и элеваторные; 5) вакуумные печи.

В электропечах сопротивления с воздушной атмосферой в качестве нагревателей используют главным образом сплавы на никеле-хромовой и железохромоалюминиевой основах. Нагреватели на никелехромовой основе, например сплав ЭИ626, обеспечивают максимальный нагрев до температуры 1200°C . Нагреватели на железохромоалюминиевой основе в зависимости от содержания хрома допускают нагрев до 1400°C . Иногда вместо металлических нагревателей, которые на воздухе довольно быстро окисляются и выходят из строя, применяют керамические нагреватели в виде силитовых или карборундовых стержней, работающих длительный срок при температуре 1300°C . В последнее время применяют стержни из дисилицида молибдена которые в воздушной атмосфере обеспечивают нагрев до 1700°C . При необходимости повысить температуру в печи нагреватели делают из таких тугоплавких материалов, как молибден, тантал, вольфрам и графит. Однако ввиду быстрой окисляемости они могут быть использованы только в печах с защитной или восстановительной атмосферой.

Печи с ручной подачей представляют собой камерные электрические печи, рабочее пространство которых в процессе

нагрева и охлаждения заполнено контролируемыми газовыми средами, находящимися под небольшим избыточным давлением. Схема такой печи представлена на рис. 109 [50]. Печь состоит из двух камер, заключенных в металлический кожух 1. Подготовленные к пайке детали подают в печь вручную, в протвинях, на поддонах, решетках и т. п., которые перед подачей в печь устанавливают на столик 10. Через входную дверцу 11 детали продвигают в камеру нагрева 8, обогреваемую нагревательными элементами 9. Для замера темпера-

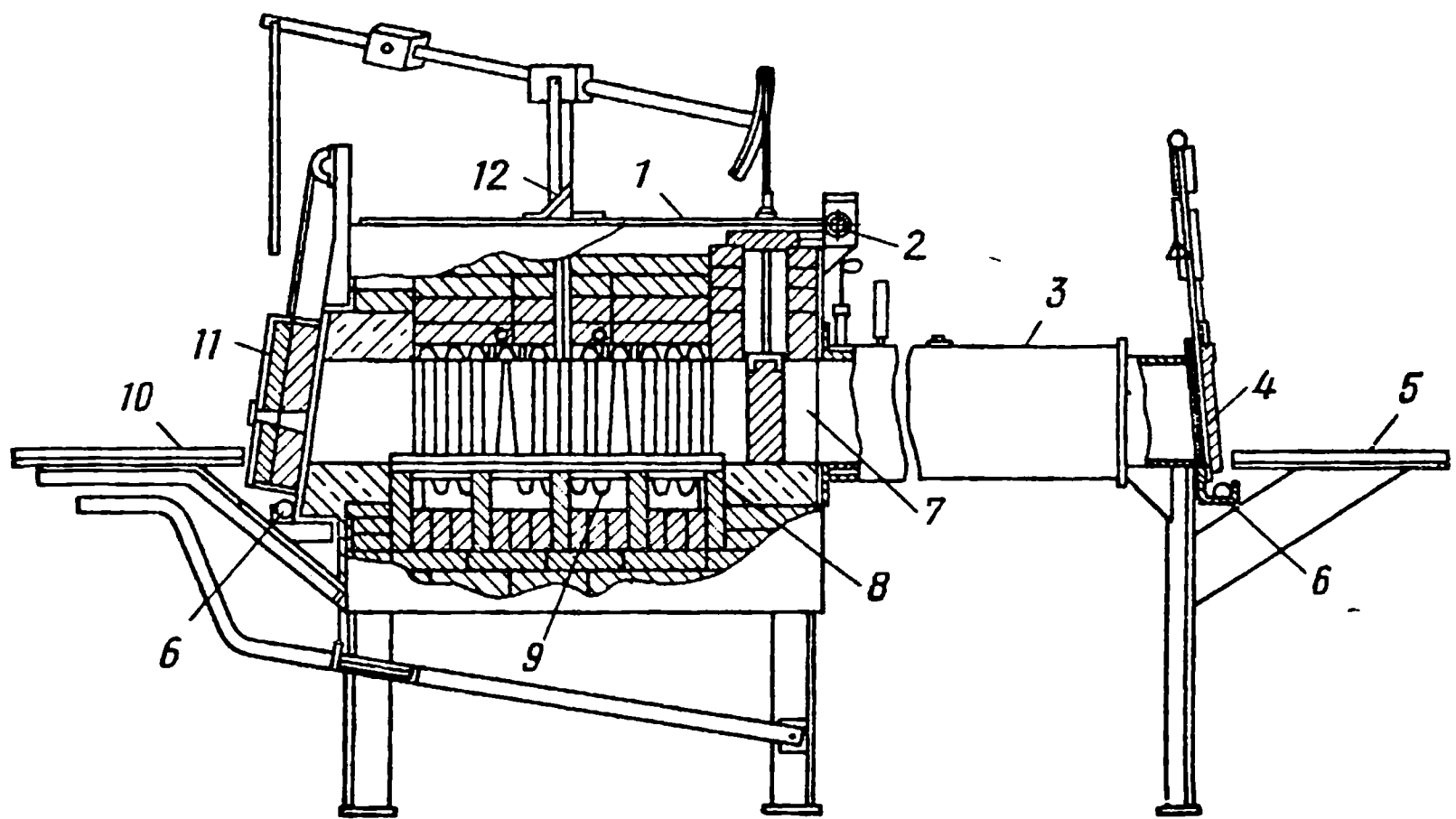


Рис. 109. Схема печи с ручной подачей

туры в камере нагрева установлена термопара 12. Камера нагрева отделена от камеры охлаждения 3 средними керамическими дверцами 7. При перемещении деталей из камеры нагрева в камеру охлаждения средние керамические дверцы на короткое время открывают. Для регулирования температуры охлаждающей воды, которая должна поддерживаться на уровне 80°C , установлен термостат 2. Детали из камеры охлаждения выгружают через заднюю дверцу 4 на разгрузочный столик 5. В момент открытия входной или задней дверцы происходит сгорание газовой атмосферы печи. Одновременно загорается газовый заслон 6, предохраняя проникновение в камеру нагрева атмосферного воздуха.

Конструкция печи исключает продувание печного пространства и, следовательно, охлаждение камеры нагрева, а также уменьшает расход контролируемой атмосферы.

Преимуществом печей с ручной подачей является возможность последовательно проводить пайку любых по размерам и конфигурации деталей, так как время выдержки можно назначать в широких пределах.

Печи с роликовым подом наиболее выгодны для пайки деталей больших размеров и массы. Под таких печей может быть выполнен в виде роликового конвейера. Ролики, на которые устанавливают паяемые детали, приводятся во вращение с одинако-

вой скоростью бесконечной цепью. Печи с роликовым подом обычно состоят из трех камер: подогрева, нагрева и охлаждения. Когда происходит загрузка деталей в камеры подогрева, в нее подается большое количество контролируемой атмосферы, которая при выходе из камеры сгорает и предупреждает попадание в нее воздуха. Перед открытием дверцы камеры нагрева отсек нагрева продувают контролируемой атмосферой. Когда дверца отсека нагрева открыта, скорость вращения роликов увеличивается и детали с большой скоростью перемещаются из камеры подогрева в камеру нагрева. Как только

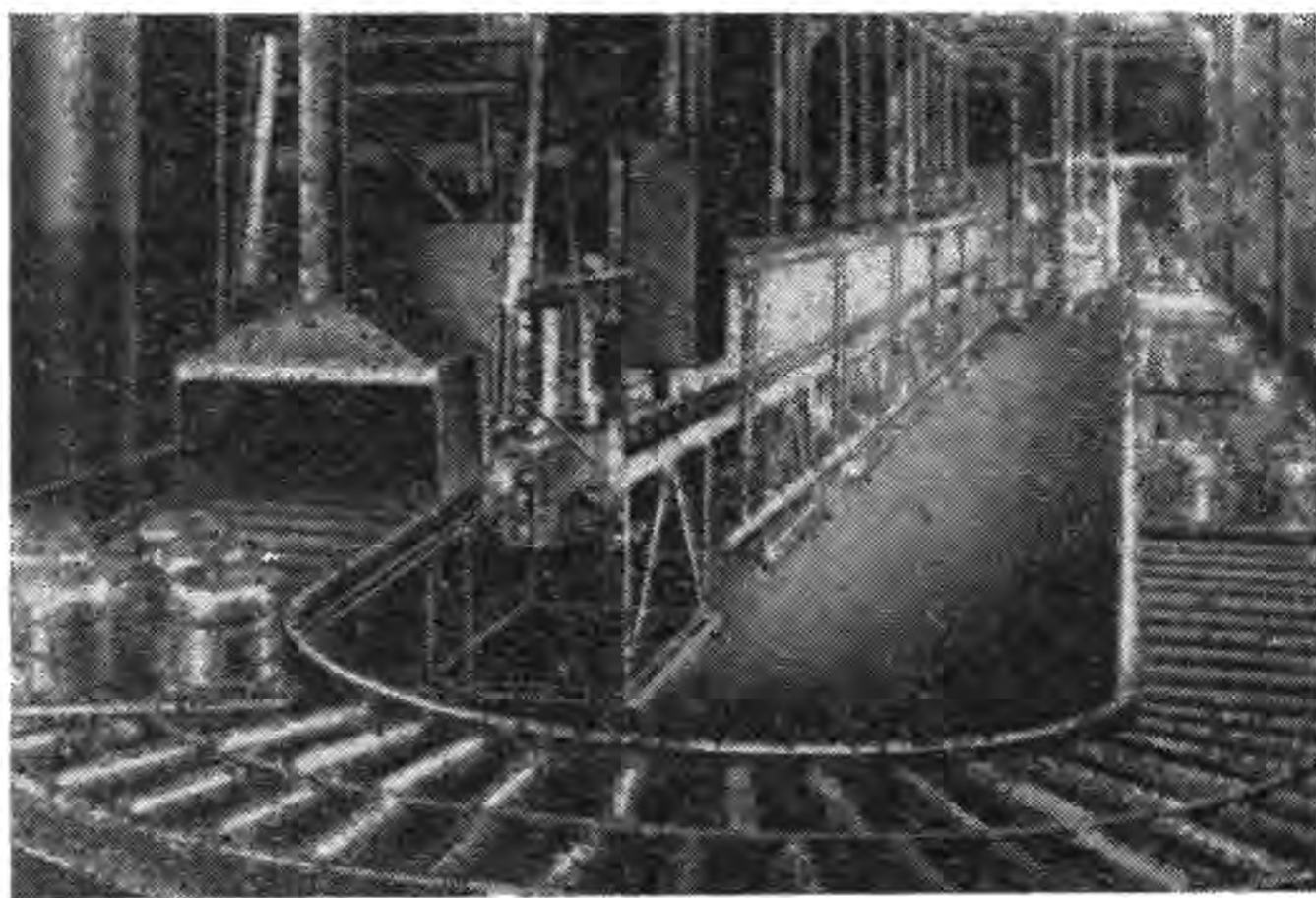


Рис. 110. Общий вид печи с роликовым конвейером

дверца закрывается, скорость вращения роликов, а следовательно, и движения деталей устанавливается нормальной.

Камеры нагрева и охлаждения отделены керамической дверцей, которая автоматически открывается при перемещении деталей в конец камеры нагрева. В момент открывания дверцы скорость вращения роликов вновь увеличивается. В камере охлаждения детали перемещаются с нормальной скоростью. Охлажденные детали поступают к внутренней дверце выходного отсека. Дверца открывается и детали поступают в выходной отсек, затем на разгрузочный столик. Входной и выходной отсеки роликовых печей предупреждают проникновение в камеры нагрева и охлаждения атмосферного воздуха при загрузке деталей, а также излишний расход контролируемой атмосферы.

Роликовые печи предназначены чаще всего для пайки стальных деталей медью, а также другими припоями с более низкой температурой плавления. Производительность роликовых печей выше, чем конвейерных, и составляет 100—500 кг/ч (рис. 110).

Печи с ленточным конвейером применяют в серийном или массовом производстве паяных деталей. Схема такой печи с восстановительной атмосферой приведена на рис. 111. Печь состоит из камеры предварительного нагрева (входа) 6, камеры пайки 7 и

камеры охлаждения в виде канала 8. Паяемые детали, подаваемые на подвесную ленту конвейера 5, последовательно проходят камеры подогрева, пайки и охлаждения. Лента конвейера сплетена из хромоникелевой проволоки состава: 80% Ni и 20% Cr. Восстановительная атмосфера готовится в специальном генераторе, в котором подводимый по трубопроводу 1 воздух и по трубопроводу 2 горючий газ смешиваются и сгорают в камере 3. Образовавшиеся продукты сгорания подвергаются двукратной осушке в осушителях 4 и подаются в пространство печи. Вход 6 и выход 9 печи постоянно открыты, так как конвейер непрерывно перемещается.

Восстановительный газ на входе и выходе печи перемешивается с атмосферным воздухом и сгорает. Пламя создает заслон, преду-

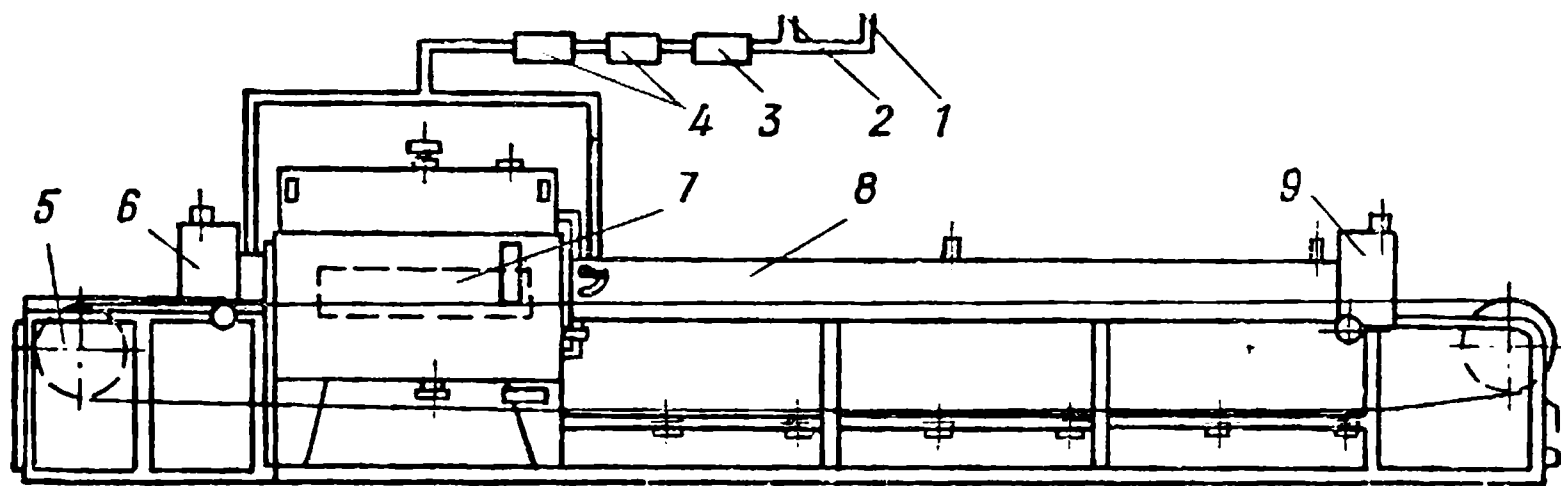


Рис. 111. Схема печи с ленточным конвейером

преждающий проникновение воздуха в пространство печи. Размер отверстий на входе и выходе печи регулируется при помощи подвижных устанавливаемых в соответствии с высотой деталей дверей печи. Для дополнительной защиты пространства печи от проникновения воздуха на входе и выходе иногда подвешивают подвижные заслоны из асбестовой ткани.

Устанавливаемые на конвейер детали подогреваются в камере предварительного нагрева. В камере нагрева температура деталей повышается до температуры пайки. После небольшой выдержки при этой температуре, достаточной для расплавления припоя и затекания его в соединительные зазоры, температура пространства печи начинает снижаться. Детали перемещаются в охлаждаемый водой канал, где постепенно снижается их температура. По выходе из охлаждающего канала температура нагрева деталей снижается настолько, что их можно брать руками. Скорость конвейера устанавливается в зависимости от условий нагрева деталей и скорости охлаждения после пайки. За время продвижения в камере нагрева паяемое соединение должно равномерно прогреваться до температуры пайки. После охлаждения температура деталей должна быть такой, чтобы избежать появления на их поверхности цветов побежалости.

На рис. 112 приведен график цикла нагрева при пайке стальных деталей медью в восстановительной атмосфере в печи с ленточным конвейером. Как можно видеть из графика, при достижении температуры пайки дается небольшая выдержка, после чего детали перемещаются по каналу, охлаждаемому водой. Общее время нахождения

деталей в печи при температуре 200°C составляет более 5 мин. Пунктиром на графике показано изменение температуры детали при более высокой скорости движения конвейера.

Конвейерные печи имеют производительность 50—300 кг/ч. Производительность печи зависит от нагрузки, выдерживаемой лентой конвейера, которая для наиболее массивных лент доходит до 30 кг/м^2 . Эта нагрузка при увеличении длины камеры нагрева печи снижается.

Конвейерные печи с горизонтальным расположением пода применяют для пайки деталей из углеродистых сталей. Для пайки деталей из нержавеющей сталей применяют печи с наклонным входом и выходом из печи. Наклонный вход и выход по сравнению с горизон-

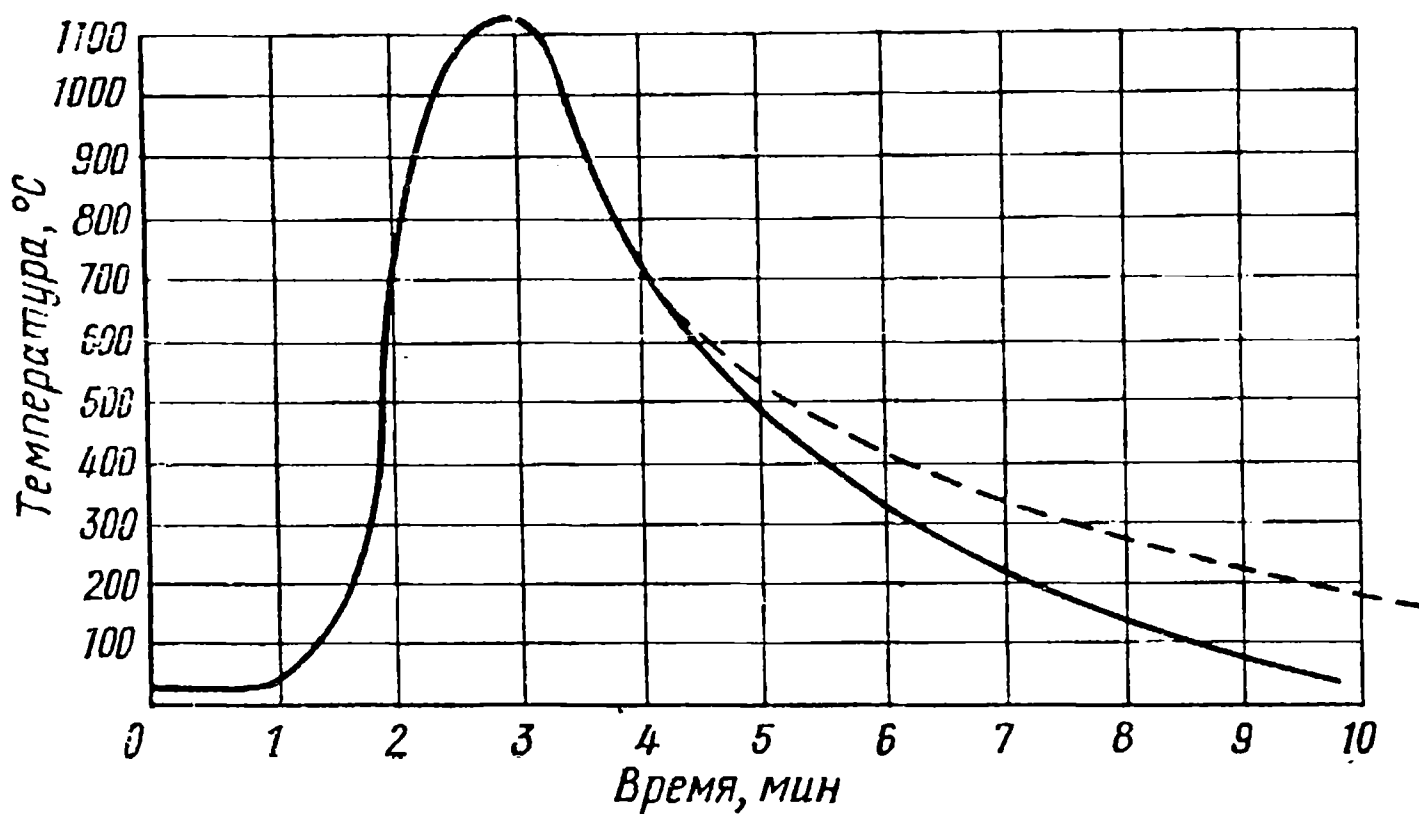


Рис. 112. График цикла нагрева и охлаждения при пайке в печи с восстановительной атмосферой

тальным позволяет уменьшить расход контролируемой атмосферы и исключить возможность загрязнения атмосферы в камерах нагрева и охлаждения. Применяемая при этом контролируемая атмосфера водорода или диссоциированного аммиака осушается (точка росы от -50 до -60°C). На входе и выходе из печи газ также сгорает, образуя пламя, защищающее печное пространство.

Шахтные, колпаковые и элеваторные печи применяют для пайки деталей больших размеров в контролируемой атмосфере. Производительность шахтных печей низкая. Их применяют для индивидуальной или мелкогрупповой пайки стальных деталей. В колпаковых печах, также предназначенных для индивидуальной пайки деталей, стенки со сводом печи представляют собой съемный колпак, имеющий в сечении, перпендикулярном вертикальной оси печи, круглую, квадратную или прямоугольную форму. Паяемую деталь собирают и устанавливают непосредственно на поду печи при снятом колпаке. После сборки паяемой детали устанавливают колпак печи и уплотняют его. Печь заполняют контролируемой атмосферой под небольшим избыточным давлением и нагревают. После пайки и охлаждения колпак поднимают и паяные детали снимают с пода печи.

Такие печи позволяют хорошо герметизировать печное пространство и поэтому наиболее пригодны для пайки деталей, требующих сухой контролируемой атмосферы. Их применяют для пайки деталей сложной формы из легированных сталей. Обслуживание таких печей связано с некоторыми трудностями в связи с герметизацией печного пространства и большим расходом воды для охлаждения.

В элеваторных печах в отличие от колпаковых верхняя часть печи подвешена неподвижно, а под печи может подниматься и опускаться вручную или механическими средствами. Иногда под печи делают в виде тележки. В элеваторных печах также производится индивидуальная пайка крупногабаритных деталей.

После установки детали на под печи его поднимают, печь герметизируют, продувают контролируемой атмосферой и нагревают. После соответствующей выдержки ток отключают и деталь охлаждают вместе с печью.

Для элеваторных печей требуется меньшая, чем для колпаковых, высота цеха. Элеваторные печи применяют главным образом для пайки деталей из нержавеющей сталей. Недостатком их является большая продолжительность цикла пайки, если требуется высокая чистота поверхности деталей.

Оборудование для пайки в вакууме. При пайке в вакууме паяемые детали либо помещают в контейнеры, в которых создается необходимый вакуум, либо вакуумируют пространство печи, в котором производится пайка. Пространство контейнера или

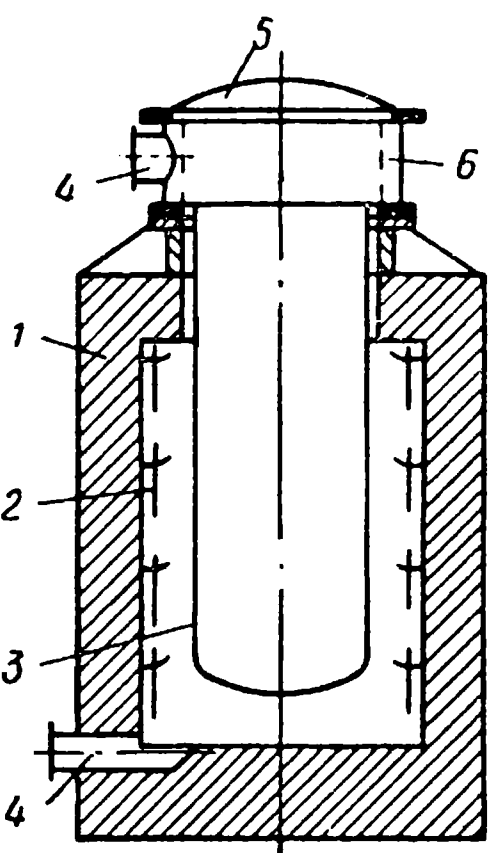


Рис. 113. Схема вакуумной печи

печи необходимо вакуумировать в течение всего цикла пайки. Пайка в контейнерах может осуществляться в обычных печах и соляных ваннах. Применение контейнеров позволяет вести быстрое охлаждение деталей после пайки. Однако контейнеры после вакуумирования подвергаются сжатию под давлением воздуха, поэтому применение их ограничивается температурой нагрева, которая обычно не превышает 900°C . Печи с вакуумированным рабочим пространством имеют специальную конструкцию. Схема вакуумной печи представлена на рис. 113.

В вакуумплотном корпусе печи 1 с нагревателем 2 установлен вакуумплотный контейнер 3, герметично закрывающийся крышкой 5. Вакуумирование производится через патрубки 4. Выступающая часть контейнера 6 охлаждается водой. В вакуумплотном контейнере создают высокий вакуум, а в пространстве печи, в котором установлены нагревательные элементы для предупреждения сдавливания контейнера, иногда создают низкий вакуум. Поэтому стенки контейнера под действием давления окружающей его атмосферы не деформируются даже при нагреве до высоких температур. Температура пайки в этом случае ограничена только пределом ползучести вакуумного контейнера под действием собственной массы, так как детали

в контейнере находятся в подвешенном состоянии. Наибольшие затруднения вызывает вакуумирование пространства печи, так как футеровка выделяет содержащиеся в ней газы. Вакуумная печь с нагревателями в корпусе печи работает периодически, поэтому цикл пайки очень длительный, обычно несколько часов. Если вакуумный контейнер изготовлен из жаропрочных сталей или сплавов, то он может нагреваться в любой печи.

В вакуумных печах без контейнера огнеупорная футеровка недопустима, так как при вакуумировании из кладки выделяются газы, которые реагируют с поверхностью паяемых деталей, окисляя их. Поэтому в вакуумных печах вместо огнеупорной теплоизоляции обычно устанавливают теплоотражательные экраны из металлических листов с гладкой поверхностью. Для повышения скорости охлаждения такой печи в конце пайки вакуумированное пространство иногда заполняют контролируемой атмосферой, которая повышает теплопроводность в объеме печи, что ускоряет снижение температуры.

Преимуществом высоковакуумных печей является отсутствие окисления даже наиболее активных к кислороду компонентов основного металла и припоя. Паяные швы, полученные при пайке в высоком вакууме, отличаются плотностью, прочностью, и коррозионной стойкостью. Недостатком пайки в вакууме является сложность, высокая стоимость оборудования и низкая производительность процесса. При пайке в вакуумных печах нельзя применять припои, содержащие такие легкоиспаряющиеся элементы, как цинк, марганец, кадмий, фосфор, литий, а также использовать конструкционные материалы, содержащие эти элементы.

Для создания вакуума в печи или контейнере применяют вакуумные насосы. Для получения остаточных давлений 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. применяют механические ротационные насосы. В установках для создания высокого вакуума порядка 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. применяют диффузионные насосы. Механический ротационный насос в этом случае служит для создания предварительного вакуума (форвакуума) и для откачивания газа, выталкиваемого из диффузионного насоса.

В установку для создания высокого вакуума (рис. 114) входят: ротационный (форвакуумный) насос 1, сильфонный компенсатор 2, предотвращающий распространение вибраций от насоса, фильтр 3 для очистки откачиваемого воздуха от механических примесей, вакуумный клапан 4, разобщающий насос с контейнером или печью, диффузионный насос 5. Вакуумный затвор 7 диффузионного насоса с заслонкой 6 вакуумного затвора служат для отсоединения диффузионного насоса от системы. Нагрев диффузионного насоса осуществляется нагревателем 8. Клапан 9 служит для впуска в печь или контейнер воздуха или инертного газа. Характеристики механических ротационных вакуумных насосов приведены в табл. 42.

Диффузионный насос в комплекте с затвором составляет вакуумный агрегат. Основные характеристики высоковакуумных агрегатов приведены в табл. 43.

Предельный вакуум, создаваемый высоковакуумными агрегатами указанного типа, составляет $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

Механические ротационные насосы ВН-461М, РВН-20, ВН-2Г и вакуумные агрегаты ВА-01-1 и ВА-05-1 применяют в лабораториях

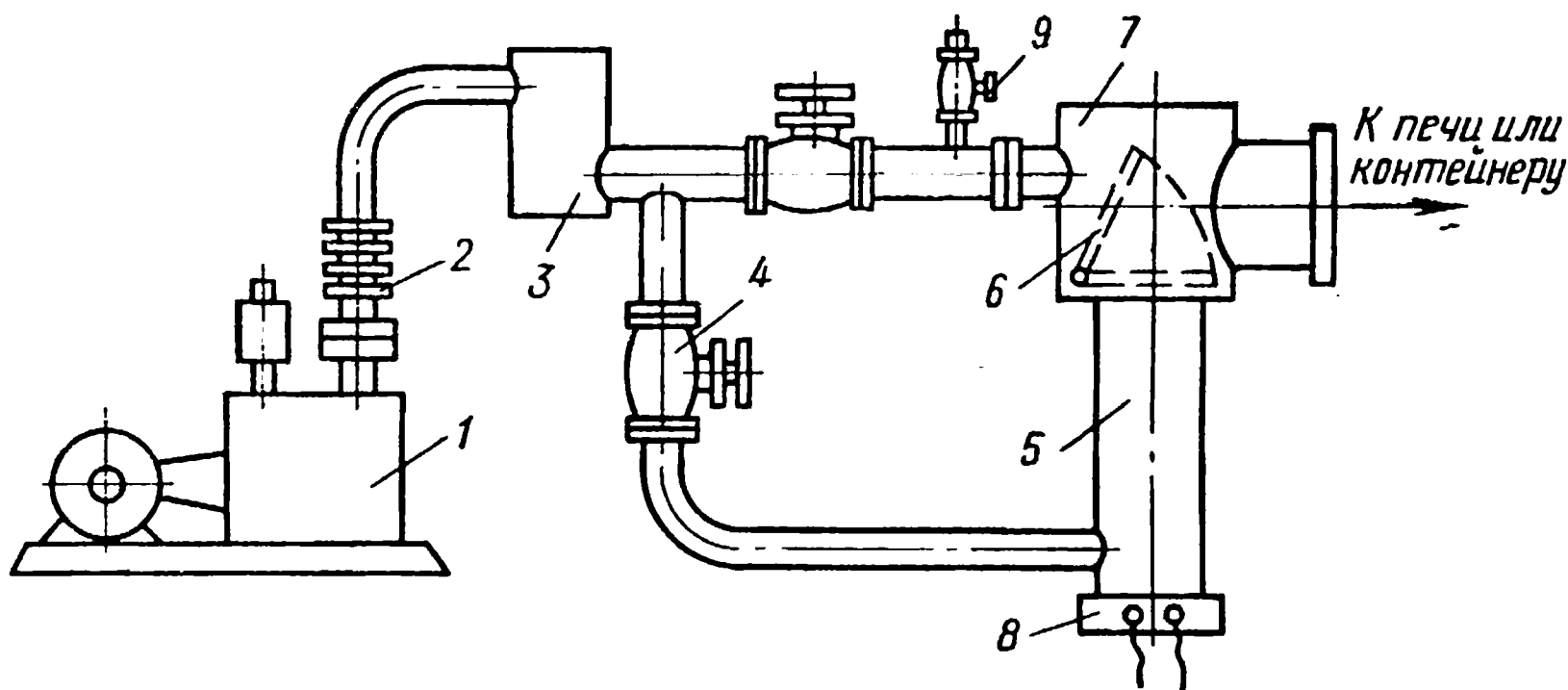


Рис. 114. Схема установки для создания высокого вакуума

и в небольших производственных установках; насос ВН-1МГ и вакуумные агрегаты ВА-5-4 и ВА-8-4 — в крупных лабораториях и в среднего размера производственных установках.

Т а б л и ц а 42

Марка насоса	Средняя скорость откачки при давлении 760 мм рт. ст.	Предельный вакуум мм рт. ст	Мощность двигателя, квт	Масса, кг
ВН-461М	0,81	$1 \cdot 10^{-3}$	0,6	75
РВН-20	3,3	$5 \cdot 10^{-3}$	0,6	75
ВН-2Г	7,0	$3 \cdot 10^{-3}$	1,7	108
ВН-1МГ	18,3	$3 \cdot 10^{-3}$	2,8	312
ВН-4Г	59,0	$5 \cdot 10^{-3}$	7,0	590
ВН-6Г	155,0	$1 \cdot 10^{-2}$	18,0	1521

Т а б л и ц а 43

Тип агрегата	Средняя скорость откачки при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., л/сек	Масса, кг	Расход охлаждающей воды л/ч	Рекомендуемый насос предварительного разрежения
ВА-01-1	50	43	50	ВН-461М, РВН-20
ВА-05-1	250	85	120	ВН-2Г
ВА-5-4	2200	330	400	ВН-1МГ
ВА-8-4	4000	476	500	ВН-1МГ

Для измерения вакуума до 1 мм рт. ст. применяют пружинные манометры. При вакууме до 10^{-3} мм рт. ст. используют ионизационные манометры с холодным катодом, термопарные манометры с биметаллической сеткой и др. Для измерения более глубокого вакуума применяют ионизационные манометры с горячим катодом, компрессионные и радиометрические манометры.

К о н т е й н е р ы. Применяемые при пайке в вакууме и в контролируемых газовых средах контейнеры разделяют на жесткие и мягкие. Жесткие контейнеры изготовляют обычно с помощью сварки из толстостенных труб жаропрочных сталей или сплавов. Мягкие кон-

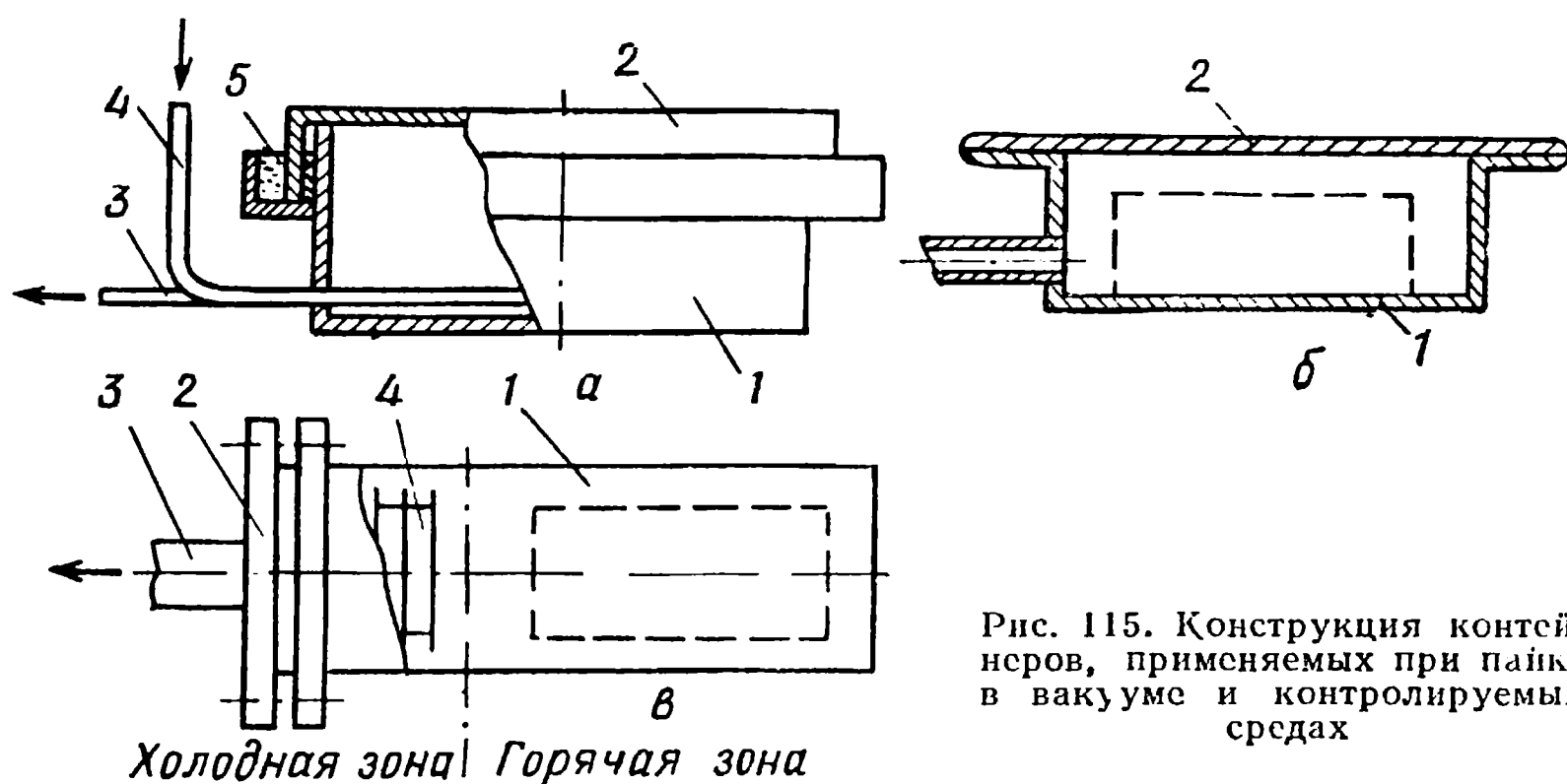


Рис. 115. Конструкция контейнеров, применяемых при пайке в вакууме и контролируемых средах

тейнеры сваривают из тонколистового материала. Под атмосферным давлением в процессе вакуумной пайки они сдавливаются, плотно облегают паяемые детали, сжимая их, что способствует уменьшению соединительных зазоров и повышению качества пайки.

Если перед пайкой жесткие контейнеры заполняют контролируемой атмосферой, то их рассчитывают на внешнее давление в условиях комнатной температуры. Если заполнение газовой средой не производится, то его рассчитывают на температуру пайки. В процессе пайки контейнеры жесткой конструкции загружают в печь только той частью, в которой помещены паяемые детали.

Схема контейнеров жесткой конструкции приведена на рис. 115. Контейнер (рис. 115, а), герметизированный засыпкой 5, состоит из собственно контейнера 1, крышки 2 и трубопроводов 3 для соединения с газовой системой. В жестком контейнере, изображенном на рис. 115, б, после загрузки деталей крышку приваривают герметичным швом к фланцу контейнера. На рис. 115, в изображен жесткий контейнер 1 с водоохлаждаемой крышкой 2 и уплотнением из вакуумной резины. Патрубок 3 предназначен для соединения с вакуумной системой. Для уменьшения нагрева уплотнения в контейнере установлены теплоизоляционные экраны 4. Жесткие контейнеры применяют для пайки деталей сложной конфигурации.

Для пайки плоских изделий, таких, например, как сотовые панели и теплообменники, применяют мягкие контейнеры, которые обычно

представляют собой сваренные по кромкам листы тонкой стали, к которым герметичным швом приварены два штуцера для подвода и отвода газовой среды. При пайке в вакууме второй штуцер можно использовать для установки термодпары. Иногда листы, применяемые для изготовления мягких контейнеров, предварительно выштамповывают. Контейнеры изготавливают из низкоуглеродистых сталей 10 и 20 или нержавеющей сталей X18H9T и ЭИ811.

Установки для приготовления контролируемых атмосфер. Для защиты основного металла и припоя от окисления и создания условий для удаления окисной

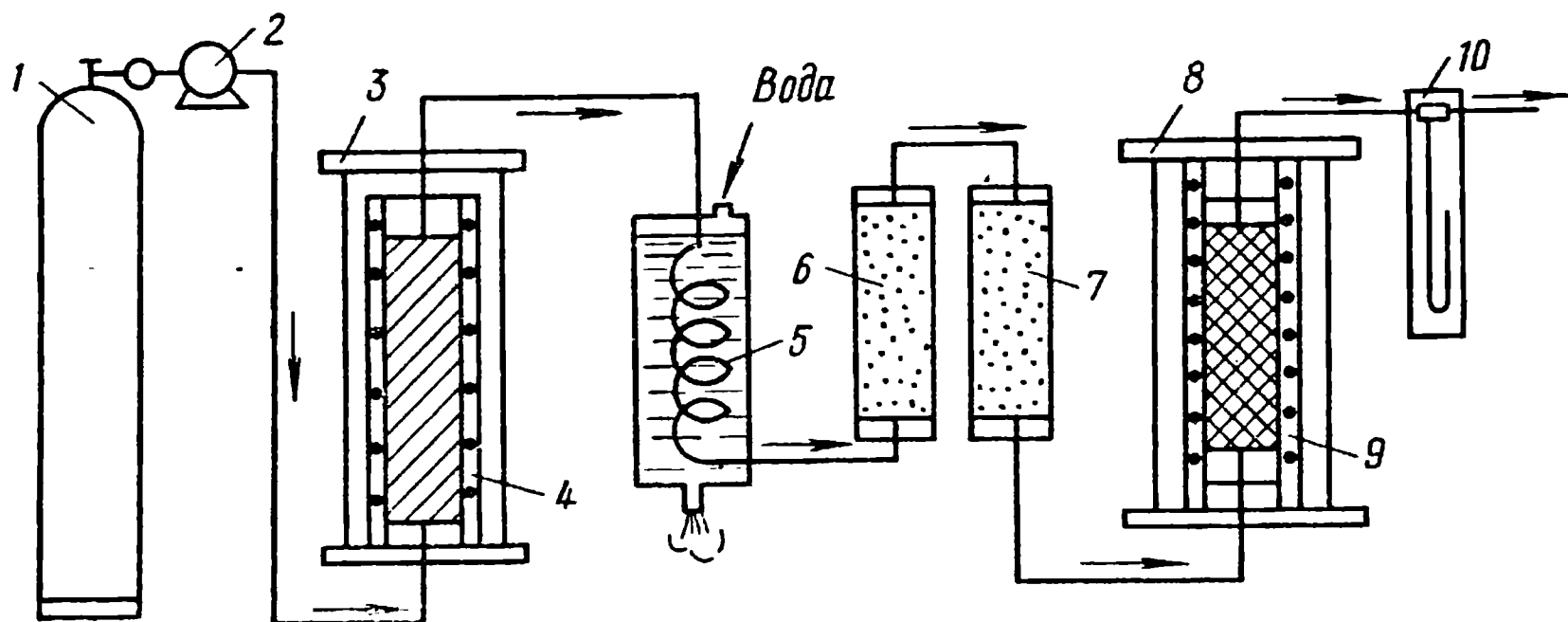


Рис. 116. Схема получения диссоциированного аммиака

пленки с их поверхности при пайке в печах чаще всего применяют восстановительные или защитные газовые атмосферы различного состава. Они могут быть однородными газами или газовыми смесями. Водород, азот, инертные газы поставляют, как правило, в баллонах, и при употреблении их подвергают тонкой очистке от примесей и осушке от паров воды.

При применении контролируемых атмосфер сложного состава используют специальные установки для получения и очистки газовых сред. На рис. 116 представлена схема приготовления контролируемой атмосферы из аммиака [37]. Основным агрегатом установки является диссоциатор 3, внутри которого помещена реторта с катализатором в виде железной стружки. Диссоциатор обогревается нагревателем 4. Жидкий аммиак из баллона 1 подается в испаритель 2 высокого давления, откуда газообразный аммиак по трубопроводу поступает в диссоциатор, где расщепляется на водород и азот. Смесь этих газов, проходя через змеевик 5, охлаждается. После этого смесь газов направляется в сосуды с силикагелем 6 и алюмогелем 7, где происходит его осушка. После осушки газ проходит через медную стружку * очистителя 8, подогретую нагревателями 9 до температуры 400—500° С и поглощающую находящийся в газе кислород. Очищен-

* Для очистки восстановительных газов от кислорода более эффективен каталитический способ.

ная таким способом смесь газов через ротаметр 10 направляется в печь для пайки. Она имеет точку росы до -60°C .

Такая схема очистки применяется для всех газов. Если необходима более тонкая очистка от кислорода и паров воды, после реторты 8 устанавливают реторту с платиновым или дунитовым катализатором, способствующим соединению остатков кислорода с водородом. Пары воды, образовавшиеся в результате этой реакции, удаляются путем трехступенчатой осушки силикагелем, алюмогелем и окисью бария. Иногда вместо окиси бария применяют фосфорный ангидрид, смешанный со стеклянной ватой.

Схема приготовления контролируемой атмосферы путем частичного сжигания диссоциированного аммиака аналогична. Она отли-

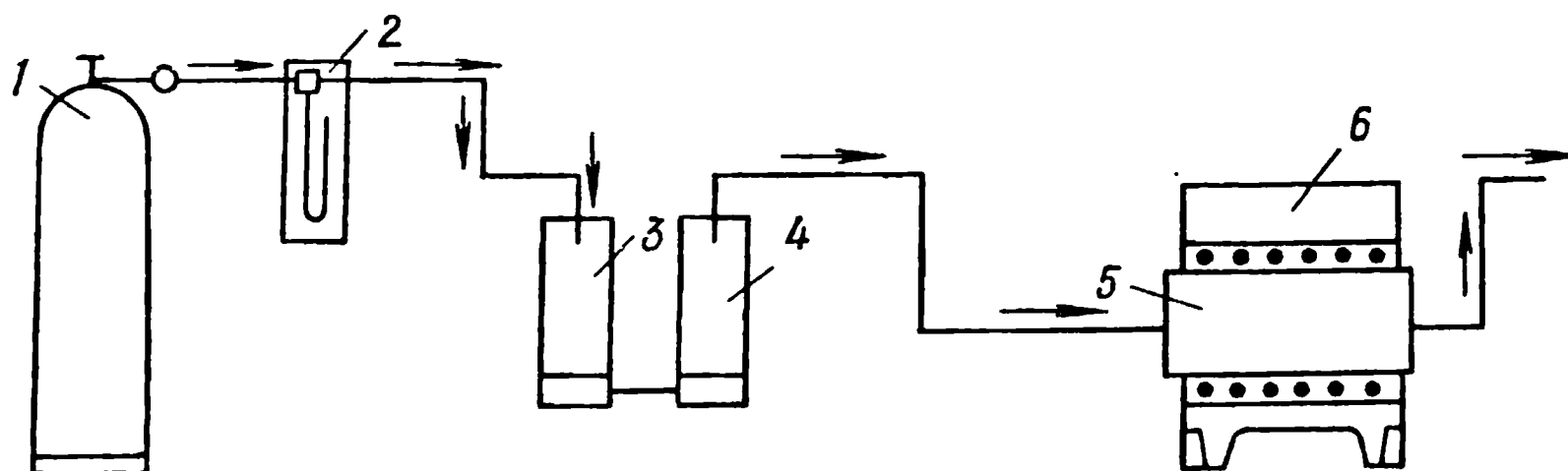


Рис. 117. Схема очистки аргона и гелия от кислорода, азота и влаги

чается от рассмотренной схемы тем, что между диссоциатором 3 и холодильником 5 имеется камера сжигания. В этом случае, чтобы охладить продукты сгорания, холодильник должен быть более производительным.

При приготовлении контролируемых атмосфер путем частичного сжигания углеводородных газов применяют установки, в которых горючий газ сжигается в смеси с дозированным количеством воздуха. После этого продукты сгорания охлаждают, очищают от углекислого газа, подвергают осушке и направляют в печь.

Инертные газы, применяемые при пайке, также очищают. Схема установки для очистки аргона и гелия от кислорода, азота и влаги представлена на рис. 117. Инертный газ из баллона 1 через ротаметр 2 проходит через сосуды с силикогелем 3 и алюмогелем 4, после чего осушенный газ пропускают через реторту 5 с титановой губкой или циркониевой стружкой, нагреваемой в печи 6 до температуры $850-920^{\circ}\text{C}$. После такой очистки аргон и гелий могут иметь точку росы до -75°C .

При пайке в восстановительных и защитных газовых средах качество паяных соединений в основном зависит от чистоты газовой атмосферы, поэтому при разработке технологии пайки особое внимание необходимо обращать на очистку газов.

§ 2. Оборудование для индукционной пайки

При пайке с индукционным нагревом в комплекс применяемого оборудования входит источник питания, индуктор и вспомогательные приспособления, необходимые для установки или закрепления паяемых деталей. В качестве источников питания применяют машинные и ламповые генераторы. При применении высокочастотного нагрева различают повышенные частоты (500—10 000 гц) и высокие (выше 50 000 гц). Частоты в интервале 10 000—50 000 гц в практике используют редко.

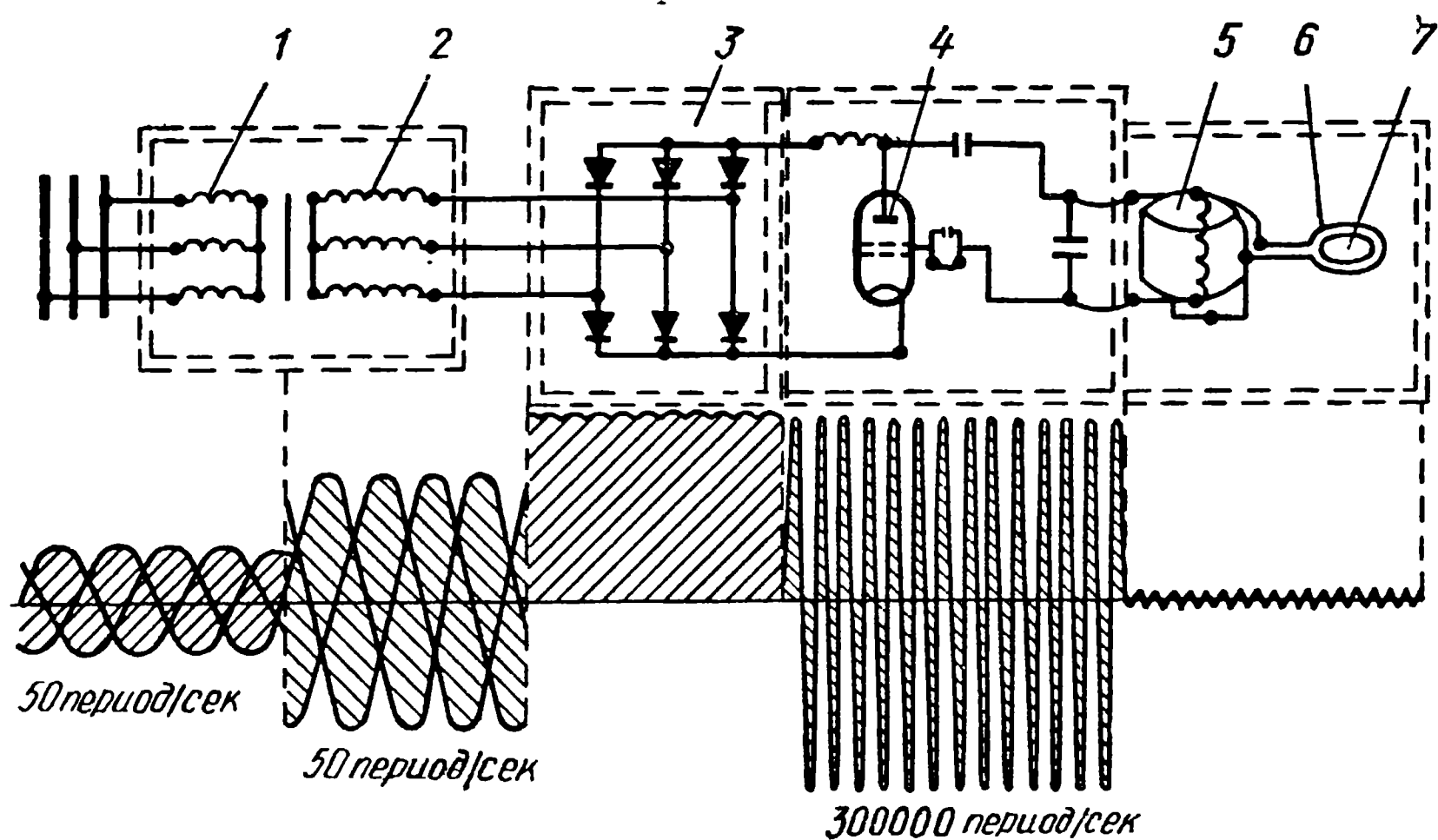


Рис. 118. Схема преобразования тока и нагрева при питании от лампового генератора

Ламповые генераторы преобразуют электрический ток стандартной частоты (50 гц) в ток высокой частоты. Для пайки применяют токи частотой 150—600 кгц. Принципиальная схема работы лампового генератора приведена на рис. 118.

Первичная обмотка 1 трансформатора питается переменным током стандартной частоты напряжением 220 или 380 в. Во вторичной обмотке 2 трансформатора напряжение тока повышается до 8000 в. После этого переменный ток проходит через газотронный выпрямитель 3 и преобразуется в постоянный ток высокого напряжения, который подается на анод 4 генераторной лампы, дающей ток высокой частоты. Однако этот ток имеет высокое напряжение и не пригоден для питания индуктора. Поэтому он подвергается преобразованию в высокочастотном трансформаторе 5, во вторичной обмотке которого напряжение понижается до 1000 в. После этого ток поступает в индуктор 6, в котором производится нагрев деталей.

Некоторые характеристики высокочастотных установок с ламповым генератором приведены в табл. 44.

Машинные генераторы дают ток частотой 2—15 кгц; они состоят из электродвигателя трехфазного тока и соединенного с ним генера-

Характеристика	ЛГЗ-10А	ЛПЗ-37, ЛП-37, ЛЗ-37	ЛПЗ-67, ЛП-67, ЛЗ-67	ЛЗ-107	ЛЗ-207
Номинальная колеба- тельная мощность, <i>квт</i>	8	30	60	100	200
Рабочая частота, <i>кГц</i>	300—450	60—74	60—74	60—74	60—74
Напряжение питающей сети трехфазного тока, <i>в</i>	220/380	380/220	380/220	380/220	380/220
Габаритные размеры, <i>мм</i>	1130× ×1100	ЛПЗ-4020×3500 ЛП-4020×2700 ЛЗ-4020×2200		4120×2200	4620×2800
Высота, <i>мм</i>	2120	2250	2250	2250	2250

тора, дающего ток повышенной частоты. Характеристики машинных генераторов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 45.

Т а б л и ц а 45

Характеристика	ПВ-50/2500	ПВС-100/2500-1	ПВ-100/8000-1V	ВГО-500/2500
Генератор				
Мощность, <i>квт</i>	50	100	100	500
Напряжение, <i>в</i>	750/375	750/375	750/375	1000/500
Сила тока, <i>а</i>	74/148	148/296	148/296	500/1000
Частота, <i>Гц</i> при номинальной скорости вра- щения	2650	2650	—	—
при синхронной скорости вра- щения	—	—	8000	2500
Двигатель				
Мощность, <i>квт</i>	60	125	130	700
Напряжение, <i>в</i>	220/380	220/380	220/380	3000/6000
Частота, <i>Гц</i>	50	50	50	50
Масса установки, <i>кг</i>	2100	3000	4000	7230

Схема преобразования тока и нагрева с применением машинного генератора приведена на рис. 119. Контактор подключает электродвигатель 1 к питающей трехфазной сети стандартной частоты. Ротор генератора 2 токов повышенной частоты приводится во вращение электродвигателем 1. Через второй контактор включается электродвигатель 3 возбуждителя 4. Регулирование возбуждения произво-

дится реостатом 5. Колебательный контур подключен к генератору 2 и состоит из конденсаторной батареи 6, соединенной параллельно с первичной обмоткой трансформатора токов повышенной частоты 7. Вторичная обмотка 8 этого трансформатора, понижающего напряжение до величины, обычно не превышающей нескольких десятков вольт, соединена с индуктором 9, внутри которого помещена паяемая деталь 10.

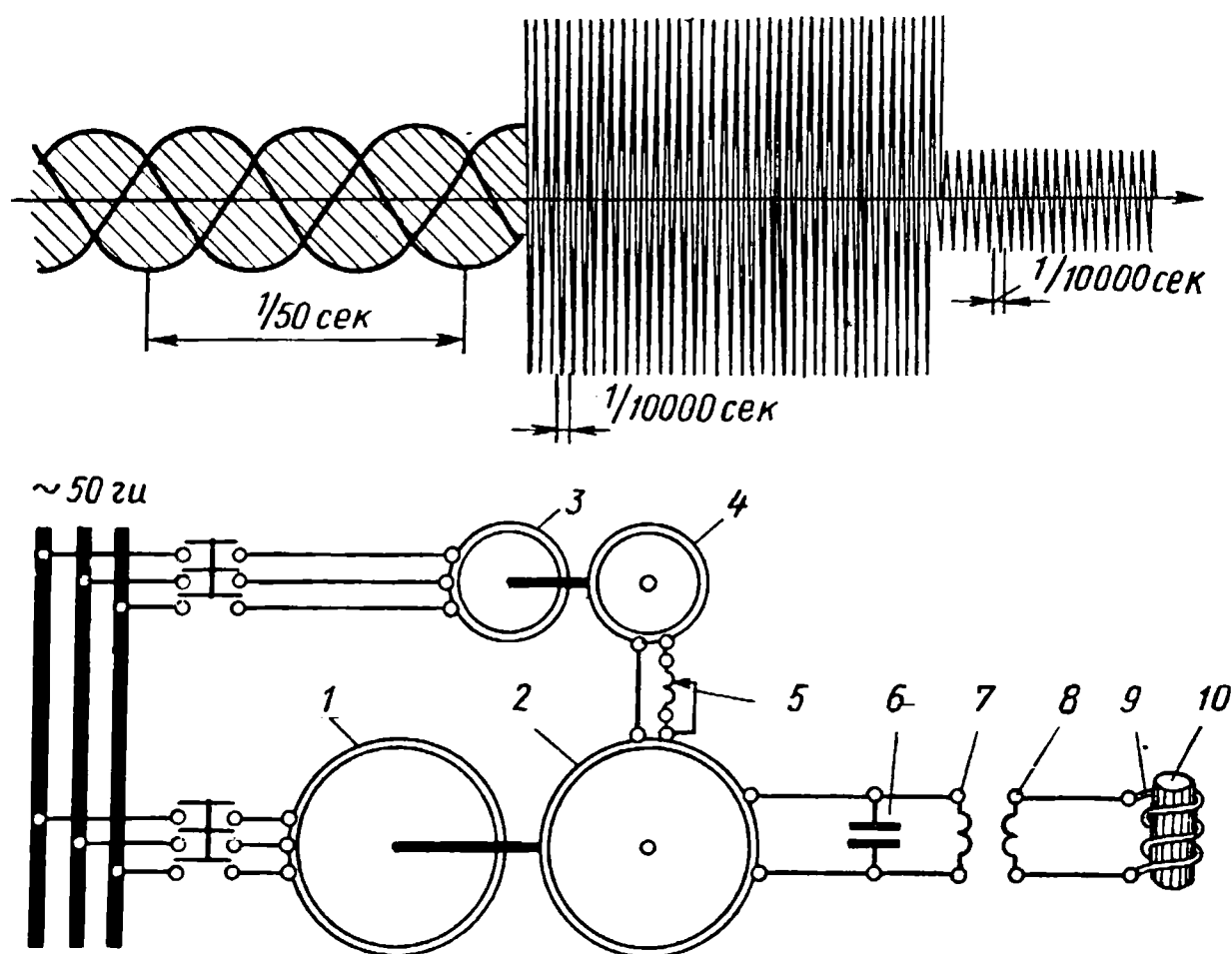


Рис. 119. Схема преобразования тока и нагрева при питании от машинного генератора

При понижении частоты тока глубина прогрева увеличивается, поэтому для более массивных паяемых деталей применяют генераторы частотой 2500 гц. Для пайки тонкостенных деталей используют генераторы с частотой 8000 гц. Преимуществом машинных генераторов является простота в обслуживании и высокий к. п. д., равный 0,7—0,8, а также и то, что они при работе не создают радиопомех в отличие от ламповых генераторов, не имеющих экранировки.

Основные элементы высокочастотных установок при питании от ламповых и машинных генераторов приведены на рис. 120. При питании от лампового генератора (рис. 120, а) ток высокой частоты от генератора через конденсаторную батарею 3 и воздушный понижающий трансформатор 2 подается на индуктор 1. При питании от машинного генератора 4 (рис. 120, б) ток через конденсаторную батарею 3 и понижающий трансформатор 2 также подается на индуктор 1. Индукторы служат для передачи электрической энергии с помощью пронизывающего паяемую деталь переменного электромагнитного

поля. Под влиянием этого поля в металле возникают электрические токи, которые и нагревают его. Индуктор изготавливают из медной трубки, через которую для охлаждения пропускают воду. Применение для индукторов трубок прямоугольного сечения дает увеличение к. п. д., так как при этом вся внутренняя поверхность индуктора, обращенная к нагреваемой детали, расположена ближе к ней, что

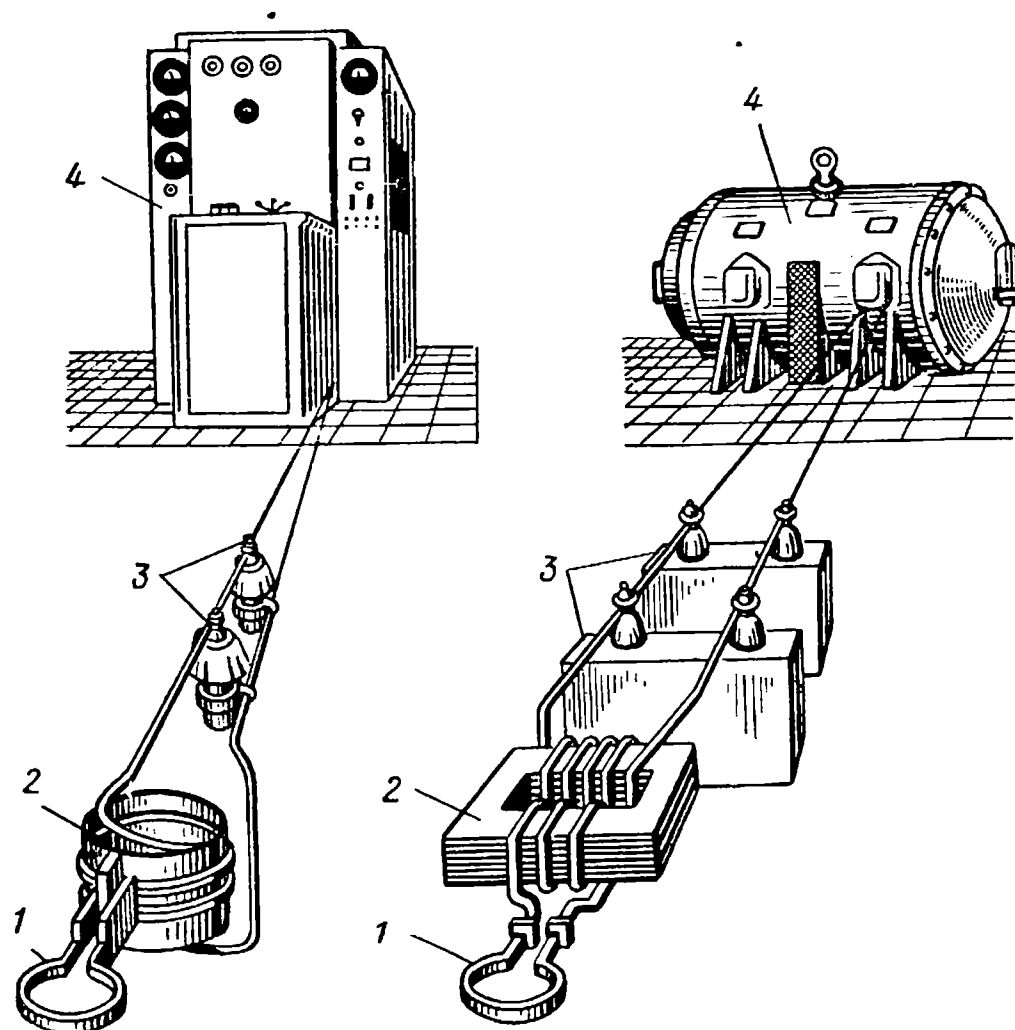


Рис. 120. Основные элементы высокочастотных установок с питанием от лампового (а) и машинного (б) генераторов

уменьшает сопротивление. В зависимости от площади нагреваемого участка паяемой детали и требуемого распределения магнитного поля индукторы изготавливают одновитковыми и многовитковыми, при этом конфигурация их может быть самой различной. Наиболее употребительные типы индукторов, применяемых при пайке, приведены на рис. 121. Индукторы группы А предназначены для внешнего нагрева паяемой детали. Они могут быть как одновитковыми (а), так и многовитковыми разной формы (б, в, г, д, е). Индукторы группы В предназначены для внутреннего нагрева паяемых деталей (а, б, в, г) и для нагрева плоских поверхностей (д, е) [51].

Существующие методы расчета индукторов весьма приближенны, поэтому при конструировании наряду с расчетами используют накопленный практический опыт их применения.

При пайке в индукторе продолжительность нагрева определяется по плавлению припоя и образованию галтелей. Для равномерности

нагрева при пайке тонкостенных элементов с толстостенными или при использовании генератора большей, чем это требуется, мощности в процессе нагрева периодически выключают и включают ток, температура паяемой детали при этом выравнивается за счет ее теплопроводности.

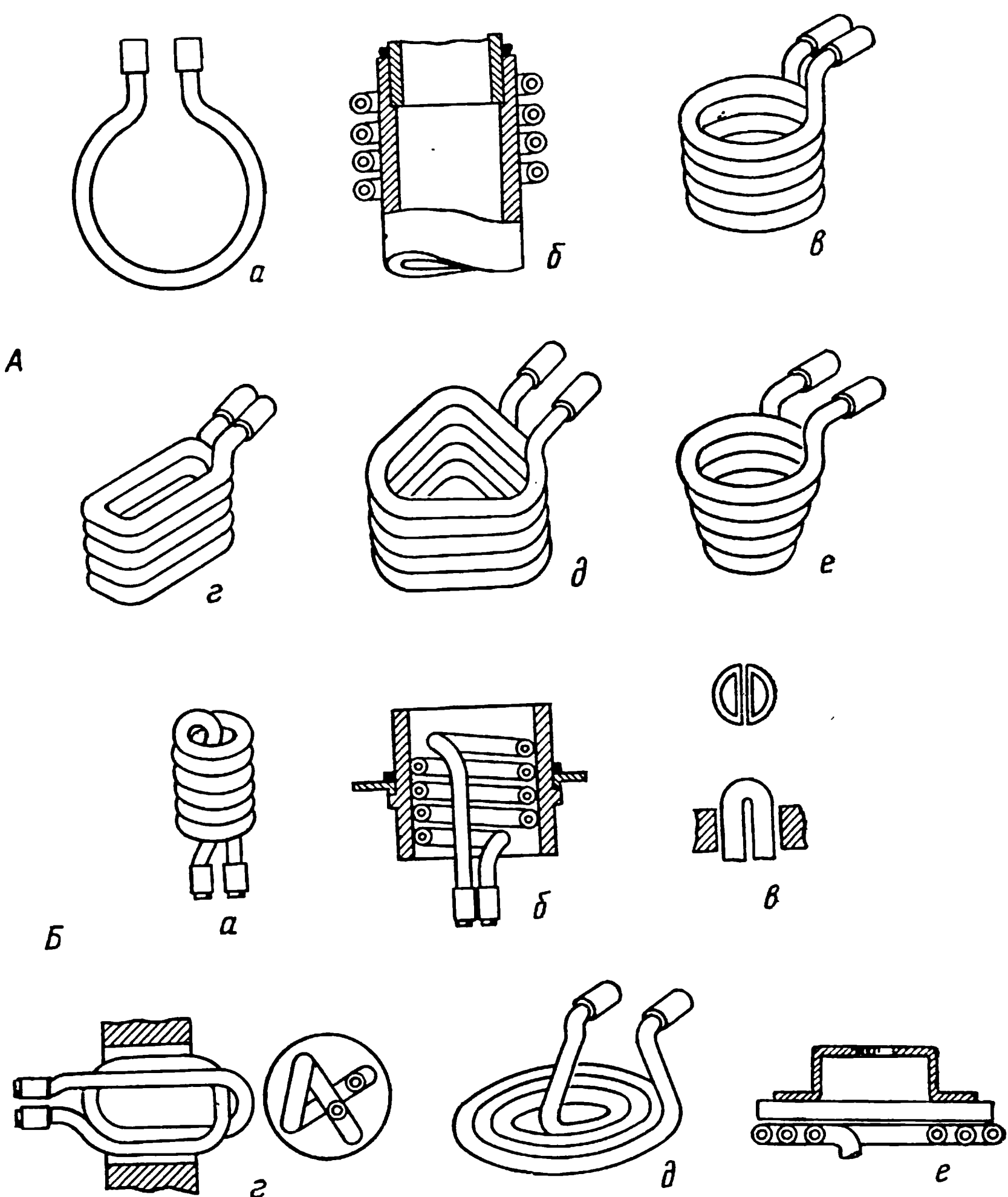


Рис. 121. Типы индукторов, применяемых при пайке

Определяющим фактором при выборе индукционной установки наряду с мощностью является частота тока. Переменный ток высокой частоты, как и всякий переменный ток, протекая по проводнику, сосредоточивается главным образом в поверхностном слое. При пайке стального изделия 85% индуктируемого тока сосредоточивается

на глубине δ от поверхности, определяемой из соотношения

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

где ρ — удельное электросопротивление нагреваемого материала;
 μ — магнитная проницаемость;
 f — частота тока.

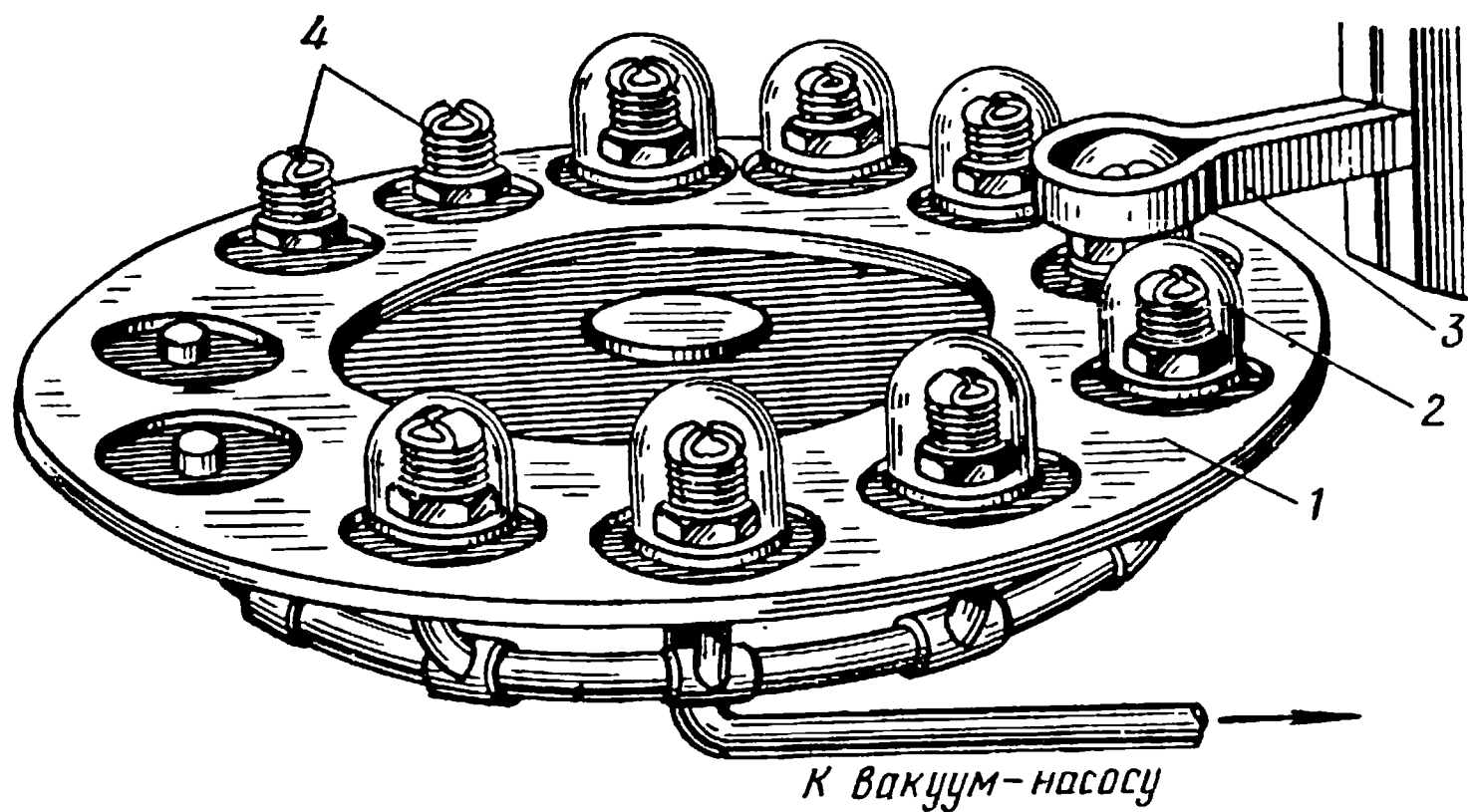


Рис. 122. Схема автомата для пайки свечей зажигания

Зависимость глубины прогрева от частоты тока и материала деталей приведена в табл. 46 [52].

Как следует из данных табл. 46, при применении тока стандартной частоты прогрев распространяется на большую глубину. С повы-

Т а б л и ц а 46

Материал паяемой детали	Температура нагрева, °С	Глубина прогрева для различных частот, мм			
		50 гц	500 гц	10 кгц	1 мгц
Сталь:					
$\mu = 1$	900	70	23	5	0,5
$\mu = 50$	600	8,8	2,9	0,6	0,06
Латунь	600	26	8,5	1,8	0,18
Медь	600	17	5,5	1,2	0,12

шением частоты тока нагрев сосредоточивается во все более узком поверхностном слое детали. Поэтому при автоматизации процессов индукционной пайки следует иметь в виду, что глубина прогрева должна быть достаточно большой, так как в противном случае внутренняя (охватываемая) деталь не прогреется и припой не затечет в зазор.

При применении средств механизации и автоматизации процесса пайки положение паяемых деталей в индукторе точно фиксируется. Продолжительность нагрева в этом случае можно регулировать по

температуре детали, времени включения генератора или количеству затраченной энергии. Схема индукционной пайки свечей зажигания двигателей внутреннего сгорания в автомате роторного типа приведена на рис. 122.

Паяемые детали 4 устанавливают в специальные гнезда медного, охлаждаемого водой стола 1. Каждую деталь накрывают стеклянным колпаком 2, в котором создают вакуум. В момент, когда деталь занимает положение против индуктора 3, последний опускается и включается ток. После необходимого для пайки нагрева ток выключается и индуктор поднимается. Происходит поворот стола на заданный угол и процесс повторяется.

Конструкцию индуктора в этом автомате можно изменить таким образом, что при вращении стола детали будут свободно проходить через неподвижный индуктор. В этом случае процесс пайки можно сделать непрерывным.

Для удаления окисной пленки с паяемых деталей и припоя, а также для защиты от окисления при пайке с индукционным нагревом применяют флюсы, контролируемые газовые среды и вакуум.

§ 3. Оборудование для пайки сопротивлением

Нагрев в процессе пайки сопротивлением осуществляется за счет тепла, выделяемого при протекании электрического тока через паяемую деталь, установленную между электродами. В случае применения графитовых электродов деталь дополнительно нагревается от электродов.

Для пайки методом сопротивления могут быть использованы обычные машины для контактной точечной, стыковой и роликовой сварки. Электроды в них, как правило, делают медными, водоохлаждаемыми. Для пайки мелких деталей часто применяют электроды графитовые и из жаростойких сплавов. Для равномерного нагрева при пайке электроды должны иметь большую площадь контакта с деталью и соответствующую конфигурацию.

Наряду со сварочными машинами имеются специальные контактные машины для пайки, а также упрощенные приспособления в виде контактных клещей. При пайке методом сопротивления необходимо обращать особое внимание на обеспечение хорошего контакта между электродами и паяемой деталью. В противном случае нагрев будет неравномерным и отдельные места могут перегреваться.

Пайка сопротивлением однородных металлов не вызывает трудностей. Значительно затруднена пайка сопротивлением разнородных металлов и элементов различных толщин. В этом случае наибольшее выделение тепла будет не в контакте между соединяемыми элементами, а в элементе с меньшим поперечным сечением или с большим электрическим сопротивлением, что затрудняет равномерный нагрев. Для обеспечения более равномерного нагрева необходимо менять форму электродов и места подвода тока к детали.

При пайке методом сопротивления для удаления с паяемого металла и припоя окисной пленки и защиты от окисления применяют

флюсы и контролируемые газовые среды. Солевые флюсы необходимо наносить в виде водных или спиртовых растворов, так как в твердом состоянии они являются диэлектриками и не проводят тока. Иногда при пайке сопротивлением применяют самофлюсующие припои, что упрощает процесс пайки.

В процессе пайки методом сопротивления при зажатии паяемых деталей в электроды из-за неровностей их поверхности и наличия флюса нагрев может быть неравномерным. Для более плавного нагрева ток иногда пропускают через одну из паяемых деталей, а вторая нагревается за счет теплоотвода. Такой способ пайки широко применяют для соединения пластин твердого сплава с корпусом инструмента. В этом случае ток пропускают только через стальной корпус, от которого нагревается пластинка твердого сплава. Этот метод нагрева позволяет без особых затруднений паять на контактных машинах детали из разнородных материалов, а также детали с большой разницей в толщинах соединяемых элементов.

Иногда применяют косвенный нагрев, при котором ток пропускают не через паяемые детали, а через графитовую или нихромовую пластину, от которой уже нагреваются детали. Пайка с применением нагрева сопротивлением на контактных машинах легко поддается автоматизации. Контактные машины можно устанавливать в поточную линию. Нашли применение также роторные полуавтоматы с нагревом сопротивлением.

К нагреву сопротивлением относится также нагрев в электролите. При этом методе нагрева ток, протекая через электролит, вызывает разложение воды. На паяемой детали образуется водородная оболочка с большим сопротивлением, через которую проходит ток, разогревая ее. Скорость нагрева зависит от состава и концентрации электролита, а также от напряжения и плотности тока.

По принципу нагрева в электролите разработаны автоматы нескольких типов, некоторые из них можно использовать для нагрева под пайку, в частности для напайки контактов магнето, для пайки инструмента и других аналогичных деталей.

§ 4. Оборудование для пайки погружением

В промышленности применяют два способа пайки погружением: в расплавы солей и в расплавы припоев.

П а й к а п о г р у ж е н и е м в р а с п л а в ы с о л е й. Собранные и подготовленные к пайке детали погружают в расплавленные и нагретые выше температуры пайки солевые смеси. Для пайки, как правило, используют соляные печи-ванны, применяемые для термической обработки. Соли обычно оказывают флюсующее действие на основной металл и припой, поэтому необходимость в дополнительном применении флюсов, как правило, отпадает. Если флюсующее действие солевых смесей недостаточно, то перед пайкой производят специальное флюсование.

При пайке углеродистых и низколегированных сталей с применением в качестве припоев меди или латуни дополнительное флюсо-

вание не требуется. При пайке этих материалов серебряными припоями необходимо предварительное флюсование в растворах или расплавах флюсов. После флюсования в растворах флюсов детали перед погружением в соляные ванны необходимо просушить до полного удаления влаги. Некоторые наиболее употребительные составы солевых ванн, применяемых при пайке, приведены в табл. 47.

Т а б л и ц а 47

Номер состава	Состав ванны, % (по массе)				Температура плавления °С	Максимальная рабочая температура, °С
	NaCl	CaCl ₂	BaCl ₂	KCl		
1	30	—	65	5	510	900
2	33	67	—	—	510	900
3	22	—	48	30	550	900
4	—	50	50	—	595	900
5	22,5	77,5	—	—	635	1300
6	—	—	100	—	962	1300

Для пайки алюминия и его сплавов рекомендуется применять составы соляных ванн, приведенные в табл. 48.

Т а б л и ц а 48

Номер состава	Состав ванны, % (по массе)						Температура плавления, °С		Максимальная рабочая температура °С
	NaCl	KCl	LiCl	CaCl ₂	BaCl ₂	KF·AlF ₃	солидус	ликвидус	
1	—	51	41	—	—	8	380	450	560
2	19	—	—	43	28	10	435	480	610
3	34	37	—	—	20	9	550	570	620

При выборе состава солевой смеси необходимо обращать внимание на температуру кипения отдельных ее компонентов, так как низкая температура кипения является причиной их испарения и, следовательно, изменения состава ванны. Иногда в качестве солевых смесей можно использовать соответствующие флюсы для пайки, но недостатком их является высокая стоимость, легкая испаряемость и энергичное взаимодействие с основным металлом.

В зависимости от температуры пайки применяют печи-ванны с металлическим тиглем, когда температура нагрева не превышает 950° С. При более высоких температурах нагрева применяют ванны с керамической футеровкой. Обогрев соляных печей-ванн может производиться посредством газовых и электрических нагревательных элементов, установленных снаружи или внутри печей-ванн, а также непосредственно током, подводимым через электроды, погруженные в тигель с солями. При этом используют только пере-

менный ток, так как постоянный вызывает электролиз солей. На рис. 123 представлена соляная печь-ванна типа В-20. Камера нагрева 1 выложена из шамотного кирпича. Тигель 2 установлен на чугунной плите 3. Сверху тигель закрыт крышкой 4, в которой

имеется отверстие¹ для термопары 5 и для подвешивания приспособлений с деталями 6.

Использование соляных^{*} печей-ванн для нагрева под пайку весьма выгодно, так как передача тепла осуществляется за счет непосредственного контакта паяемых деталей с расплавленными солями, в то время как при пайке в печи нагрев производится путем излучения и теплоотвода от раскаленной газовой атмосферы и пода печи. На рис. 124 приведены кривые скорости нагрева стальных деталей в соляной ванне (2) и в

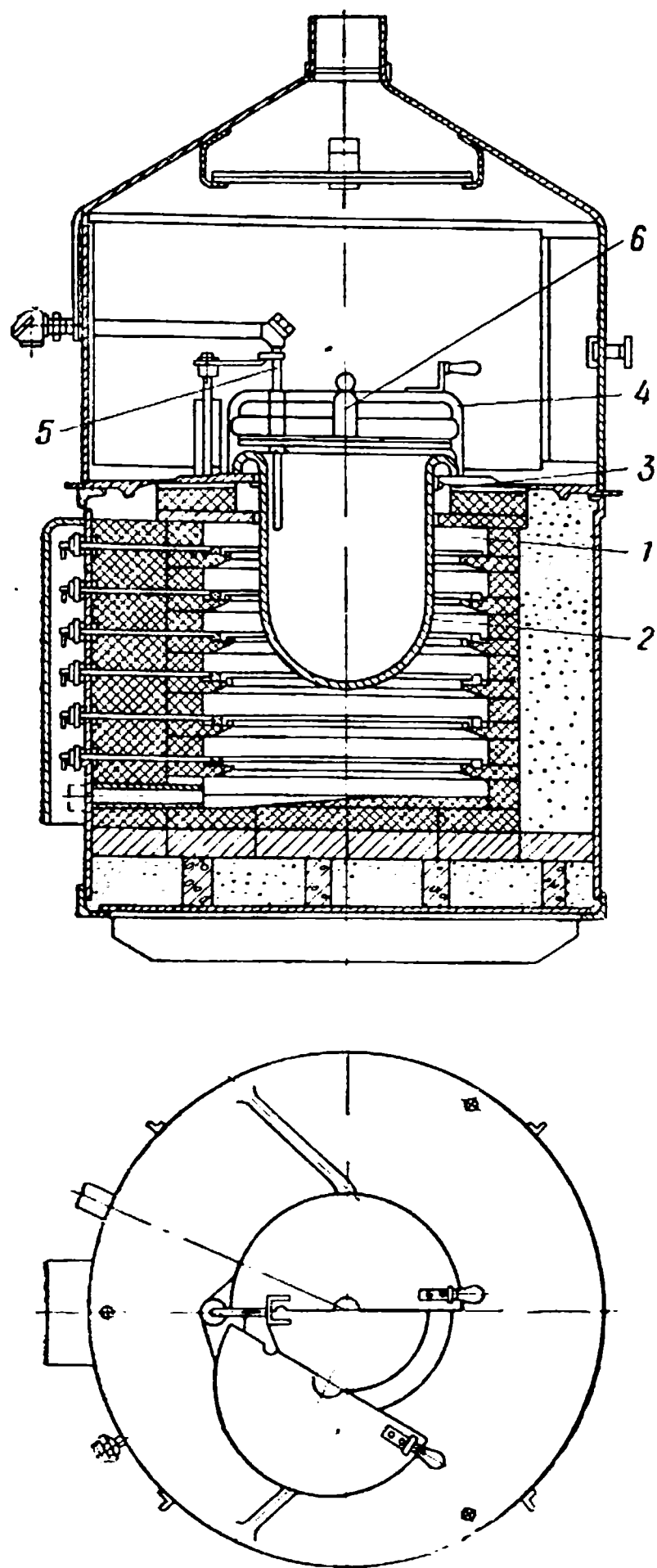


Рис. 123. Электрическая печь-ванна типа В-20

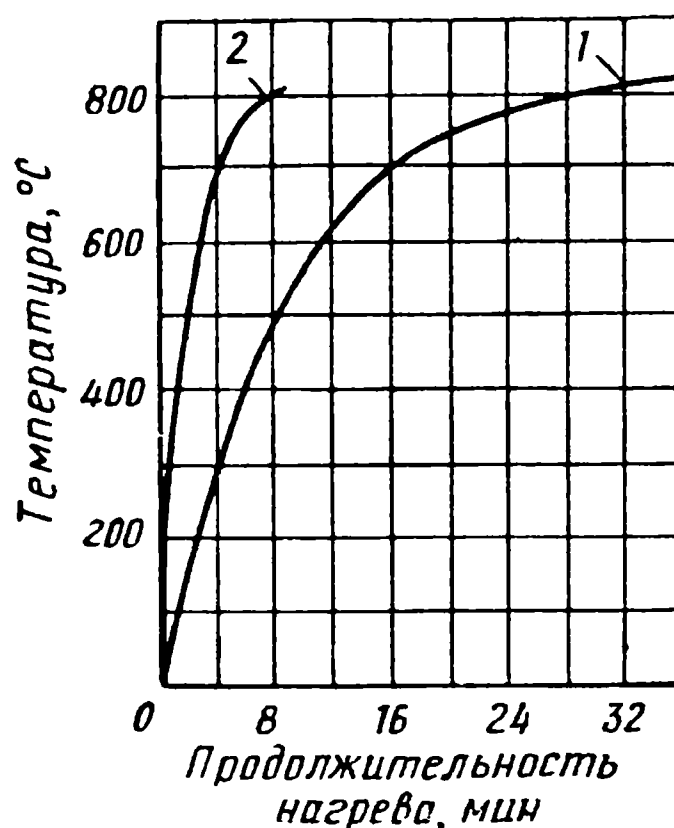


Рис. 124. Кривые скорости нагрева деталей диаметром 45 мм:
1 — в печи; 2 — в соляной ванне

печи (1), из которых можно видеть, что нагрев до 800° С в соляной ванне проходит в 3,5 раза быстрее, чем в печи [50].

При работе соляных печей-ванн изменяется состав ванны и уменьшается в ней количество солей, так как они испаряются и уносятся с нагреваемыми деталями и приспособлениями. Для корректировки состава ванны необходимо периодически добавлять новую порцию солей, а через определенный срок, зависящий от условий работы, полностью менять солевую смесь на новую.

При пайке в соляных печах-ваннах для повышения производительности мелкие детали перед погружением укладывают на решетку или в кассеты, а также собирают «на елку» — металлический стержень с ответвлениями, на которые надевают паяемые детали.

Более высокая производительность достигается при автоматизации процесса пайки в соляных ваннах. На рис. 125 приведена схема конвейерной пайки в соляной ванне рамы велосипеда. Направление движения паяемой рамы справа налево. По монорельсу 1 на цепях 2, расположенных на расстоянии 600 мм одна от другой, на подвесках 3 закреплены паяемые детали. Автоматическое погружение и выгрузка

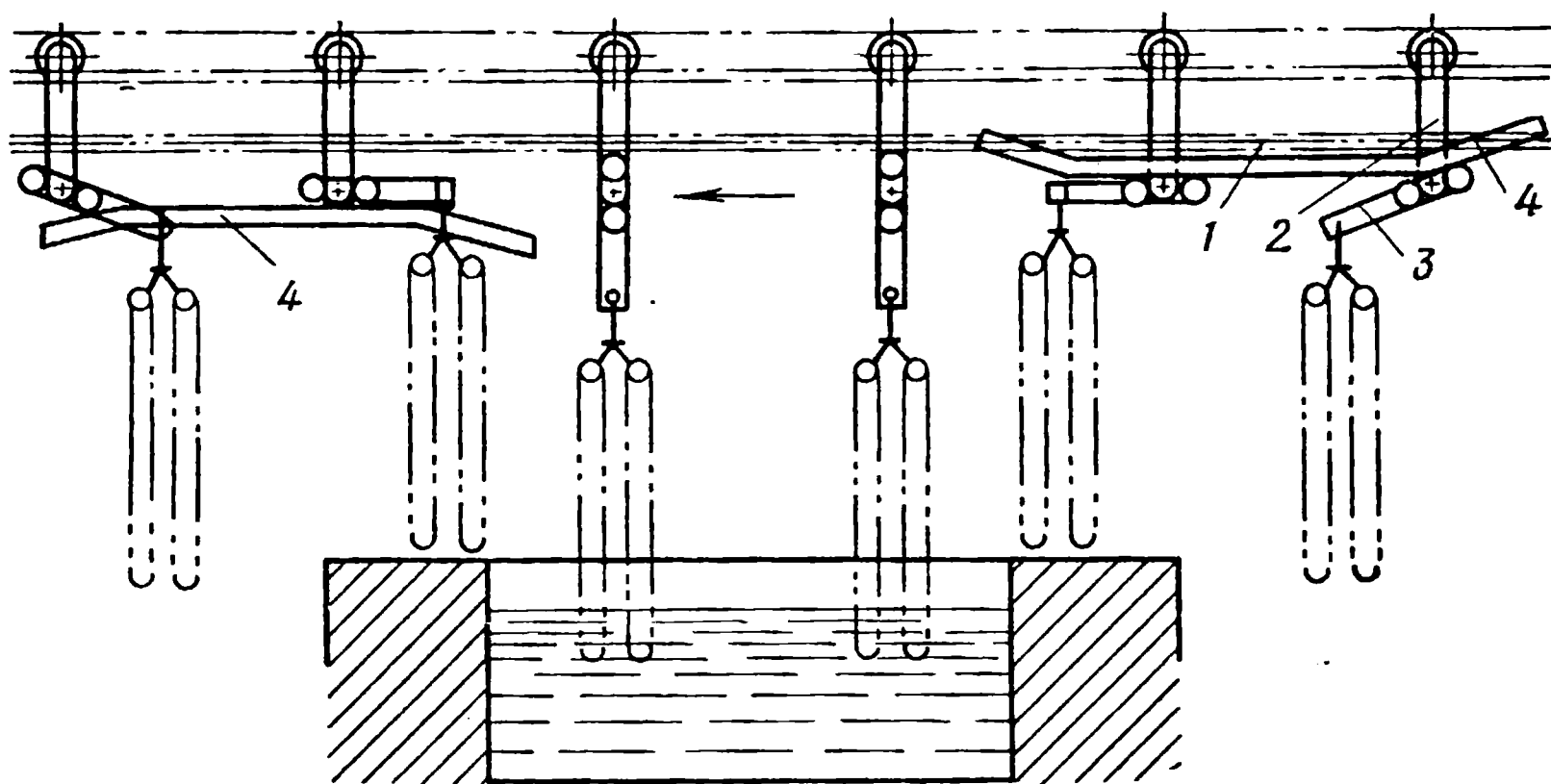


Рис. 125. Схема конвейерной пайки рамы велосипеда погружением в соляную ванну

деталей осуществляются с помощью копиров 4. Время выдержки в ванне поддерживается автоматически. Конвейерная линия обеспечивает пайку 150—180 велосипедных рам в час.

Пайка погружением в расплавленные припои. Оборудование, применяемое при пайке погружением в расплавленные припои, отличается простотой. Припои расплавляются в тиглях из металла, графита или другого огнеупорного материала. Нагрев тиглей осуществляется в нефтяных, газовых или электрических печах. Флюсование перед погружением в расплав припоя производится в отдельной флюсовой ванне, флюс может находиться на поверхности расплавленного припоя слоем в 3—5 мм или его наносят на детали перед пайкой. Во втором случае перед погружением в расплав металла деталь покрытую флюсом подогревают до полного удаления влаги. В процессе пайки за счет испарения компонентов припоя, а также растворения паяемых металлов состав расплава изменяется. Для корректировки состава ванны с припоем периодически, согласно результатам анализа, необходимо вводить недостающие компоненты. Если при пайке погружением применяют тугоплавкие припои, то предварительно детали подогревают до температуры на 200—300° С ниже температуры пайки. Предварительный подогрев позволяет использовать ванны с меньшим количеством

расплавленного припоя и ускоряет процесс пайки. Температуру ванны поддерживают на 50—60 град выше температуры плавления припоя. Время выдержки припоя в расплаве 20—80 сек. Пайку погружением в расплавленные припои применяют при изготовлении сотовых радиаторов, твердосплавного инструмента, деталей турбин и т. д. Пайка погружением в расплавленные припои легко поддается автоматизации. Схема пайки приведена на рис. 126.

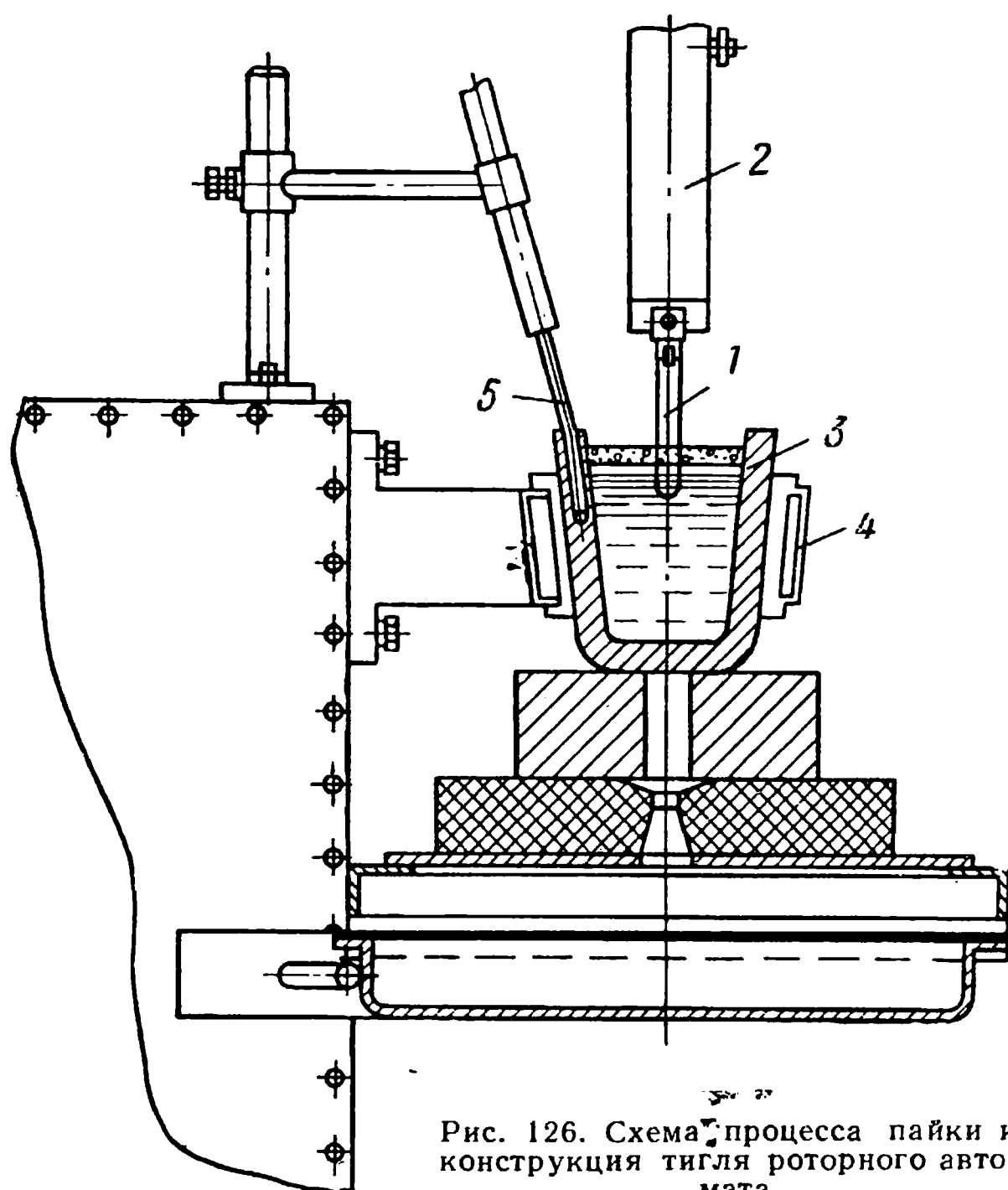


Рис. 126. Схема процесса пайки и конструкция тигля роторного автомата

Паяемая деталь 1, укрепленная в клиновом зажиме 2, погружается в тигель 3 с расплавом припоя, нагреваемого индуктором 4. Температура замеряется термопарой 5. Полуавтомат производит флюсование в 25 %-ном водном растворе тетраборнокислого натрия гидрата, нагретого до температуры 96—98° С. Предварительный подогрев зубков до температуры 1050° С производится в индукторе. После этого осуществляется пайка погружением в расплав латуни Л63, находящейся в тигле под слоем флюса при температуре 1080° С. Температура в тигле поддерживается постоянной автоматически при помощи термопары и автоматического электронного потенциометра ЭПД-12.

Применение подобного роторного полуавтомата для пайки металлообрабатывающих резцов позволит повысить стабильность качества режущего инструмента и значительно снизить его стоимость.

§ 5. Оборудование для пайки с радиационным нагревом

Для пайки тонколистовых конструкций в последние годы успешно применяют нагрев кварцевыми лампами. Кварцевая лампа представляет собой прозрачную кварцевую трубку с заключенной в ней вольфрамовой нитью, служащей нагревательным элементом.

Блоки кварцевых ламп создают поток излучения, направляемый на паяемое изделие с помощью специальных рефлекторов, которые изготовляют из нержавеющей стали. Для повышения отражающей способности рефлекторов их покрывают серебром или алюминием высокой чистоты. По своим теплофизическим свойствам эти рефлекторы почти не отличаются.

Недостатком рефлекторов с алюминиевым покрытием является лишь снижение отражательной способности в результате взаимодействия с парами лития, образующимися при пайке самофлюсующими припоями. Пары лития вызывают также помутнение кварцевого стекла ламп, что выводит их раньше времени из строя. Для предотвращения вредного воздействия паров лития и повышения качества пайки вначале паяемое изделие защищали кварцевыми пластинами. В настоящее время при изготовлении сотовых панелей их укладывают в специальные герметичные конверты, сваренные из тонколистовой стали (рис. 106).

§ 6. Горелки для пайки

В оборудование поста для пайки газовыми горелками входит: набор горелок, соединительные трубопроводы, редукторы, источники горючих газов, кислорода или воздуха. По применяемому горючему различают горелки: а) ацетилено-кислородные; б) горелки, работающие на природном или промышленном газе в смеси с кислородом или воздухом; в) керосино-кислородные.

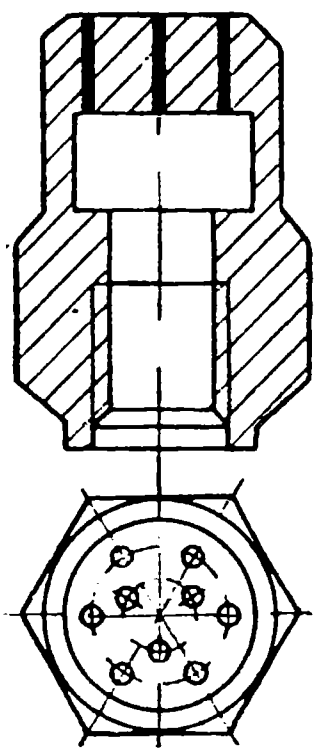


Рис. 127. Много-
госопловой
мундштук для
инжекторной
горелки

При применении ацетилено-кислородной смеси рекомендуются обычные сварочные горелки. К наконечникам № 2—7 этих горелок ВНИИавтогенмаш разработал специальные многопламенные мундштуки, которые создают рассредоточенное пламя и обеспечивают более равномерный нагрев при пайке. Много-сопловой мундштук приведен на рис. 127.

Для пайки с использованием природного и промышленного газов также разработаны специальные наконечники, которые отличаются от многосопловых наконечников горелок для ацетилено-кислородной пайки только размерами отверстий в мундштуках, инжекторах и смесительных камерах.

Керосино-кислородные горелки по конструкции отличаются от ацетилено-кислородных. Горелки этого типа имеют специальный испаритель, в котором керосин подогревается пламе-

нем отдельного подогревающего сопла. Керосино-кислородные горелки применяют для пайки деталей с толщиной стенок 2—10 мм; они обеспечивают нагрев до температуры 1000—1100° С.

Правила эксплуатации газовых горелок, трубопроводов и редукторов, применяемых при пайке, те же, что и при сварке.

Если для целей нагрева при пайке применяют промышленные и природные горючие газы, то их подают к рабочему месту из генераторов, баллонов или заводской сети. Кислород и воздух поставляют в баллонах или также подают из заводской сети. Процесс пайки газовыми горелками легко поддается механизации. На рис. 128 приведена схема установки конвейерного типа для газопламенной пайки.

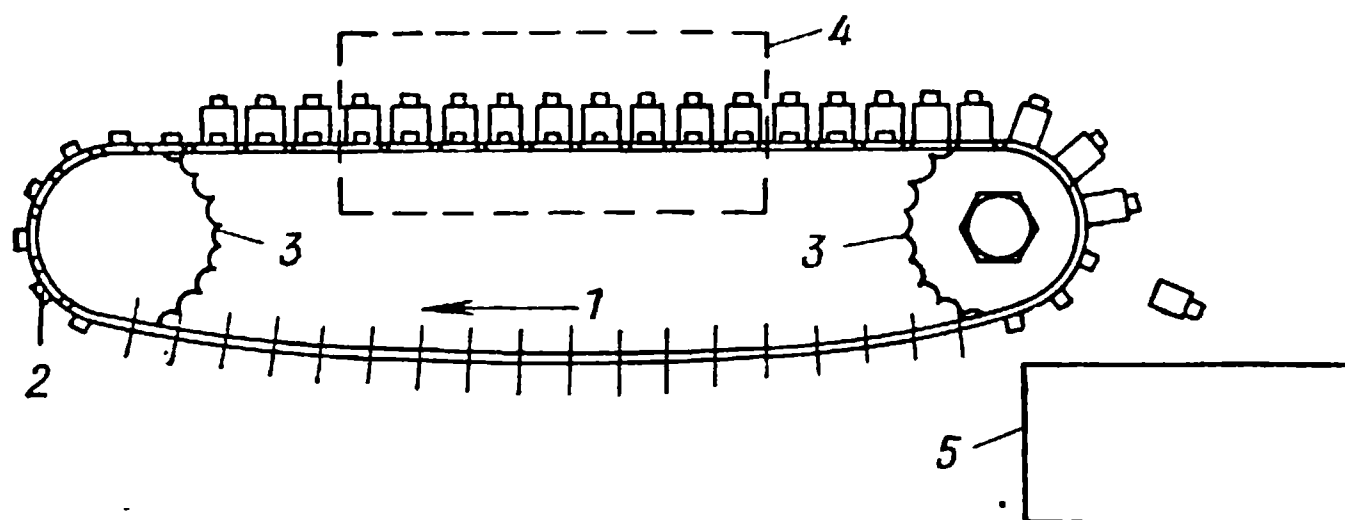


Рис. 128. Схема установки конвейерного типа для газопламенной пайки

Цепная конвейерная передача 1, изготовленная из теплостойкого материала, несет на себе через определенные интервалы приспособления 2, на которые устанавливают паяемые детали. Зубчатые колеса 3, одно из которых — ведущее, второе — ведомое, приводят конвейер в движение. Меняя зубчатую передачу, можно варьировать скорость движения конвейера. Зона пайки 4 представляет собой трубу, футерованную огнеупорным материалом, в которой рядами установлены горелки. Поступая в зону нагрева, детали постепенно нагреваются до температуры пайки. После пайки и охлаждения на воздухе детали с движущегося конвейера падают в ящик 5.

ВНИИАвтогенмашем разработана полуавтоматическая установка СГП-1-57 роторного типа для газопламенной пайки наконечников сварочных горелок. Эта установка обеспечивает пайку 36 наконечников горелок в час, что свидетельствует о больших возможностях механизированной газопламенной пайки.

При разработке процесса автоматической пайки важно установить зависимость температуры детали от времени контакта ее с нагревателем. На рис. 129 приведена зависимость температура — время для газопламенного нагрева тонкостенной и толстостенной труб. Нагрев тонкостенной трубы до 600° С осуществляется за 5 сек, а затем через 1,5 сек температура трубы достигает 750° С. Для нагрева толстостенной трубы до температуры 600° С необходимо 30 сек, а для достижения температуры 750° С еще 15 сек. Максимально возможная температура нагрева при этом в тонкостенной трубе 1600° С, а в толстостенной 1200° С [52].

При разработке процесса пайки с применением газового пламени, из технологических и экономических соображений, время нагрева необходимо выбирать в пределах 20—60 сек. Наименьшее время пайки определяется удалением окисной пленки флюсом и составляет не более 10 сек. Наибольшее время пайки в каждом конкретном случае определяется условиями протекания процесса пайки и соображе-

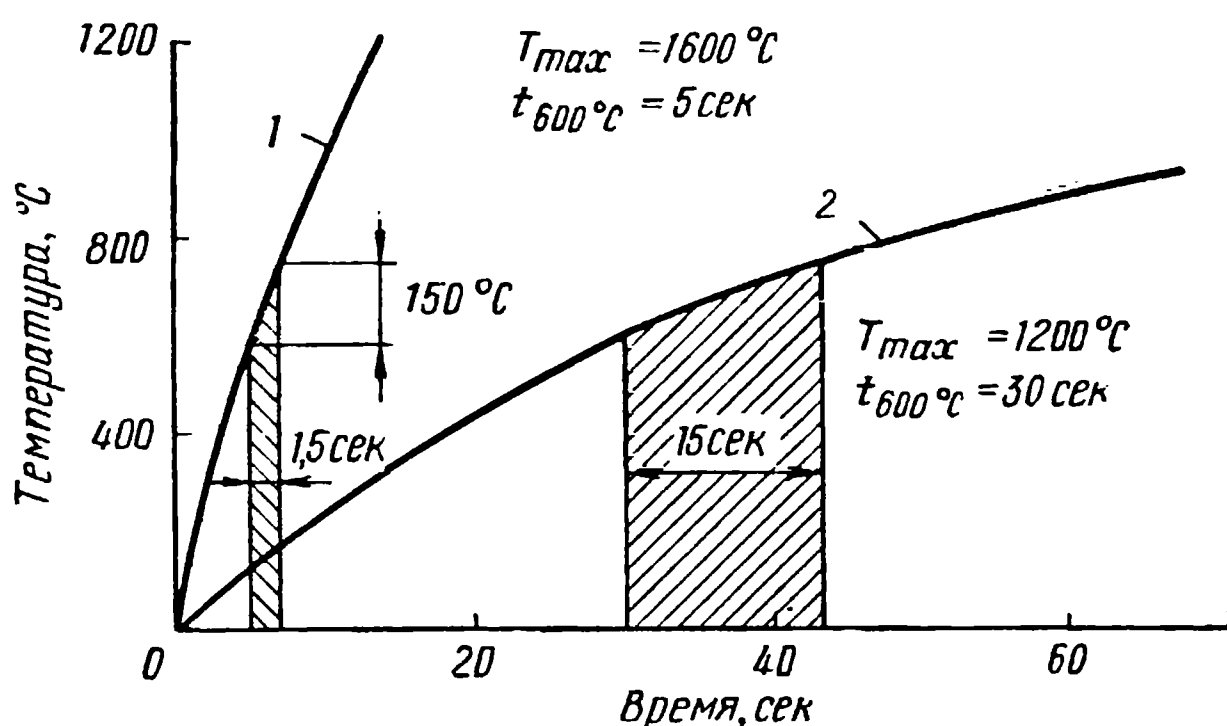


Рис. 129. Кривые скорости нагрева при газопламенной пайке тонкостенной (1) и толстостенной (2) труб

ниями экономики. При пайке с применением флюсов в атмосфере воздуха через 4—5 мин флюс теряет свои флюсующие свойства, что ограничивает максимальную выдержку при газопламенной пайке.

§ 7. Паяльники

Для низкотемпературной пайки применяют паяльники с периодическим и постоянным нагревом. Рабочую часть паяльников изготавливают из красной меди вследствие ее высокой теплопроводности. Паяльник аккумулирует тепло от источника нагрева и передает его паяемой детали в процессе пайки, а также переносит расплавленный припой к месту соединения деталей.

Паяльники с периодическим нагревом в процессе работы периодически подогреваются от постороннего источника тепла, что создает большие неудобства при их эксплуатации. По этой причине в последнее время они все больше вытесняются электрическими паяльниками с постоянным нагревом. Общий вид наиболее распространенных электропаяльников приведен на рис. 130. Нагревательный элемент электропаяльника сделан из нихромовой проволоки, намотанной на слой асбеста, слюды, стеклоткани или керамическую втулку, устанавливаемую на медный стержень паяльника.

Паяльники, изготовленные из меди, хорошо обслуживаются припоями и быстро передают тепло в процессе пайки, но они довольно интенсивно растворяются в расплавленных припоях. Для увеличения срока службы на рабочую поверхность паяльника (наконечник) наносят железное или никелевое покрытие толщиной 0,1—0,2 мм.

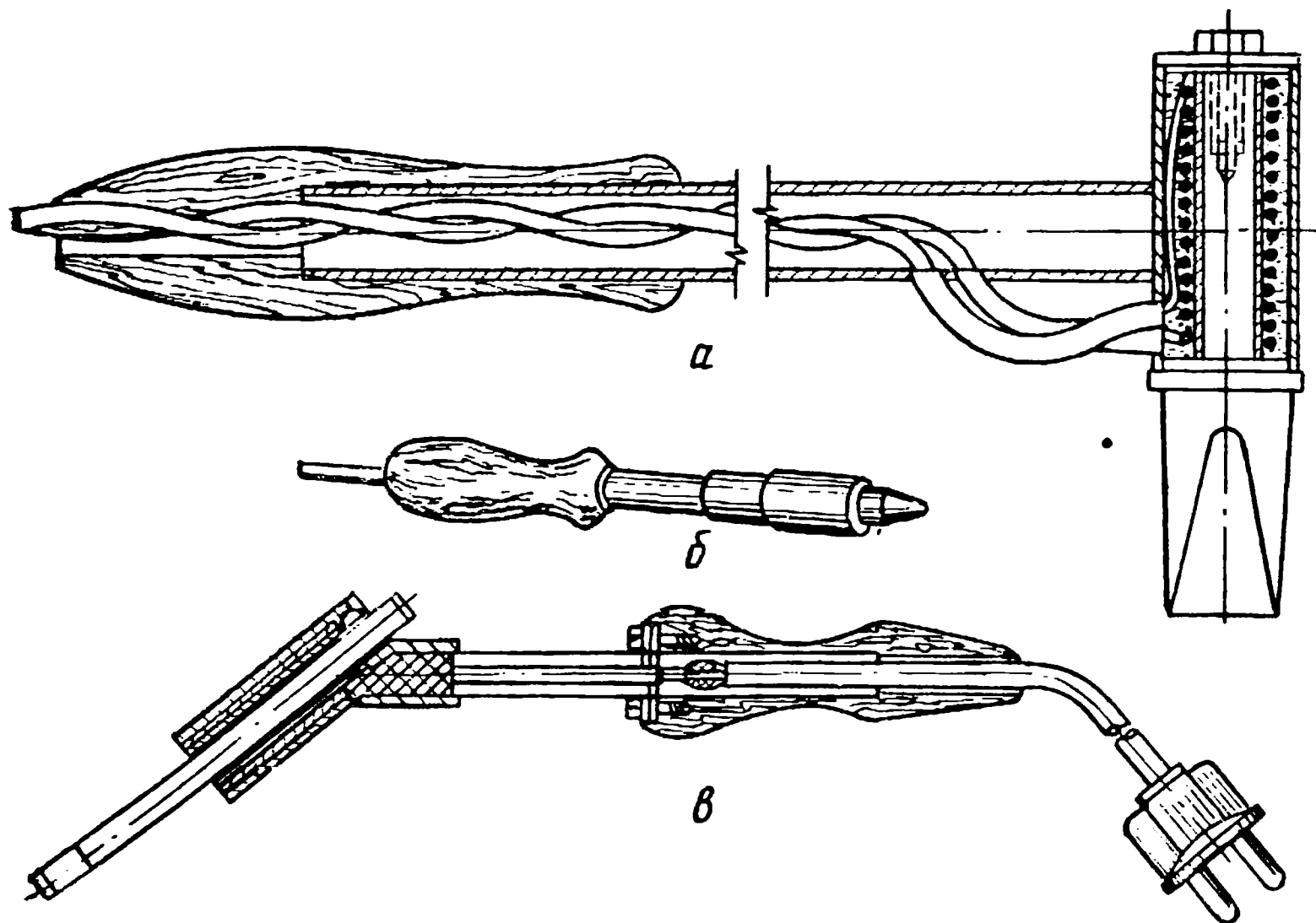


Рис. 130. Электропаяльники:
а — молотковый; *б* — торцовый; *в* — угловой

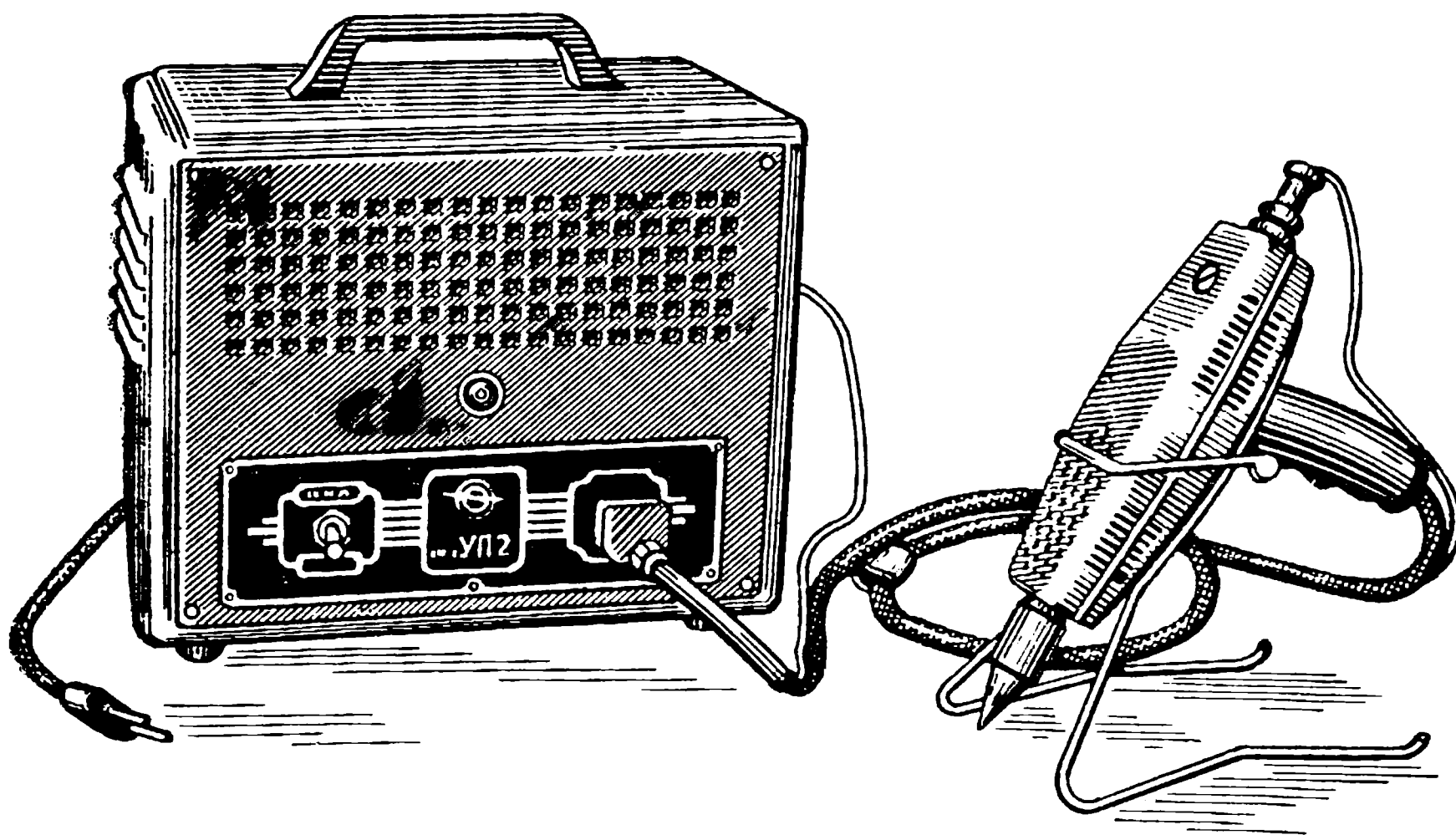


Рис. 131. Ультразвуковой паяльник и переносный генератор марки УП-21

Размер паяльника зависит от массивности паяемых деталей. Для электромонтажных работ применяют паяльники малой мощности (до 200 *вт*) и массой до 1 *кг*. Для пайки массивных деталей применяют паяльники мощностью до 1200 *вт* и массой до 4,5 *кг*.

Для ультразвуковой пайки применяют ультразвуковые паяльники и ультразвуковые ванны. Ультразвуковой паяльник и переносный генератор марки УП-21 показаны на рис. 131. Ниже приведены данные этого паяльника:

Рабочая частота, <i>кГц</i>	18—22
Мощность генератора, <i>вт</i>	40
Габариты, <i>мм</i> :	
генератора	332×342×310
паяльника	292×160×52
подставки	205×105×138
ванны	288×200×162
Диаметр ванны, <i>мм</i>	25
Глубина ванны, <i>мм</i>	10
Масса, <i>кг</i> :	
генератора	14
паяльника	1,1
подставки	0,25
ванны для лужения	0,8

Абразивный паяльник в отличие от электропаяльника имеет рабочий стержень, изготовленный прессованием из порошка припоя и измельченного асбеста (абразива). Недостатком паяльников с периодическим нагревом является большая потеря времени на подогрев. Паяльники с постоянным нагревом не обладают этим недостатком, но имеют небольшой срок службы в связи с выходом из строя нагревателей.

Большим преимуществом в этом отношении отличаются паяльники, предложенные И. Н. Помазановым и П. Л. Тихомировым. Нагреватели из нихромовой проволоки в этих паяльниках установлены внутри нагреваемого медного стержня, что повысило срок их службы в 10 раз.

Паяльники отличаются простотой конструкции и устойчиво обеспечивают протекание процесса низкотемпературной пайки.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА,
ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ
И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Глава X

КОНТРОЛЬ ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ

§ 1. Дефекты паяных изделий

Дефекты, образующиеся при изготовлении паяных конструкций, можно разделить на три группы: дефекты заготовки и сборки под пайку, дефекты паяных швов, дефекты паяных изделий в целом.

Качество паяного изделия зависит в первую очередь от качества изготовления заготовок и тщательности сборки под пайку. Элементы изделия должны быть изготовлены в соответствии с чертежом. В процессе сборки устанавливают необходимые зазоры и соединяемые детали надежно закрепляют. После нанесения и закрепления припоя изделие устанавливают в приспособление, обеспечивающее при пайке наилучшие условия затекания припоя в зазор и наименьшие коробления.

Наиболее характерными дефектами сборки под пайку является несоблюдение равномерности сборочного зазора и смещение элементов изделия. Причиной этих дефектов служит неточность обработки заготовок, смещения в процессе их закрепления, а также отсутствие приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию элементов изделия. Контроль заготовок и сборки под пайку осуществляется внешним осмотром и проверкой оговоренных в технологической карте размеров мерительным инструментом.

Типичными дефектами паяных швов являются: поры, раковины, трещины, шлаковые и флюсовые включения, непропай, т. е. несплошное заполнение зазора припоем, а также отсутствие в отдельных местах спая между основным металлом и припоем. Последнее объясняется несмачиванием в этих местах паяемого металла припоем. Причиной образования мелких газовых пор и непропаев является выделение в процессе пайки газов, содержащихся в припое и образующихся при испарении отдельных компонентов припоев и флюсов, а также влияние окисной пленки в условиях недостаточного нагрева или малой выдержки при температурой пайки. При применении серебряных припоев, особенно ПСр72, основной причиной образования пор служит установленный И. Е. Петруниным эффект сфероидизации¹ [36, 53]. Поры, образовавшиеся в результате этого явления, отличаются от газовых пор наличием металлического остатка

¹ В результате предпереходных явлений, протекающих при плавлении металлов в их объеме, вначале образуются микрокапли жидкой фазы. Если они окисляются или покрываются шлаковой пленкой, то при расплавлении всего объема металла капли будут находиться в расплаве в виде шарообразных включений—сфероидов.

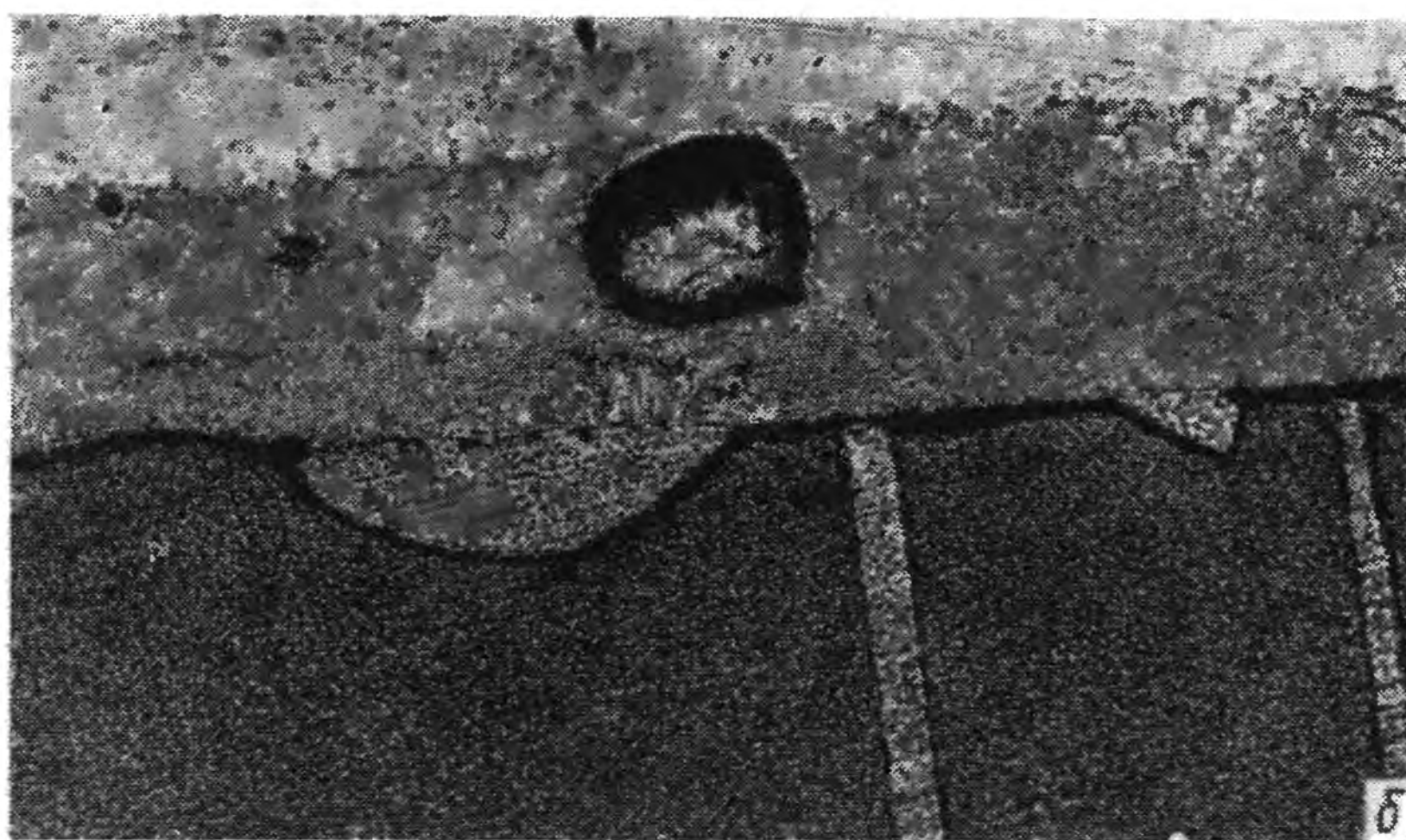


Рис. 132. Микроструктура соединения меди с серебром контактно-реакционной пайкой:

а — сфероид в зоне сплавления; б — пора, образовавшаяся на месте сфероида

внутри поры (рис. 132, б). Причиной их образования в расплаве зоны сплавления служит массоперенос через шлаковую пленку, находящуюся на поверхности сфероида (рис. 132, а), в результате наличия градиента концентрации компонентов в сфероиде и зоне сплавления.

Раковины в зоне сплавления (рис. 133) образуются в результате недостаточного питания соединительного зазора припоем и усадочных явлений, происходящих при кристаллизации. Возникновению пор, неспаев и усадочных раковин способствует большой зазор. Наличие влаги во флюсе и на заготовках припоя в виде адсорбированного слоя также приводит к появлению пор и непропаев. Как показали

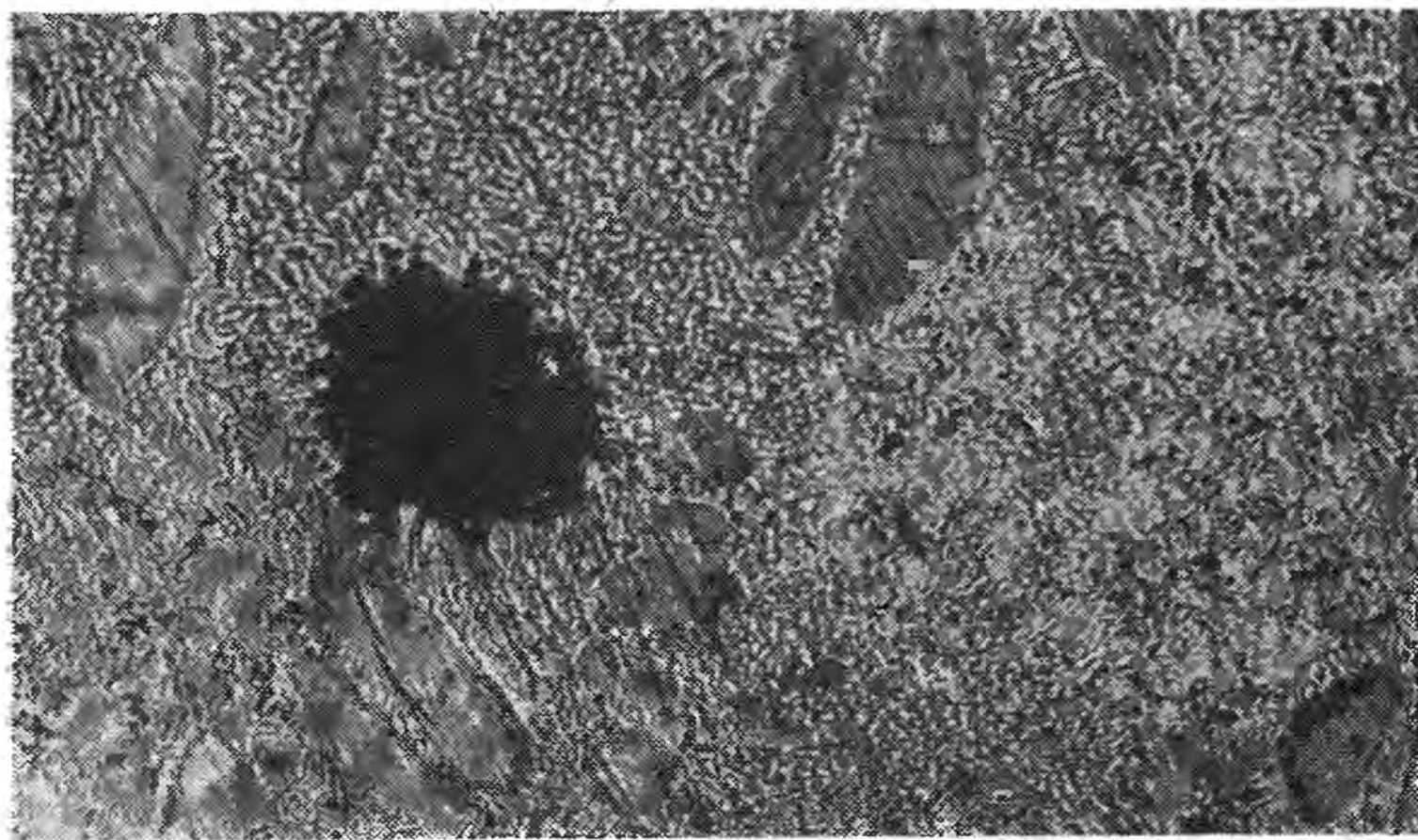


Рис. 133. Усадочная раковина в зоне сплавления при пайке стали Ст.3 в среде водорода припоем на железной основе, $\times 400$

исследования, прокаливание прутков алюминиевых припоев при температуре 350 С снижает пористость паяных ими соединений примерно вдвое.

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

Трещины в паяных швах образуются редко. Они могут возникнуть под действием собственных напряжений в основном металле или при сотрясении паяемого изделия в процессе пайки, когда закристаллизовавшийся припой имеет еще низкую прочность.

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

холодными. В зависимости от расположения трещин в паяных соединениях их делят на три группы: трещины в шве, трещины в основном металле, трещины в зоне спая. Образование трещин наиболее часто наблюдается в швах, спаянных припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации, а также загрязненными примесями.

Горячие и холодные трещины в основном металле возникают под действием собственных напряжений, образующихся при сборке, нагреве под пайку, при кристаллизации металла шва и охлаждении паяного изделия. Трещины в основном металле могут образоваться под действием расплавленного припоя. В процессе пайки происходит адсорбционное понижение прочности основного металла под действием расплавов флюса и припоя, а иногда проникновение припоя по границам зерен основного металла, что ослабляет связи между ними и при наличии собственных напряжений или внешней нагрузки приводит к образованию трещин.

Трещины в зоне спая часто образуются при пайке разнородных материалов с резко различными физико-химическими свойствами. Особенно часто этот дефект образуется при пайке пластин твердых сплавов к корпусу инструментов из конструкционных сталей. Трещины возникают также при пайке серебряными и медными припоями нержавеющей сталей в напряженном состоянии.

Распространенным дефектом паяных швов является недостаточное заполнение зазора припоем. Чтобы избежать непропаянных мест, необходимо добиваться тщательного удаления окисной пленки и соблюдать установленные зазоры. На качество заполнения зазора большое влияние оказывает наличие вредных примесей в припоях. При загрязнении припоев окислами резко снижается их жидкотекучесть. Дефекты, связанные с недостаточным заполнением шва припоем, часто возникают при пайке газовой горелкой вследствие недостаточного прогрева соединяемых деталей. Иногда незаполнение шва припоем происходит в связи с отсутствием выхода для нагретых газов из замкнутых полостей в зоне шва. В таких случаях для выхода газов необходимо делать технологические отверстия (сверления) в деталях.

При пайке горелкой нужно равномерно нагревать соединяемые элементы изделия и следить за тем, чтобы они были покрыты флюсом. При пайке в восстановительной атмосфере без флюса образуется меньше непропаев, чем при пайке с флюсом. Так, при пайке низкоуглеродистых сталей медью в восстановительной атмосфере припоем заполняется в среднем 90—95% площади соединения, в то время как при пайке с флюсом только 80%. Наиболее плотные соединения получаются при пайке в вакууме. Такой дефект паяных соединений, как отсутствие спая (связи между основным металлом и припоем), обычно появляется при недостаточно тщательном удалении окисной пленки с поверхности основного металла и припоя как перед пайкой, так и в процессе пайки.

К дефектам паяного изделия в целом относятся деформации и коробления, появляющиеся в результате неравномерного нагрева и охлаждения в процессе пайки, а также из-за небрежной сборки

под пайку. Образование этих дефектов можно предупредить или уменьшить применяя общий нагрев, постепенно охлаждая изделие после пайки, а также применяя приспособления, надежно фиксирующие положение отдельных элементов изделия при сборке, пайке и охлаждении. Для предотвращения образования дефектов в паяных соединениях в первую очередь необходимо строго соблюдать технологию пайки.

§ 2. Методы контроля и оборудование

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

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

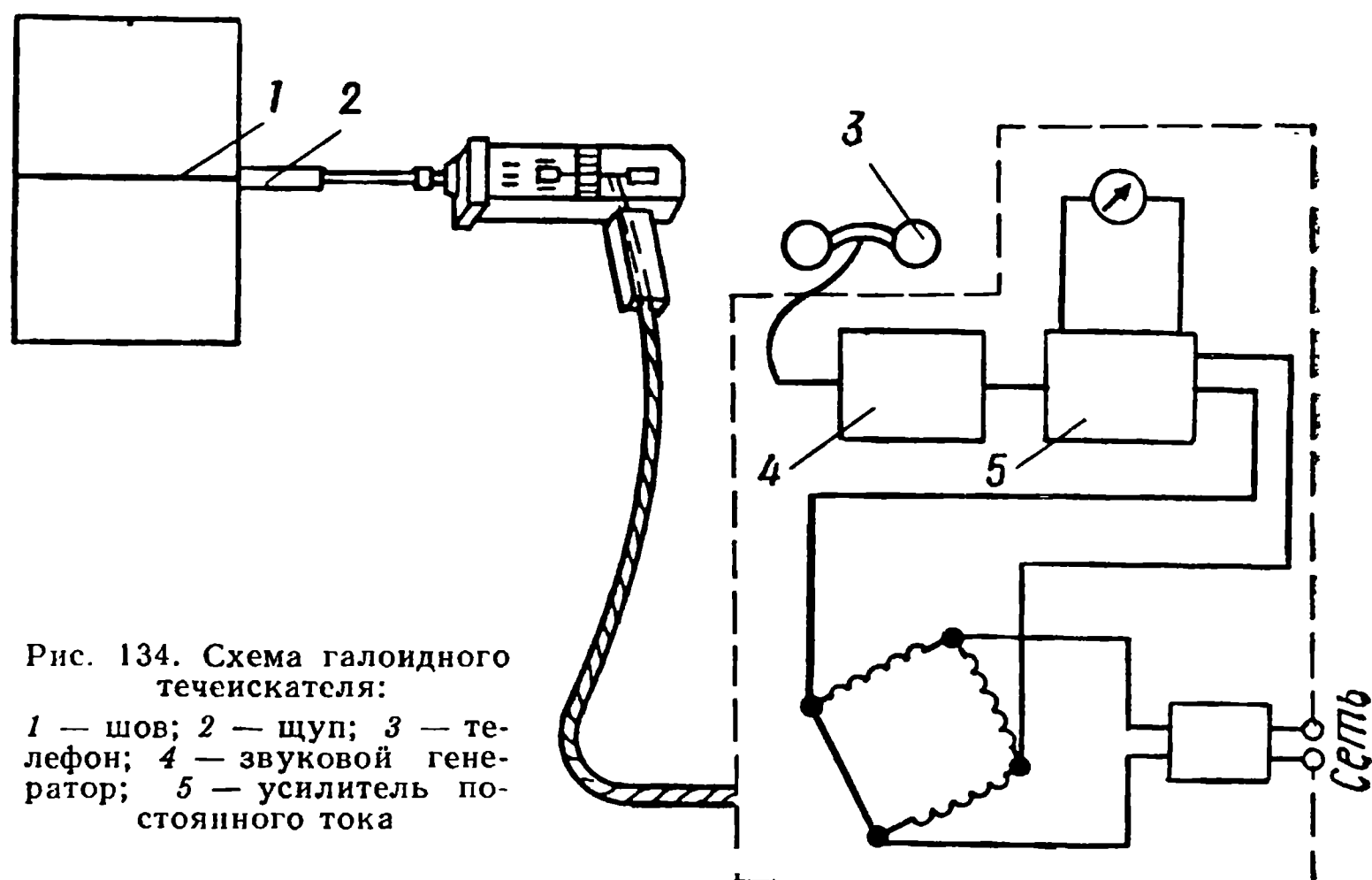
В процессе пайки необходимо контролировать температуру, давление и время выдержки, не допуская перегрева деталей и припоя.

После пайки производят приемку и испытания паяных изделий. Для испытания качества паяных соединений могут быть применены методы контроля без разрушения и с разрушением. Для контроля без разрушения применяют визуальный осмотр, испытание под давлением или теченскателями, просвечивание рентгеновскими и γ -лучами, контроль намагничиванием, ультразвуковой контроль и др. Контроль с разрушением применяют редко и обычно только для особо ответственных конструкций выборочным путем, т. е. разрушают определенный небольшой процент готовых изделий (1—2%) в соответствии с техническими условиями. Разрушение можно производить путем гидравлического давления, испытания на сжатие, растяжение, изгиб, вибрацию, а также путем вырезки образцов для механических испытаний и металлографических исследований.

Неразрушающие методы контроля. Наиболее простым методом контроля является визуальный осмотр. Внешний осмотр часто совмещают с промером заготовок, сборочных зазоров, с проверкой размеров готового изделия. Внешним осмотром проверяют качество заготовок и сборки под пайку, а также качество готового изделия. При осмотре заготовок обращают внимание на чистоту соединяемых поверхностей, на отсутствие забоин, вмятин, на качество покрытия. При осмотре сборки обращают внимание на правильность установления капиллярных зазоров, на наличие и закрепление припоя, на надежность закрепления элементов паяемого изделия. При контроле готового изделия проверяют соответствие его чертежу и техническим условиям. Внешний осмотр паяных соединений позволяет выявить качество заполнения зазоров, образование галтелей,

наличие трещин в галтельных участках шва и других наружных дефектов. Наличие хорошо сформированных галтелей обычно является признаком высокого качества пайки.

Испытание паяных изделий давлением воздуха или воды. Этот метод контроля производится после внешнего осмотра. При пневмоиспытании в паяное изделие нагнетают воздух до давления, установленного техническими условиями, после чего швы смачивают мыльной водой или изделие погружают в воду. Неплотности определяют по появлению пузырьков воздуха на паяных швах. При испытании давлением воздуха для повышения



чувствительности к нему можно добавлять аммиак в количестве 1% по объему. В этом случае паяные швы покрывают бумажной лентой, пропитанной 5%-ным водным раствором азотнокислой ртути или раствором фенолфталеина. После выдержки 5—10 мин под давлением бумажные ленты осматривают. Неплотности определяют по появлению черных или фиолетовых пятен на бумаге.

Газоэлектрические течеискатели. Для контроля паяных швов на непроницаемость применяют гелиевые и галоидные течеискатели. Принцип их действия основан на том, что паяный шов обдувают с одной стороны газом-индикатором или внутренний объем испытуемого изделия заполняют этим газом в смеси с воздухом. Проникающий через неплотности в шве газ улавливается специальным щупом, передвигаемым по поверхности шва, и затем анализируется в приборе. В том случае, когда производится обдув шва снаружи замкнутого объема изделия, проникший внутрь через неплотности газ отсасывают. В обоих случаях после ионизации поступившего в прибор газа наличие в нем ионов оценивается по величине ионного тока, который после преобразования подается

на миллиамперметр и к звуковому сигналу. В качестве газов-индикаторов в гелиевом течеискателе применяют гелий, а в галоидных течеискателях — фреон-12, четыреххлористый углерод, хлороформ и другие галоидосодержащие газы. Блок-схема галоидного течеискателя ГТИ-2 представлена на рис. 134.

Чувствительность гелиевого и галоидного течеискателей очень высокая, но они сложны, поэтому их применяют только для наиболее ответственных изделий [54].

Рентгеновский контроль. Применяется при определении внутренних дефектов в ответственных паяных соединениях. Современные средства рентгеновского контроля позволяют определять по снимкам сравнительно небольшие дефекты. Для контроля паяных соединений применяют рентгеновские аппараты малого напряжения, например аппарат типа РУП-120-5-1. Просвечивание излучением радиоактивных изотопов также можно использовать для контроля паяных соединений, но чувствительность этого метода по сравнению с рентгеновским ниже, поэтому его применяют редко. По рентгеновским снимкам определяют размеры, расположение и характер внутренних дефектов в паяных швах. В технических условиях на приемку изделий указывают количество допустимых дефектов на рентгеноснимках.

При наличии стабильной продукции на предприятиях иногда разрабатывают специальные эталоны допустимых дефектов.

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

Различают два основных метода контроля намагничиванием: метод магнитного порошка и индукционный метод. При контроле методом магнитного порошка паяные детали намагничиваются постоянным или переменным током. После этого на поверхность намагниченных деталей наносят слой сухого магнитного порошка при помощи пульверизатора или детали погружают в суспензию магнитного порошка в масле или керосине. Скопление порошка на поверхности паяных деталей указывает место нахождения дефектов. Индукционный метод контроля паяных деталей применяют сравнительно редко.

Метод контроля ультразвуком. Этот метод основан на способности ультразвуковых колебаний отражаться от поверхности внутренних неоднородностей металла. Ультразвуковой контроль отчетливо выявляет такие дефекты в паяных соединениях, как трещины, поры, раковины, шлаковые включения, незаполнение шва припоем. Методика ультразвукового контроля паяных соединений не отличается от методики ультразвукового контроля сварных соединений.

Разрушающие методы контроля. При разрушающих методах контроля паяные соединения и паяные изделия испытывают на

механическую прочность, коррозионную стойкость, а также проводят металлографические исследования. Самым простым методом определения механической прочности при разрушающем контроле является постепенный отрыв одной из соединенных деталей по шву (отдир). Вскрытие шва позволяет визуально оценить имеющиеся в нем дефекты. Схема контроля на отдиране приведена на рис. 135. Аналогичный результат дает вскрытие имеющихся в шве дефектов путем распая, т. е. нагрева до температуры плавления центрального слоя шва, при которой возможна разборка паяного соединения.

Количественная оценка надежности паяных швов разрушающими методами контроля наиболее полно производится при механических испытаниях.

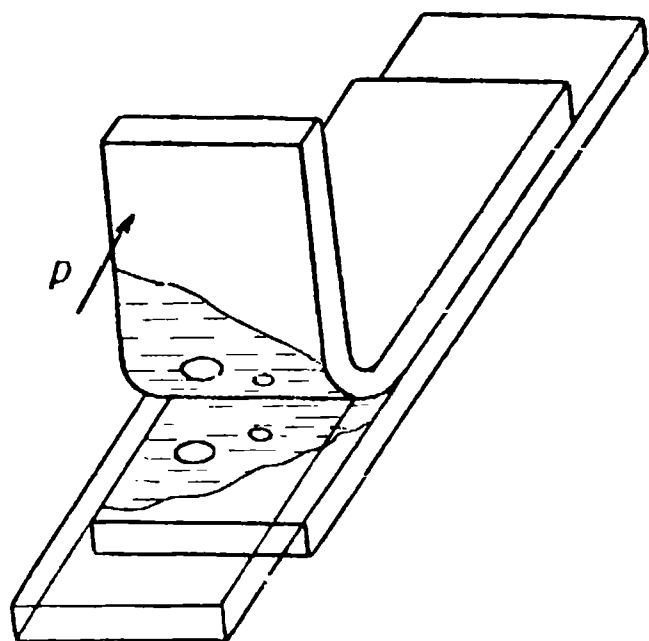


Рис. 135. Схема контроля паяного соединения на отдиране

Механические испытания. Механические испытания паяных соединений можно разделить на три группы: 1) лабораторные испытания паяных образцов; 2) статические и динамические испытания паяных изделий в лабораторных условиях; 3) испытания паяных изделий в эксплуатационных условиях.

Лабораторные испытания паяных соединений проводят при разработке новых припоев, при отработке технологии пайки и контроле механических свойств паяных соединений. В зависимости от степени ответственности паяных изделий проводят лабораторные испытания отдельных узлов или полностью изделий в условиях, имитирующих эксплуатационные нагрузки. Особо ответственные паяные конструкции подвергают натурным испытаниям в условиях эксплуатации. При работе паяного соединения в конструкции в нем могут возникнуть напряжения растяжения, сжатия, сдвига и сложные, когда одновременно возникают различные напряжения. Для паяных соединений наибольшее распространение получили испытания на срез и на отрыв.

При проведении механических испытаний различают кратковременные статические испытания, длительные статические испытания, динамические испытания при ударных нагрузках, испытания на усталость.

Для паяных соединений распространены главным образом кратковременные статические испытания плоских и круглых образцов. Форму и размеры образцов для механических испытаний паяных соединений определяют методом испытания и конструкцией паяного изделия. Форму головок образцов выбирают в соответствии со способом крепления в захватах машины для испытания.

Испытания паяных образцов на срез проводят обычно при приложении растягивающих или сжимающих нагрузок. При испытании на срез с приложением нагрузки на растяжение применяют плоские и круглые образцы, спаянные внахлестку. Форма плоских нахлесточных образцов приведена на рис. 136, а. Недостатком их яв-

ляется несимметричное приложение нагрузки в процессе испытания, в результате чего образец по шву работает не только на сдвиг, но и на изгиб и частично на отрыв.

Чтобы избежать этого, применяют образцы, изображенные на рис. 136, б, которые при испытании обеспечивают работу шва только на срез.

Более простыми в изготовлении являются образцы для испытания паяных соединений на срез при приложении к образцу нагрузки на сжатие. Форма такого образца и схема испытания приведены на

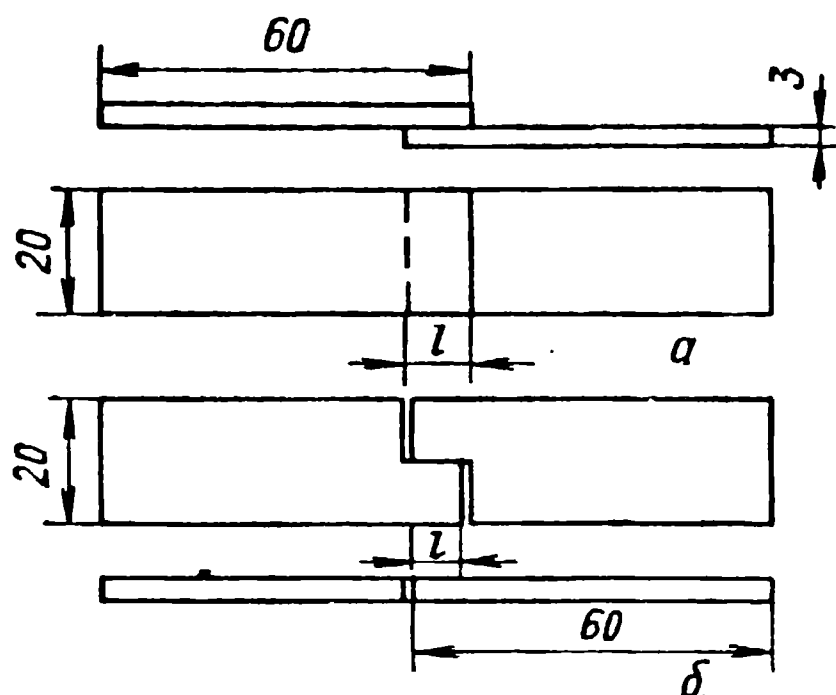


Рис. 136. Форма плоских образцов:
а — внахлестку; б — ступенчатого

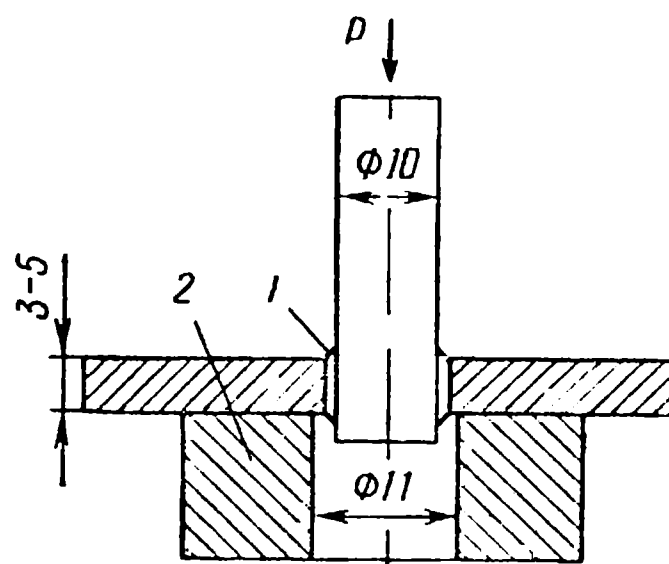


Рис. 137. Форма образца и схема
испытания на срез при сжатии:
1 — паяный шов; 2 — кольце-
вая подставка

рис. 137. Этот метод испытания чаще применяют для образцов, паянных с применением низкотемпературных припоев, но его с успехом можно использовать и для соединений, паянных высокотемпературными припоями.

При испытании паяных образцов на срез следует иметь в виду, что толщину основного металла образца и величину нахлестки (перекрытия) выбирают такими, чтобы разрушение при испытании происходило по паяному шву. Наличие галтельных участков в паяном соединении приводит к тому, что оно работает при нагружении не только на срез, но и на растяжение в галтельных участках. По этой причине перед испытанием иногда галтельные участки срезают на фрезерном или токарном станке.

Для испытания стыковых паяных образцов целесообразнее проводить пайку специальных заготовок (рис. 138), состоящих из двух частей, сваренных по контуру, которые после пайки разрезают, и из них изготавливают стыковые образцы типа гагаринских. Преимуществом таких заготовок является возможность точного соблюдения соединительных зазоров.

Испытание паяных соединений на отрыв применяют иногда при внецентренном приложении нагрузки. При этом происходит постепенное разделение (раздир) паяного соединения. Форма образца для этого вида испытания приведена на рис. 139.

Если паяемое изделие должно работать при низких температурах или в условиях глубокого холода, то испытуемые образцы помещают в криостат, устанавливаемый на обычные разрывные или другие испытательные машины. После охлаждения до заданной температуры образец подвергают механическим испытаниям непосредственно в криостате.

Испытаниям на длительную прочность подвергают соединения, предназначенные для эксплуатации при высоких температурах. Длительной прочностью называют сопротивление материала механи-

ческому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки. При этих испытаниях обычно используют то же оборудование, что и при испытаниях на ползучесть. Наиболее удобными для этих целей являются стыковые образцы.

Для определения предела длительной прочности паяных соедине-

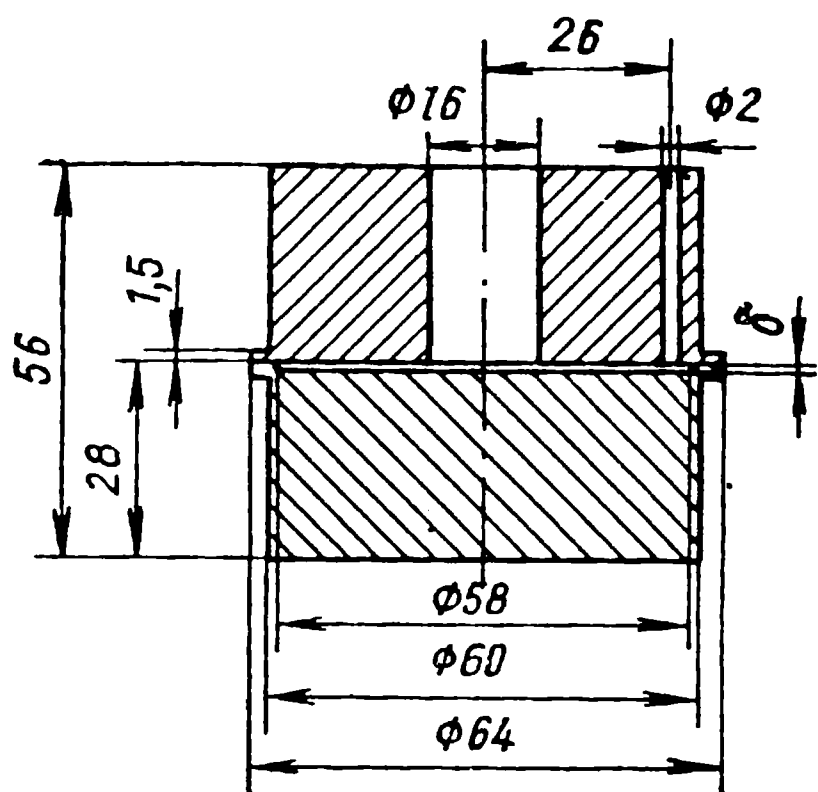


Рис. 138. Заготовка под пайку для получения стыковых паяных образцов

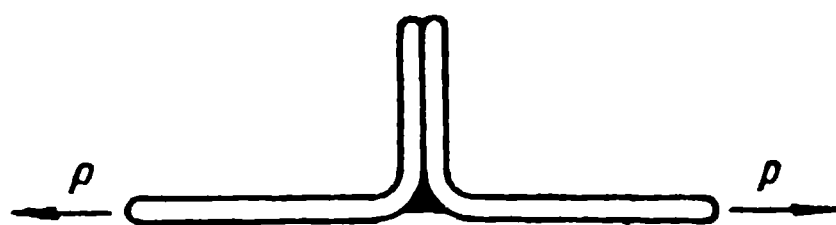


Рис. 139. Образец для испытания паяных соединений на отрыв

ний испытывают при различных нагрузках большое число образцов, нагретых до заданной температуры. При этом каждый образец доводят до разрушения. Полученные данные используют для построения графика зависимости длительной прочности от времени, при помощи которого можно определять предел длительной прочности для заданного времени и температуры.

Прочность паяных соединений при ударных нагрузках обычно определяют на маятниковых копрах. При испытании применяют стандартные образцы без надреза, спаянные встык посередине.

Более сходные результаты получаются при испытании образцов с косостыковым паяным соединением (рис. 140). Несмотря на то что косостыковые соединения употребляются сравнительно редко в образцах для испытания на удар, они наиболее удобны, так как, варьируя углом скоса, представляется возможность менять площадь шва. Ударную вязкость паяного соединения можно оценивать коэффициентом ударной стойкости [55]:

$$k = \frac{a_n}{a'_n},$$

где a_n и a'_n — соответственно ударная вязкость паяного соединения и основного металла.

В малоуглеродистых сталях паяное соединение является работоспособным по отношению к ударным нагрузкам, если коэффициент ударной стойкости не ниже 0,5.

Если паяемое изделие в эксплуатационных условиях подвергается вибрационным и другим повторно-переменным нагрузкам, то паяные соединения, а иногда и сами изделия испытывают на усталость. В ходе испытаний определяют условный предел усталости (выносливости), т. е. наибольшее напряжение, которое может выдержать образец без разрушения при нагружении его заданное число раз (циклов). Оценка паяных соединений на усталостную прочность имеет большое значение, однако методика этого испытания в настоящее время находится в стадии разработки

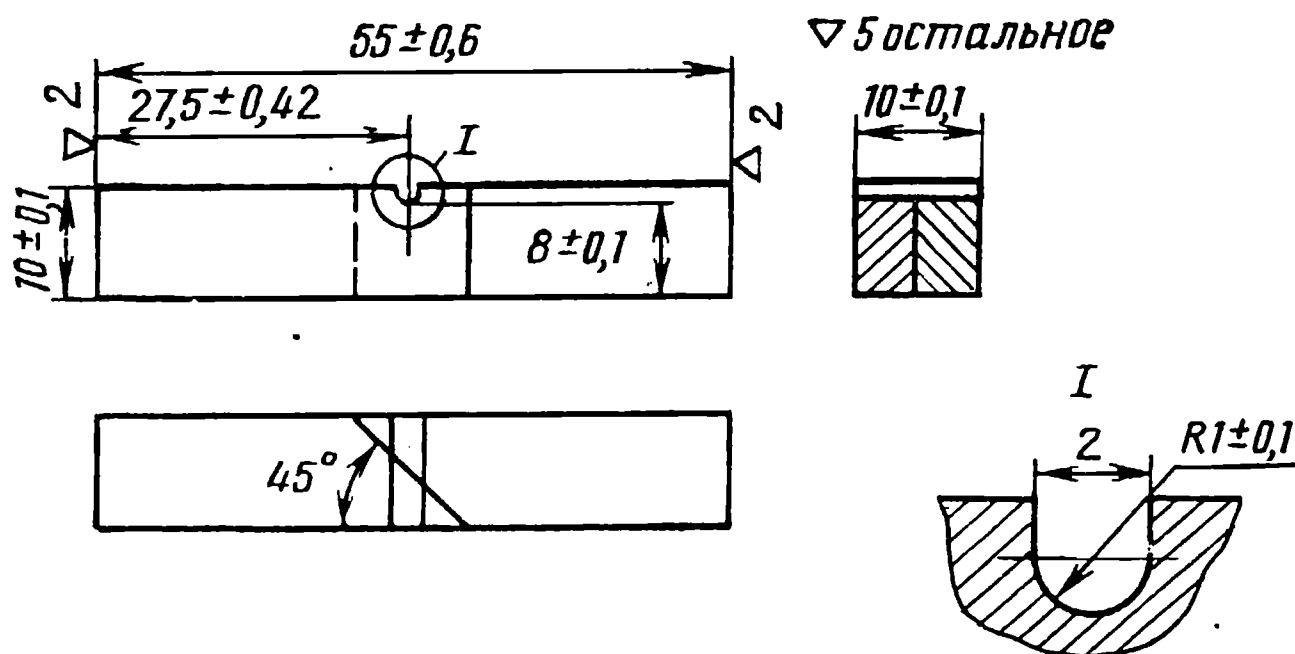


Рис. 140. Образец для испытания паяных соединений на удар

Заготовки образцов для механических испытаний под пайку необходимо обрабатывать только на станках, чтобы обеспечить по соединяемым пайкой поверхностям равномерный зазор. Не допускается вырезать плоские образцы из листа ножницами.

При проведении механических испытаний паяных соединений следует иметь в виду, что сравнивать результаты различных испытаний можно только в том случае, если форма образцов, условия пайки, а также испытаний будут одинаковыми.

Металлографические исследования. При разработке технологии пайки и исследовании свойств паяных соединений широко применяют металлографический анализ, заключающийся в определении микроструктуры шва с помощью оптического или электронного микроскопа. Анализ микроструктур паяных швов имеет некоторые особенности по сравнению с обычными металлографическими исследованиями металлов. При вырезке и обработке образцов из исследуемого паяного соединения в случае малой твердости припоя поверхность его будет несколько ниже поверхности основного металла. При шлифовании такой шов засоряется твердыми частицами, что искажает результаты микроструктурного анализа.

При травлении шлифов ввиду различного электрохимического потенциала зоны сплавления, диффузионных зон и основного металла травимость их будет различной, в итоге микроструктура паяного

шва выявляется неравномерно. Поэтому для получения качественных шлифов их готовят по специальной методике. После обычной обработки шлифа на наждачной бумаге рекомендуется производить кратковременную электрополировку, затем выявлять структуру паяного шва путем применения химического или электролитического травления. Часто структуру основного металла и припоя выявляют последовательным травлением различными реактивами. Составы некоторых травителей приведены в табл. 49 [56].

Т а б л и ц а 49

Паяемый металл	Припой	Составы травителей и их назначение
Низкоуглеродистая сталь	Медь или латунь	1. 4%-ный раствор HNO_3 в спирте. Травитель выявляет структуру стали. 2. Концентрированный раствор аммиака в воде. Травитель выявляет структуру припоя
То же	Оловянносвинцовый	1. 4%-ный раствор HNO_3 в спирте. 2. 1% HNO_3 , 1% CH_3COOH , 98% глицерина. Травители выявляют структуру припоя и промежуточных фаз
Медь и латунь	Серебряный	1. Раствор H_2O_2 в воде. 2. 10%-ный раствор персульфата аммония в воде
То же	Оловянносвинцовый	1. Электротравление в H_3PO_4 (плотность 1,54), плотность тока до $0,5 \text{ а/дм}^2$. Травители выявляют структуру основного металла, припоя и промежуточных фаз. 2. 10%-ный раствор персульфата аммония в воде. Травитель выявляет структуру припоя и промежуточных фаз

Изучение микрошлифа начинается с рассмотрения его в нетравленном виде. При этом на шлифе выявляют мелкие поры, неметаллические включения окислов, флюса, отдельные структурные составляющие. Неметаллические включения обладают меньшей отражающей способностью, чем металлы, поэтому в поле зрения микроскопа они выявляются в виде темных пятен. Чтобы отличить микропоры, которые также выявляются в виде темных пятен от включений, слегка изменяют фокусное расстояние, поворачивая микрометрический винт микроскопа. При этом края микропор то сходятся, то расходятся, что не наблюдается при рассмотрении неметаллических включений.

После просмотра нетравленного шлифа его подвергают травлению. Травленные шлифы обычно рассматривают при увеличении микроскопа в 100—1500 раз. На шлифе изучают структуру зоны сплавления,

диффузионной зоны и основной металл, а также мелкие дефекты, которые выявляются после травления. Особое внимание обращают на характер структурных составляющих, расположенных в зоне спаев, так как это в значительной части определяет прочность паяного соединения.

При высоких температурах в процессе пайки происходит интенсивное взаимодействие между основным металлом и припоем, о чем можно судить по микроструктуре шва. На рис. 141 приведена микрострук-

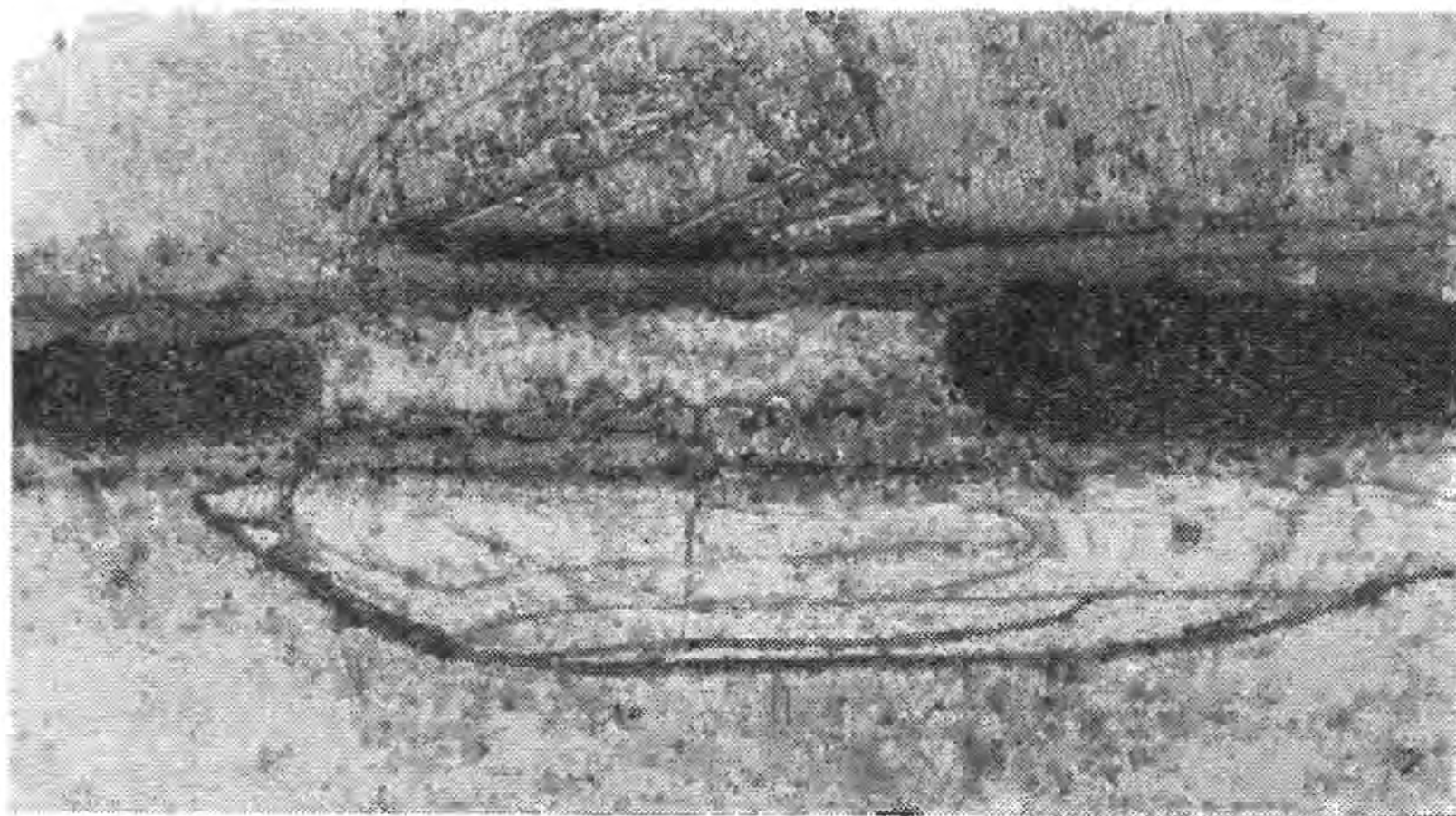


Рис. 141. Микроструктура шва при пайке меди припоем ПСр 72 в вакууме $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Температура пайки 850°C , выдержка 1 мин, $\times 250$

тура шва, полученного при пайке меди припоем ПСр72 в среде водорода в условиях значительного перегрева. В результате парообразования в шве оказались полости, не заполненные припоем. В процессе пайки происходило значительное растворение основного металла в расплаве припоя, о чем можно судить по прикристаллизованным слоям твердого раствора на основе меди. В том месте шва, где произошло заполнение зазора припоем, серебро из него интенсивно диффундировало в медь, в результате чего образовались диффузионные зоны в виде отдельных изолированных участков.

На рис. 142 приведена микроструктура зоны спая при пайке стали ВСт.3 припоем ВЗМИ-49 в среде водорода (косой срез). Ввиду высокого содержания углерода в припое и активного взаимодействия в зоне спаев в шве образовались развитые диффузионные зоны (1), прикристаллизованный слой твердого раствора (2) на основе железа, легированного марганцем, никелем и медью. Легкоплавкая составляющая зоны сплавления (3) оттеснена в центральную часть шва.

Электронномикроскопические исследования паяных швов применяются, когда необходимо выявить более тонкую структуру отдельных зон шва.

На рис. 143 приведена микроструктура зоны спая меди с серебром, полученного путем контактного плавления. Применение электронного микроскопа позволило выявить природу образования жидкой фазы в этой системе при контактном плавлении. Из микроструктуры можно видеть, что жидкая фаза возникает в диффузионной зоне в отдельных зернах серебра (шаровидные включения). Механизм образования жидкой фазы связан с диффузией в серебро атомов меди, которые в диффузионной зоне распределяются не равномерно, а объединяются, образуя включения. Если количество меди в этих включениях достигает концентрации, соответствующей насыщенным твердым растворам, то происходит плавление их и образование в диффузионной зоне в зернах серебра мельчайших капелек расплава медь—серебро, которые можно видеть на рис. 143 [57].



Рис. 142. Микроструктура зоны спая при пайке стали ВСт.3 припоем ВЗМИ49 в среде водорода. Температура пайки 1120°C , выдержка 1,5 мин, $\times 70$ (косой срез)

При исследовании паяных швов одновременно с микроанализом часто измеряют микротвердость отдельных структурных составляющих зоны сплавления, диффузионных зон и основного металла с помощью прибора микротвердости ПМТ-3.

Наряду с перечисленными средствами исследования структуры паяных швов применяют микрорентгеновский анализатор, позволяющий определять химический состав в любой точке паяного шва и высокотемпературный микроскоп с тепловым травлением шлифов, а также дифрактометрический анализ и метод радиоактивных изотопов для более глубокого изучения процессов диффузии в паяных соединениях.

Коррозионные испытания. Коррозионные испытания паяных образцов и изделий проводят с целью определения пригодности их для продолжительной работы в условиях эксплуатации. Испытания на коррозионную стойкость паяных изделий делят на три группы: лабораторные, в эксплуатационных условиях, натурные.

Осмотром устанавливают качественную оценку коррозионной стойкости. При количественной оценке образцы взвешивают, определяют механические свойства, исследуют структуру.

Осмотром устанавливают качественную оценку коррозионной стойкости. При количественной оценке образцы взвешивают, определяют механические свойства, исследуют структуру.

Коррозионную стойкость паяных соединений при электрохимической коррозии обычно устанавливают:

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

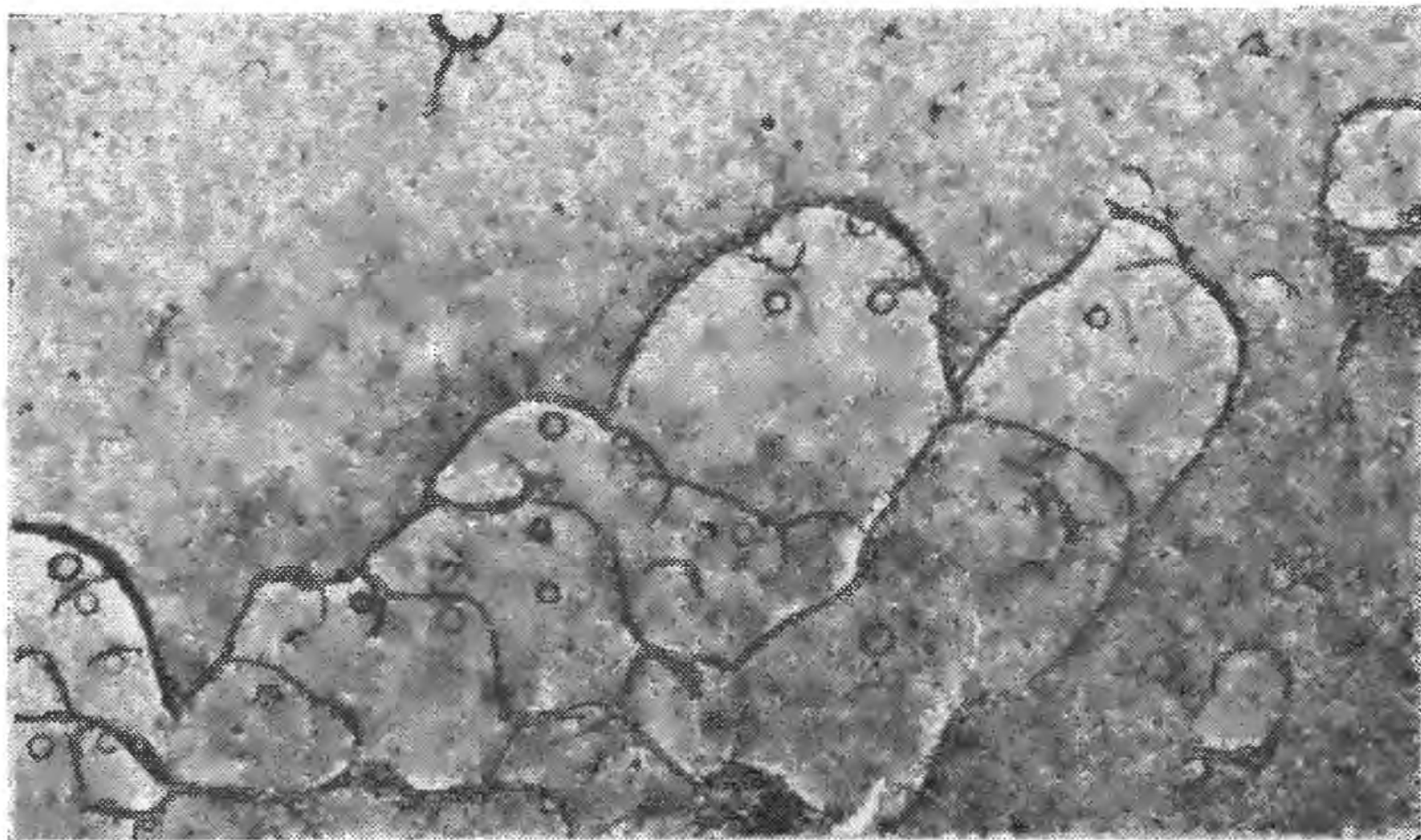


Рис. 143. Граница серебро — зона сплавления при контактно-реакционной пайке в водороде меди с серебром. В зернах серебра включения эвтектики серебро — медь. Температура пайки 779°C , $\times 2200$

Условия испытания определяются требованиями к паяному изделию. Их обычно устанавливают сходными с теми, в которых изделие будет работать в условиях эксплуатации. Часто их берут более жесткими, чтобы обеспечить надежность изделия и ускорить испытания.

Соединения, паянные жаропрочными припоями, можно испытывать в условиях высоких температур при воздействии различных газовых сред.

Глава XI

ОРГАНИЗАЦИЯ ПАЯЛЬНЫХ РАБОТ

§ 1. Рабочее место паяльщика

Организация труда включает систему мероприятий, направленных на создание наиболее благоприятных условий для рационального использования техники и рабочего времени в интересах повышения

производительности труда и роста производства. Содержание организации труда и его технического нормирования определяется условиями производства на данном предприятии и прежде всего его технической базой. Наиболее полное использование новой техники может быть только в том случае, если формы организации труда соответствуют техническому уровню предприятия, а нормы затрат рабочего времени являются технически обоснованными. Исходя из этого, прогресс техники вызывает необходимость непрерывного совершенствования организации труда и его технического нормирования. Одновременно применение более совершенных форм организации труда и методов его нормирования способствует развитию технического уровня производства. Процесс совершенствования организации производства на социалистических предприятиях осуществляется планомерно, в соответствии с текущими и перспективными планами. Основными задачами организации труда являются:

1. Обеспечение постоянного роста производительности труда.
2. Улучшение и облегчение условий труда.
3. Систематическое повышение культурно-технического уровня трудящихся.
4. Повышение сознательной трудовой дисциплины.
5. Широкое развитие социалистического соревнования трудящихся и особенно его наиболее высокой формы — движения за коммунистический труд.

Основными направлениями в области улучшения организации труда являются: внедрение передовых методов труда, рациональное распределение рабочих по сменам, проведение инструктажа рабочих, уплотнение рабочего дня, обеспечение лучшего использования техники производства, укрепление трудовой дисциплины, повышение квалификации рабочих, осуществление мероприятий по охране труда и технике безопасности.

При подготовке производства паяных изделий наряду с общими мероприятиями и организацией непосредственно процессов сборки и пайки необходимо обеспечить тщательную подготовку заготовок, обработку и контроль готовых изделий, а также снабжение производства припоями, флюсами, газовыми средами и другими необходимыми при пайке материалами.

Заготовку под пайку можно получить механической обработкой, литьем, штамповкой и другими методами. Эти методы выбирают в зависимости от требуемой точности и чистоты обработки соединяемых поверхностей, диктуемых назначением деталей и методом пайки. Так, для пайки-сварки можно применять более грубую обработку соединяемых поверхностей. Для капиллярной же пайки требуется более высокая чистота обработки.

Заготовки для паяных изделий, как правило, поступают в цех или на участок пайки обработанными. Перед пайкой их очищают. Для этого применяют пескоструйную или гидropескоструйную обработку, травление, а в индивидуальном производстве также зачистку металлической щеткой, напильником, наждачной бумагой и т. п. Пескоструйную обработку заготовок под пайку необходимо произво-

дить в отдельной камере, так как в камерах, где производится обработка литья, поковок или штамповок, трудно обеспечить высокое и стабильное качество обрабатываемых поверхностей. Сухая пескоструйная обработка законодательством по охране труда запрещена. Гидропескоструйная обработка поверхностей — более гигиеничный способ, так как не вызывает пылеобразования.

Травление перед пайкой является прогрессивным и наиболее производительным способом очистки поверхностей деталей. Этот способ отвечает условиям массового производства и обеспечивает высокое и стабильное качество очистки. Травление производится в цехах гальванических покрытий.

Способы очистки поверхности деталей перед пайкой с помощью металлической щетки, напильника, наждачной бумаги и т. п. применяют только в индивидуальном и мелкосерийном производстве при небольшом объеме пайки. Качество обработки поверхности при применении этих методов неодинаковое. При применении металлической щетки, например, происходит втирание окислов и загрязнений в микropopы металла, что ухудшает смачивание ее флюсами и припоями. Зачистка напильником и наждачной бумагой обеспечивает удовлетворительную подготовку поверхности.

В зависимости от технологии изготовления паяных изделий перед пайкой наносят иногда технологические или барьерные покрытия, а также покрытия припоями. Эти покрытия наносят в гальванических цехах путем напыления и плакирования.

Сборку под пайку производят в отдельном хорошо освещенном помещении, которое необходимо выбирать таким образом, чтобы операция сборки входила в общий технологический поток. При изготовлении паяных конструкций наиболее часто производят полную сборку изделия, после чего следует пайка. При применении ступенчатой пайки можно предварительно производить сборку и пайку отдельных узлов, после чего следует полная сборка изделия и окончательная пайка припоем с более низкой температурой плавления. При сборке необходимо шире применять технологическую оснастку, которая позволяет повысить производительность труда и улучшить качество изделий. В единичном и мелкосерийном производстве оснастка может быть универсальной; в крупносерийном и массовом производстве необходимо применять узкоспециализированную технологическую оснастку.

При организации цеха или участка пайки необходимо предусматривать наиболее прогрессивные способы пайки и применять наиболее совершенное оборудование. При выборе способа пайки и оборудования необходимо исходить из требований к качеству изделия, соображений экономики и условий безопасной работы.

Рабочее место является первичным звеном организации производственного процесса. Организация и оснащение рабочих мест паяльщика зависят от степени их специализации и характера труда, выполняемого на данном рабочем месте. Наиболее полно специализация рабочего места выражена в массовом производстве, где за каждым рабочим местом закреплена лишь одна операция. В серийном произ-

водстве специализация выражена в меньшей степени. За каждым рабочим местом закреплено уже несколько однородных операций. В единичном производстве специализация рабочих мест отсутствует, они приобретают универсальный характер.

В зависимости от степени специализации применяют и оборудование: специальное для определенных операций, специализированное для выполнения технически однородных операций и универсальное для выполнения определенного комплекса разнородных операций. Качество паяных изделий наряду с применяемым оборудованием зависит от многих факторов: технологичности конструкции, обработки заготовок, качества припоев и флюсов, способа пайки, квалификации рабочих и культуры производства. Чтобы обеспечить высокое качество продукции, технологи-паяльщики должны активно участвовать во всех этапах создания паяной конструкции, начиная с проектирования и кончая выпуском готовой продукции.

При организации производства паяных изделий необходимо осуществлять мероприятия по экономии припоев, флюсов и газовых сред, так как это является существенным фактором снижения себестоимости продукции. Экономия может быть достигнута при правильном конструировании паяных изделий, при технически обоснованном выборе припоев, флюсов и газовых сред, при применении расчетных норм их расхода. При выборе припоев необходимо учитывать также их стоимость и в случаях пайки неответственных конструкций применять менее дефицитные и более дешевые припои.

Широкое внедрение в машиностроение пайки вызывает необходимость проведения экспериментальных работ в условиях производства. Поэтому на предприятиях с большим объемом пайки должна быть предусмотрена лаборатория пайки или самостоятельная группа в металлургической лаборатории или лаборатории сварки. На отдельных предприятиях целесообразно бывает организовать экспериментальные участки для освоения новых методов пайки, проверки технологических рекомендаций и отработки опытных конструкций.

§ 2. Техническое нормирование пайки

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

1. Наименьшая трудоемкость сборки и пайки, для чего должны применяться передовые способы пайки и высокопроизводительное оборудование.

2. Сокращение количества рабочих, занятых в технологическом процессе сборки и пайки, что достигается совмещением профессий и обслуживанием одним рабочим нескольких установок.

3. Минимальная продолжительность работ в соответствии с количеством изделий, установленным на программу.

4. Наименьший расход материалов и энергии, потребных для изготовления заданной продукции при обеспечении высокого качества изделий.

Разработке технологического процесса сборки и пайки иногда предшествует расчленение изделия на узлы или отдельные детали с тем, чтобы проводить сборку и пайку на отдельных рабочих местах. Технологический процесс сборки и пайки разрабатывают в зависимости от типа производства. В единичном производстве можно ограничиться составлением маршрутных ведомостей. В мелко- и среднесерийном производстве (в отделах, цехах или на участках сборки и пайки) для сложных изделий составляют технологические карты, а для простых — маршрутные ведомости. Для изделий крупносерийного и массового производства необходимо составлять подробные технологические карты, которые при массовом производстве дополняют еще инструкционными картами по каждой операции.

В маршрутные ведомости включают следующие данные:

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

7. Нормы времени на выполнение каждой операции.

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

1. Последовательный перечень основных, вспомогательных и контрольных операций с подразделением на переходы и все необходимые сведения по каждому переходу.
2. Нормы времени по каждому переходу и операции в целом, а также расход припоев, флюсов, газовых сред и других материалов.
3. Эскизы паяемых узлов с указанием последовательности сборки и пайки.

Инструкционные карты, применяемые в массовом производстве, составляют подобно технологическим картам, но отдельно на каждую операцию или несколько операций с эскизами и подробным описанием каждого перехода. В технологические ведомости и в технологические и инструкционные карты, о режиме пайки включаются следующие данные:

1. Температура пайки. При пайке в печи указывается температура предварительного разогрева печи.
2. Продолжительность выдержки.
3. Скорость нагрева.
4. Давление на соединяемые элементы изделия в процессе пайки.
5. Скорость охлаждения.

Нормированию при разработке технологии пайки подлежат:

1. Продолжительность работ по каждой операции и каждому переходу.

2. Количество и квалификация рабочих для выполнения каждой операции.

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

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

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

$$t_{шт} = t_o + t_v + t_{об} + t_{отд},$$

где t_o — основное или технологическое время, затрачиваемое непосредственно на процесс пайки;

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

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

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

Сумма основного и вспомогательного времени составляет оперативное время:

$$t_{оп} = t_o + t_v.$$

Подготовительно-заключительным временем $t_{п.з}$ называют время, затрачиваемое на ознакомление с заданием, чертежами, технологическим процессом, на подготовку оборудования и приспособлений перед работой и на завершение работ в конце рабочего дня. В условиях массового и крупносерийного производства подготовительно-заключительное время незначительно; оно включается в штучную норму времени в составе времени на обслуживание рабочего места.

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

При определении норм времени на процесс сборки и пайки основным должен быть расчетно-аналитический метод нормирования. Этот метод можно применять на предприятиях всех типов: массового, крупносерийного, мелкосерийного и единичного производства. Глубокий анализ технологического процесса при расчетно-аналитическом методе нормирования позволяет установить рациональную структуру операций и применить наиболее передовые формы организации труда и обслуживания рабочего места. Норму времени, необходимого для выполнения заданной операции при этом методе, определяют расчетным путем, исходя из условий сборки, режима

пайки, технических характеристик оборудования и характера производства.

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

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

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

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

$$G = G_{п. д} \frac{100}{100 - a},$$

где G — расход припоя, кг;

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

a — процент угара и других безвозвратных потерь припоя.

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

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

где F — площадь шва, см²;

l — величина соединительного зазора, см;

ρ — плотность припоя, г/см³;

φ — коэффициент, учитывающий потери припоя за счет наплывов в паяном соединении.

Коэффициент ϕ в зависимости от способа пайки и условий производства принимают равным 1,2—1,8.

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

Норму расхода припоя на заполнение зазора определяют из соотношения

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

где F — площадь шва, $см^2$;
 q — норма расхода, $г/см^2$.

Норму расхода припоя на образование галтелей определяют из соотношения

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

где l — протяженность галтелей в паяном соединении, $см$;
 q' — удельная норма расхода припоя на галтель, $г/см$.

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

$$G = Q + Q'.$$

Удельные нормы расхода серебряных припоев (в $г$) на заполнение зазора, отнесенные к 1 см^2 шва, приведены в табл. 50 [37].

Т а б л и ц а 50

Величина зазора <i>мм</i>	Марка припоя					
	ПСр10	ПСр12	ПСр25	ПСр45	ПСр65	ПСр70
0,01	0,0089	0,0088	0,0093	0,0097	0,0100	0,0102
0,05	0,0447	0,0442	0,0463	0,0484	0,0499	0,0510
0,10	0,0894	0,0884	0,0926	0,0967	0,0998	0,1019
0,15	0,1342	0,1326	0,1388	0,1451	0,1498	0,1529
0,20	0,1789	0,1768	0,1851	0,1934	0,1997	0,2038
0,25	0,2236	0,2210	0,2314	0,2418	0,2496	0,2548

Удельные нормы расхода серебряных припоев (в $г$) на образование 1 пог. см галтелей приведены в табл. 51.

В случае пайки-сварки норму расхода припоя подсчитывают по методике, аналогичной применяемой для расчета расхода присадочного материала при сварке плавлением.

При лужении массу полуды (в $кг$) определяют по формуле

$$G_{\text{п}} = F_{\text{п}}l_{\text{п}}\rho \cdot 10^{-3},$$

где $F_{\text{п}}$ — поверхность детали, подвергаемая лужению, $см^2$;
 $l_{\text{п}}$ — толщина слоя полуды, $см$;
 ρ — плотность припоя, $г/см^3$.

Толщина соеди- няемых элемен- тов, мм не более	Размер галтели, мм	Марка припоя					
		ПСр10	ПСр12	ПСр25	ПСр45	ПСр65	ПСр70
0,2	0,2×0,2	0,0018	0,0018	0,0018	0,0019	0,0020	0,0020
0,3	0,3×0,3	0,0040	0,0040	0,0042	0,0044	0,0045	0,0046
0,4	0,4×0,4	0,0072	0,0071	0,0074	0,0077	0,0080	0,0082
0,5	0,5×0,5	0,0107	0,0106	0,0111	0,0116	0,0120	0,0122
0,6	0,6×0,6	0,0161	0,0159	0,0167	0,0174	0,0180	0,0183
0,7	0,65×0,65	0,0188	0,0286	0,0194	0,0203	0,0210	0,0214
0,8	0,7×0,7	0,0214	0,0212	0,0222	0,0232	0,0240	0,0244
0,9	0,75×0,75	0,0250	0,0248	0,0259	0,0271	0,0279	0,0285
1,0	0,8×0,8	0,0286	0,0283	0 0296	0,0309	0,0319	0,0326

Толщина слоя полуды при лужении на автоматических агрега-тах определяется режимом работы агрегата. Так, при лужении ленты перед заливкой баббитом толщина слоя полуды принимается равной 0,003 мм, при лужении радиаторных трубок в трубочной машине 0,015 мм. При лужении методом погружения автомобиль-ных подшипников перед залив-кой их баббитом на центробежных машинах или на машинах для литья под давлением толщина слоя полуды составляет 0,07 мм.

Т а б л и ц а 52

Марка припоя	Норма рас- хода, г на 1 м ² площа- ди	Средняя толщина слоя по- луды, мм
ПОС40	511,0	0,07
ПОС30	678,0	0,07
ПОССу4-6	759,0	0,07

Удельные нормы расхода при-поев при лужении автомобильных подшипников методом погружения приведены в табл. 52.

Суммарные потери при лужении на угар припоя в ванне и меха-нические потери составляют в среднем 10%.

Нормы расхода флюсов при пайке подсчитывают, исходя из площади шва. Ниже приведены данные по расходу флюсов на еди-ницу площади шва (г/см²) при пайке низкотемпературными при-поями [4]:

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

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

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

В нашей стране имеются широкие возможности для создания здоровых условий труда и полной ликвидации производственного травматизма. Для этого наряду с общегосударственными мероприятиями необходимо, чтобы каждый инженер, техник и рабочий знали правила техники безопасности и выполняли их.

Одной из важных задач подъема народного благосостояния является всемерное оздоровление и облегчение условий труда. На всех предприятиях проводятся работы по внедрению современных средств техники безопасности и обеспечению санитарно-гигиенических условий, устраняющих производственный травматизм и профессиональные заболевания. Постепенно предприятия переводят на работу в одну смену, за исключением тех, где круглосуточная работа обусловливается технологическими процессами или необходимостью обслуживания населения.

Техника безопасности на производстве должна быть неразрывно связана с технологией производства. Изменение технологических процессов, внедрение новых материалов и способов производства, применение нового оборудования одновременно должно вызывать и соответствующие изменения в технике безопасности.

§ 1. Производство припоев и флюсов

При производстве припоев и флюсов путем сплавления из компонентов основными факторами, вызывающими вредное воздействие на организм человека, являются: высокая температура расплавленных металлов и флюсов, а также выделение вредных паров, газов и пыли. Наиболее вредное воздействие оказывают выделяющиеся при производстве припоев и флюсов пары металлов и солей, которые, попадая в организм человека, вызывают общее отравление, поражение кожи, раздражение слизистой оболочки глаз и т. п.

При приготовлении шихты и плавке в зависимости от состава припоев и флюсов могут выделяться пыль, пары металлов, окислов, солей и других веществ. Из металлов, входящих в состав припоев, наиболее вредное воздействие на организм человека оказывают литий, калий, натрий, кадмий, бериллий, свинец, марганец и цинк. Кадмиевая пыль, пары и окислы кадмия являются особенно вредными. Они вызывают острое отравление, поражают дыхательные пути и нервную систему. При выплавке припоев, содержащих кадмий, необходимо особенно остерегаться вдыхания паров кадмия. Для предупреждения отравления кадмием требуется местная вытяжная вентиляция или применение индивидуальных противогазов.

Бериллий оказывает на организм человека особо вредное воздействие. Его добавляют иногда в припой для пайки алюминиевых и магниевых сплавов. Проникая через дыхательные пути и поры кожного покрова, бериллий вызывает отравление. Поэтому при

выплавке припоев, содержащих бериллий, необходима местная вентиляция и соблюдение других мер предосторожности против попадания бериллиевой пыли и паров бериллия в организм.

При выплавке оловянносвинцовых и других припоев, содержащих свинец, необходимо принимать меры, предупреждающие попадание в организм паров свинца. При длительном воздействии на организм свинец вызывает отравление, выражающееся в развитии малокровия и расстройстве нервной системы. При выплавке припоев, содержащих марганец, происходит его испарение. Пары и пыль марганца ядовиты и при длительном воздействии на организм вызывают сильное отравление.

При выплавке флюсов особое внимание необходимо обращать на предупреждение вредного воздействия на организм фтористых солей щелочных и щелочноземельных металлов. Отравляющее действие фтора и его соединений наиболее опасно при вдыхании паров.

Хлористый цинк в случае длительного воздействия на кожу вызывает сильные ожоги и воспаления. Хлористый аммоний при температуре свыше 100° С начинает улетучиваться, образуя ядовитые пары. Поэтому выплавку флюсов, содержащих эти компоненты, необходимо производить только при наличии местной вентиляции. При производстве флюсов путем смешения компонентов необходимо также соблюдать меры предосторожности. Например, соляная кислота, применяемая в качестве флюсов или входящая в состав многокомпонентных флюсов, при попадании на кожу вызывает ожоги, пары ее ядовиты.

Водные растворы кислот, солей и щелочей, попадая на кожу, также вызывают ожоги, а при вдыхании паров этих веществ возникает раздражение слизистой оболочки носа и верхних дыхательных путей. Поэтому приготовление флюсов путем смешения компонентов необходимо производить в резиновых перчатках, защищать глаза и кожу лица от брызг, применять индивидуальную вытяжную вентиляцию. Ниже приведены предельно допустимые концентрации ядовитых газов, паров и пыли в воздухе производственных помещений, мг/дм³.

Аммиак	0,02	Серная кислота и серный ангидрид	0,002
Ацетон	0,2	Серный ангидрид (серный газ)	0,02
Марганец и его соединения в пересчете на MnO ₂ . .	0,0003	Фосфорный ангидрид . . .	0,001
Мышьяковистый водород . .	0,0003	Фосфор желтый	0,00003
Окислы азота в пересчете на N ₂ O ₅	0,005	Дихлорэтан	0,05
Окись цинка	0,005	Трихлорэтилен	0,05
Свинец и его неорганические соединения, за исключением сернистого свинца	0,00001	Четыреххлористый углерод	0,05
Свинец сернистый	0,0005	Хлористый водород и соляная кислота	0,01
Сероводород	0,01	Хромовый ангидрид, хроматы, бихроматы	0,0001

Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий изложены в нормали СН 245—71, утвержденной Государственным комитетом по делам строительства Совета Министров СССР.

При выплавке припоев и флюсов плавильщик должен пользоваться труднозагорающейся одеждой и темными очками, предохраняющими глаза от действия лучистой энергии и брызг металла и солей. Необходимо, чтобы помещение, в котором производится плавление припоев и флюсов, имело приточно-вытяжную вентиляцию.

Перед введением в расплавы металлы и соли необходимо подогреть до полного удаления влаги. В противном случае за счет резкого парообразования в момент введения компонентов, содержащих влагу, возможен выброс или разбрызгивание расплавленных металлов и солей. При плавлении гигроскопических флюсов ложку-шумовку или стержень, которыми перемешивают расплав и удаляют шлак, перед погружением в расплав подогревают с целью удаления влаги с поверхности. При несоблюдении этой предосторожности также возможно разбрызгивание солей.

Присадку легко испаряющихся или легко выгорающих компонентов припоев и флюсов необходимо производить в последнюю очередь, когда сплав уже приготовлен. После их введения сплав нельзя перегревать, так как это усилит их испарение. При разливке припоев и флюсов во избежание взрывов изложницы или формы для припоев должны быть чистыми и подогретыми до полного удаления влаги.

§ 2. Подготовка к пайке и производство паяльных работ

При подготовке заготовок к пайке применяют механические способы зачистки и травление. При использовании механических способов рекомендуется применять вращающиеся барабаны, гидропескоструйные установки, дробеструйные камеры. Очистительные установки необходимо располагать в отдельных помещениях, оборудованных мощной вытяжной вентиляцией с очистным устройством. Если камера установлена в помещении цеха, то необходимо обеспечить соответствующее уплотнение ее двери и люков, исключая возможность попадания пыли в общее помещение.

В случае травления заготовок травильное отделение необходимо также располагать в отдельном помещении. Работать с кислотами и щелочами необходимо в резиновых перчатках и кислотоустойчивой одежде. Лицо необходимо защищать от брызг защитными очками или экраном из целлулоида или органического стекла.

При попадании брызг кислоты или щелочи на кожу пораженное место необходимо немедленно промыть водой. Температура растворов в ваннах не должна быть выше установленной по технологии, так как при повышении температуры усиливается испарение и воздух в помещении цеха сильно загрязняется. Для снижения концентрации паров кислот и щелочей в воздухе, кроме вытяжного зонта, над каждой травильной ванной необходимо устраивать бортовые отсосы.

При применении растворителей для очистки заготовок также необходимо соблюдать правила техники безопасности. Четыреххлористый углерод при применении его для очистки и обезжиривания деталей испаряется с выделением вредных газов, поэтому пользоваться им не следует. Детали, обезжиренные углеводородами, следует перед пайкой полностью просушить, так как продукты их разложения могут быть токсичными. Некоторые растворители, например бензол и газолин, огнеопасны и ядовиты, поэтому применения их необходимо избегать. Пары трихлорэтилена и тетрахлорэтилена при нагреве диссоциируют с образованием ядовитых свободных галогенов и фосгена. Кроме того, пары этих растворителей тяжелее воздуха и могут распространяться на значительные расстояния от места очистки.

При выборе химических очистителей необходимо прежде всего определить содержание в их составе огнеопасных веществ и возможность выделения при нагреве ядовитых паров и газов, и только после этого решать вопрос о возможности их применения и предусматривать мероприятия по технике безопасности.

При сборке под пайку инструмент необходимо применять только по назначению. При пайке с флюсами при нанесении их на соединяемые места нужно пользоваться кистью или фарфоровой лопаточкой. Необходимо избегать попадания флюса на кожу рук. Порошкообразные флюсы в целях уменьшения распыливания необходимо смешивать с соответствующими растворителями и применять в виде паст.

При пайке оловянносвинцовыми припоями возникает опасность загрязнения свинцом кожи рук и одежды работающих. Концентрация свинца в воздухе на рабочих местах паяльщиков может достигать $0,1 \text{ мг/м}^3$. Поэтому в цехах с большим объемом пайки необходимо проводить профилактические мероприятия. Для участков пайки и монтажа, сопровождающегося пайкой, следует отводить отдельные помещения. Рабочие поверхности оборудования необходимо покрывать легкообмываемыми материалами, стационарные места пайки оборудовать местными вытяжными устройствами, обеспечивающими скорость воздуха непосредственно на месте пайки не менее $0,6 \text{ м/сек}$. Помещения, в которых производится пайка, должны обеспечиваться приточным воздухом, подаваемым в верхнюю зону, в количестве примерно 90% удаляемого объема.

В процессе пайки припоями на основе других металлов вредные пары и газы могут образовываться или в результате сгорания загрязнений, имеющихся на поверхности паяемых деталей, или при нагреве флюсов и припоев. Все эти испарения загрязняют атмосферу, поэтому необходимо применять меры для их удаления. Наиболее вредны испарения галоидных флюсов, особенно содержащих фториды. Нужно следить, чтобы все склянки с флюсами, содержащими соединения фтора, имели наклейки с указанием мер предосторожности при их применении.

Нельзя допускать образования ядовитых паров или пыли кадмия, свинца и цинка, особенно когда эти металлы применяются в чистом

виде, например в качестве покрытий. В многокомпонентных припоях вредное действие этих металлов снижается. При пайке нельзя допускать перегрева припоев, усиливающего испарение его отдельных компонентов.

При пайке с применением газовых сред следует иметь в виду, что некоторые из них дают с воздухом взрывоопасные смеси. Поэтому перед нагревом контейнера реторты или печи с такой атмосферой необходимо продуть их чистым воздухом. Чтобы предупредить проникновение в пространство печи атмосферного воздуха и, следовательно, образование взрывоопасной смеси, в ней необходимо поддерживать небольшое избыточное давление с тем, чтобы скорость истечения газа была выше, чем скорость горения в факеле. Необходимо также предупреждать утечку контролируемых газовых сред через неплотности в трубопроводах и соединениях.

Места утечки можно выявить путем смачивания подозрительных мест мыльной водой. При пайке с газообразными флюсами необходимо следить за тем, чтобы они полностью удалялись вытяжной вентиляцией. Во избежание отравления газами установки для получения контролируемых атмосфер необходимо размещать в отдельном хорошо вентилируемом помещении.

Для предупреждения взрывов при выполнении паяльных работ запрещается производить пайку сосудов, находящихся под давлением, а также емкостей из-под легко воспламеняющихся материалов без предварительной обработки.

§ 3. Эксплуатация оборудования

Кроме мероприятий по технике безопасности при обработке заготовок и пайке, должны быть предусмотрены мероприятия, обеспечивающие безопасную работу при эксплуатации оборудования. На участке пайки должна быть инструкция по технике безопасности, знание и выполнение которой для всех работающих на участке обязательно. Важнейшие указания по технике безопасности должны быть оформлены в виде плакатов и вывешены на видных местах.

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

Почти все способы нагрева при пайке связаны с применением электрического тока. Поэтому при выполнении паяльных работ, монтаже или исправлении неполадок имеется опасность поражения электрическим током. Характер и степень поражения зависят от величины тока. Ток до 0,002 а переносится человеком безболезненно. Ток до 0,05 а вызывает болевые ощущения и является опасным. Ток выше 0,05 а может привести к смертельному исходу. С повышением напряжения опасность поражения током усиливается. Ввиду непостоянства сопротивления человеческого организма прохождению электрического тока, а также сопротивления одежды и

обуви трудно точно определить опасное для жизни человека напряжение. При нормальных условиях работы, исправной и сухой одежде и обуви в сухих помещениях напряжение ниже 36 в считается безопасным. В сырых помещениях опасным является уже напряжение свыше 12 в. Наиболее опасно включение сразу к двум фазам электрической цепи. Через организм человека в этом случае протекает ток 220 или 380 в, что может привести к смертельному исходу.

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

1. Корпуса источников питания, корпуса машин для контактной пайки заземлять.

2. В машинных и ламповых генераторах высокочастотных установок все металлические части и вторичный виток нагревательного контура заземлять.

3. Все устройства для подключения и переключения электрических цепей защищать кожухами.

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

5. Не проводить какие бы то ни было работы в установках, находящихся под напряжением.

6. Следить, чтобы номинальный ток плавких предохранителей не превышал указанного в электрической схеме.

Правила технической эксплуатации электрооборудования промышленных предприятий регламентированы Государственной инспекцией по промэнергетике и электронадзору.

Для предупреждения взрывов газовых смесей необходимо следить за герметичностью газовых систем. Применять арматуру и приборы только установленного образца. Не допускать образования в печах взрывоопасных концентраций газовых смесей. Постоянно следить за исправностью газового оборудования.

При пайке в соляных ваннах паяемые детали во избежание засорения ванны необходимо очищать от загрязнений. Для предупреждения выброса расплавленных солей детали перед погружением нужно подогреть до полного удаления влаги. В случае прорыва тигля под ним должен быть предусмотрен сток солей в аварийный сборник. Над каждой ванной должна быть местная вентиляция.

При применении пайки погружением в расплавленные припой паяемые детали перед погружением также должны быть подогреты до полного удаления влаги, во избежание выброса расплавленного металла.

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

ИНТЕРМЕТАЛЛИДЫ В ПРИПОЯХ И ПАЯНЫХ ШВАХ

При выплавке припсев в результате химических реакций между отдельными элементами, входящими в состав шихты, и при пайке в процессе межфазного взаимодействия между компонентами основного металла и расплава припоя возможно образование интерметаллических соединений.

При пайке интерметаллиды могут образовываться на подложке в результате непосредственного взаимодействия на межфазной границе, выделяться на поверхности основного металла при кристаллизации расплава в шве, находиться в зоне сплавления в виде отдельных сосредоточенных или относительно равномерно распределенных включений.

Интерметаллидные прослойки, отлагающиеся на поверхности основного металла, имеют свою собственную кристаллическую структуру, отличающуюся от кристаллической структуры основного металла и припоя, поэтому прочность в зоне спаев при наличии таких прослоек как правило, резко снижается. В таких случаях, с целью предупреждения химического взаимодействия между твердым и жидким металлами с образованием интерметаллидов, на поверхность основного металла наносят барьерные покрытия. В качестве барьерных покрытий применяют металлы, которые образуют на подложке плотный и прочно связанный с ней слой, хорошо смачиваемый расплавом припоя и не растворяемый в процессе пайки. В приводимой таблице¹ указаны составы стабильных при комнатной температуре интерметаллидов, образующихся при взаимодействии между отдельными, применяемыми при пайке, элементами. Данные об интерметаллидах, образующихся при взаимодействии других элементов, входящих в состав паяемых металлов и припоев, можно найти в книге Н. И. Корнилова, Н. М. Матвеевой, Л. И. Пряхиной, Р. С. Поляковой «Металлохимические свойства элементов периодической системы». М., «Наука» 1966.

Обозначения: г. ц. п. у.— гранецентрирования плотной упаковки; о. ц. к.— объемцентрирования кубическая; г. ц. к.— гранецентрированная кубическая.

¹ Г. Г. М а н к о, «Пайка и припой», пер. с англ. М., Машиностроение, 1968.

Основной элемент	Взаимодействующие элементы					
	висмут	индий	кадмий	олово	свинец	серебро
Алюминий	Не образуют	Не образуют	Не образуют	Не образуют	Не образуют	Ag_3Al — кубическая типа $\beta\text{-Mn}$; (Ag_2Al — г. ц. п. у.)
Висмут	—	In_2Bi — гексагональная типа AlB_2 ; InBi — тетрагональная типа PbO Нет данных	То же	То же	(Pb_3Sb) — г. ц. п. у.	Не образуют
Железо	Не образуют	»	»	FeSn — типа CoSn ; FeSn_2 — тетрагональная типа CuAl_2	Не образуют	То же
Золото	Au_2Bi — к. г. ц. (по сообщению разлагается при низкой температуре)	Au_4In — г. п. у.; Au_2In_4 — типа $\gamma\text{-латуни}$; AuIn — триклинная; AuIn_2 — кубическая	Au_3Cd — тетрагональная; AuCd — о. ц. тетрагональная или орторомбическая; AuCd_3 — сложная кубическая, примерно 90 атомов на элементарную ячейку	(Au_6Sn) — г. ц. п. у.; AuSn — типа NiAs ; AuSn_2 — орторомбическая; AuSn_4 — сложная орторомбическая типа PtSn_4	Au_2Pb — типа MgCu_2 (разлагается при холодной обработке давлением); AuPb_2 — о. ц. тетрагональная	»
						Fe_3Sb_2 — типа NiAl ; FeSb_2 — типа FeS_2 AuSb_2 — кубическая типа FeS_2

Основной элемент	Взаимодействующие элементы						
	висмут	индий	кадмий	олово	свинец	серебро	сурьма
Индий	In ₂ Bi — гексагональная типа AlB ₂ ; InBi — тетрагональная типа PbO Не образуют	—	Не образуют	(In ₂ Sn) — тетрагональная; (InSn ₄) — простая гексагональная	(InPb) — г. ц. тетрагональная	Ag ₃ In — г. ц. п. у.; Ag ₂ In — типа γ-латуни; AgIn ₂ — типа CuAl ₂	InSb — типа цинковой обманки (B3)
Кадмий		Не образуют	—	Промежуточная фаза β — простая гексагональная (β — 95% (ат.) Sn), разлагается при температуре ниже 130° С	Не образуют	(AgCd) — о. ц. к.; Ag ₅ Cd ₈ — сложная кубическая, 20 атомов на элементарную ячейку; CdSb — моноклинная, 20 атомов на элементарную ячейку	Cd ₃ Sb ₂ — орторомбическая, 16 атомов на элементарную ячейку; CdSb — моноклинная, 20 атомов на элементарную ячейку
Медь	То же	Cu ₉ In ₄ — тип па γ-латуни; (CuIn ₂) — тип па NiAs (Cu ₄ In ₃) *	Cu ₂ Cd — тип па MgZn ₂ ; Cu ₄ Cd ₃ *; Cu ₅ Cd ₃ — тип па γ-латуни; CuCd ₃ *	Cu ₃ Sn — орторомбическая, 64 атома на элементарную ячейку; Cu ₆ Sn ₅ — орторомбическая, 530 атомов на элементарную ячейку	То же	Не образуют	(Cu ₁₃ Sb ₃) — г. ц. п. у.; Cu ₂ Sb — тетрагональная, 6 атомов на элементарную ячейку

Основной элемент	Взаимодействующие элементы						
	висмут	индий	кадмий	олово	свинец	серебро	сурьма
Никель	NiBi — типа NiAs; NiBi ₃ — орторомбическая	Ni ₃ In — гексагональная типа Ni ₃ Sn; NiIn — типа CoSn; NiIn ₃ — гексагональная; Ni ₉ In — типа NiAs; Ni ₃ In ₇ — типа γ-латуни	Образуют	Ni ₃ Sn — г. ц. п. у.; Ni ₃ Sn ₂ — гексагональная типа NiAs; Ni ₃ Sn ₄ — моноклинная, 14 атомов на элементарную ячейку	Не образуют	Не образуют	Ni ₁₅ Sb — кубическая, 32 атома на элементарную ячейку; Ni ₃ Sb — тетрагональная, 64 атома на элементарную ячейку; Ni ₇ Sb ₃ — тетрагональная, 52 атома на элементарную ячейку; NiSb — типа NiAs; NiSb ₂ — типа маркизита (C18)
Олово	Не образуют	(In ₂ Sn) — тетрагональная; (InSn ₄) — простая гексагональная	Промежуточная фаза β-простая гексагональная (β — 95% (ат). Sn), разлагается при температуре ниже 130° С	—	То же	(Ag ₆ Sn) — г. ц. п. у.; (Ag ₃ Sn) — г. ц. п. у.	(SnSb) — тип NaCl

Основной элемент	Взаимодействующие элементы						
	висмут	индий	кадмий	олово	свинец	серебро	сурьма
Платина	Образуют	Образуют	Образуют	Pt ₃ Sn — типа Cu ₃ Au; PtSn — типа NiAs; Pt ₃ Sn ₃ — гексагональная, 10 атомов на элементарную ячейку; PtSn ₂ — типа CaF ₂ ; PtSn ₄ — орторомбическая, 20 атомов на элементарную ячейку Не образуют	Pt ₃ Pb — кубическая типа Cu ₃ Au; PtPb — гексагональная типа NiAs; PtPb ₄ — тетрагональная типа CuAl ₂	(Ag ₃ Pt) — г. ц. к.; (AgPt) — кубическая (AgPt ₃) — г. ц. к.	Pt ₄ Sb * PtSb — типа NiAs; PtSb ₂ — тип па пирита
Свинец	(Pb ₃ Bi) — г. ц. п. у.	(In ₃ Pb) г. ц. тетрагональная	Не образуют	Не образуют	—	Не образуют	Не образуют
Серебро	Не образуют	Ag ₃ In — г. ц. п. у. Ag ₃ In — типа γ-латуни AgIn ₂ — тип па CuAl ₂	(AgCd) — о. ц. к.; Ag ₅ Cd ₈ — сложная кубическая, 20 атомов на элементарную ячейку; (AgCd ₃) — г. ц. п. у.	(Ag ₈ Sn) — г. ц. п. у. Ag ₃ Sn — г. ц. п. у.	Не образуют	—	Ag _x Sb _y — г. ц. п. у. (8% Sb); Ag ₃ Sb — ор- торомбическая

Основной элемент	Взаимодействующие элементы						
	висмут	индий	кадмий	олово	свинец	серебро	сурьма
Сурьма	Не образуют	InSb — типа цинковой обманки (B3)	Cd ₃ Sb ₂ — орторомбическая, 16 атомов на элементарную ячейку; CdSb — моноклиная, 20 атомов на элементарную ячейку	(SnSb) — тип NaCl	Не образуют	Ag _x Sb _y — г. ц. п. у. (8% Sb); Ag ₃ Sb — орторомбическая	—
Цинк	То же	Не образуют	Не образуют	Не образуют	То же	(AgZn) — г. ц. п. у.; (Ag ₂ Zn ₃) — типа γ-латуны; (AgZn ₃) — г. ц. п. у. типа Mg	ZnSb; Zn ₄ Sb ₃ ; Zn ₃ Sb ₂

* Установлены не вполне надежно.

Список литературы

1. Инженерный справочник по космической технике под общей ред. А. В. Солодова. Воениздат, 1969.
2. Lucas A. Ancient Egyptian materials and industries, London, 1948.
3. Lüder Erich. Die Technik, 1950, v. 5, № 3, p. 144.
4. Рыбаков Б. А. Ремесло древней Руси. Изд-во АН СССР, 1948.
5. Третьяков П. Н. К истории племен Верхнего Поволжья в первом тысячелетии н. э., Изд-во АН СССР, 1941.
6. Люди русской науки. Сб. под ред. акад. С. И. Вавилова. М.—Л., Гостехиздат, 1948.
7. Менделеев Д. И. Основы химии. Т. II. Госхимиздат, 1947.
8. Гамель. Описание тульского оружейного завода, 1826.
9. Missitet. Design and Development, 1960, v. 6, № 12, p. 31.
10. Руководство по пайке металлов. Пер. с англ. под ред. С. Н. Лоцманова. Оборонгиз, 1960.
11. Петрунин И. Е. В сб. «Пайка материалов в машиностроении», Рига, 1968, с. 3.
12. Петрунин И. Е. и Гржимальский Л. Л. Металловедение и термическая обработка металлов, 1969, № 1, с. 21.
13. Brooks D. Metal Treatment, 1954, v. 21, № 111, p. 583.
14. Platinum Metals Rev., 1963, v. 7, № 2, p. 56.
15. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. Пер. с англ. Машгиз, 1962.
16. Томашев Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. Изд-во АН СССР, 1960.
17. Окисление металлов. Пер. с франц. Изд-во «Металлургия», 1968.
18. Еременко В. Н. Титан и его сплавы, Киев, 1960.
19. Лоцманов С. Н. К вопросу о пайке алюминия и его сплавов. Изд. академии им. Н. Е. Жуковского, 1946.
20. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. Изд-во «Машиностроение», 1967.
21. Иванова Л. В. и др. Флюсы Ф54А, Ф59А и Ф61А для пайки алюминия мягкими припоями. ЛДНТП, 1959.
22. Milner D. R. British Welding Journal, 1958, v. 5, № 3, с. 90.
23. Есенберлин Р. Е. Пайка металлов в печах с газовой средой. Машгиз, 1962.
24. Есин О. А. и Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Metallurgizdat, 1962.
25. Каневский Я. М. Пайка алюминия и его сплавов с абразивным лужением легкоплавкими припоями. ЦИТЭИН, 1961.
26. Обреимов И. В. В сб. «Глазами ученого». Изд-во АН СССР, 1963, с. 233.
27. Лакедемонский А. В., Хряпин В. Е. Справочник паяльщика. Изд-во «Машиностроение», 1967.
28. Петрунин И. Е., Шейн Ю. Ф. Сварочное производство, 1971, № 5, с. 19.
29. Губин А. И. и Китаев А. М. Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. Изд-во «Машиностроение», 1964.
30. Хауффе К. Реакции в твердых металлах и на их поверхности. Ч. I. И. Л., 1962.

- Герцрикен С. Д., Дехтяр И. Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. Физматгиз, 1960.
- Зайт В. Диффузия в металлах. ИЛ, 1958.
- Никитин В. И. Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. Атомиздат, 1967.
- Вигдорович В. Н. Очистка металлов и полупроводников кристаллизацией. Изд-во «Металлургия», 1969.
- Технологичность конструкций. Справочное пособие под ред. С. Л. Ананьева. Изд-во «Машиностроение», 1969.
- Петрунин И. Е. Сварочное производство, 1971, № 2, с. 52.
- Губин А. И. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. Изд-во «Машиностроение», 1964.
- Хансен М. и Андерко К. Структуры двойных сплавов, т. I и II. Металлургиздат, 1962.
- Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Пайка металлов. Изд-во «Машиностроение», 1966.
- Петрунин И. Е. В сб. «Новые материалы и технология пайки в машиностроении». НТО Машпром, 1971, с. 8.
- Бакуши О. А., Шрон Р. З. Сварочное производство, 1962, № 5, с. 6.
- Николаев Г. А. Сварные конструкции, Машгиз, 1962.
- Николаев Г. А., Ольшанский Н. А. Новые методы сварки металлов и пластмасс. Изд-во «Машиностроение», 1966.
- Долгов Ю. С. Оборудование и технология пайки. Изд-во НТО Машпром, 1962.
- Петрунин И. Е. и др. В сб. «Новое в процессах горячей обработки металлов». Изд-во «Машиностроение», 1971, с. 129.
- Metcalfе А. G. Metal Progress, 1963, v. 83, № 5, p. 83.
- Ильевский И. И. и др. Физика и химия обработки материалов, 1968, № 5, с. 117.
- Donnelle R. G., Slaughter G. M. Welding Journal, 1962, v. 41, № 5, p. 461.
- Любимов М. Л. Спаи стекла с металлом. Изд-во «Энергия», 1968.
- Сланский А. и Воллман Я. Капиллярная пайка. Пер. с чешск. под ред. З. В. Никифоровой. Машгиз, 1963.
- Рустем С. Л. Оборудование и проектирование термических цехов. Машгиз, 1962.
- Zimmermann K. F. Z. Schweisstechnik, 1963, Bd 53, № 8, с. 259.
- Петрунин И. Е. Физика и химия обработки материалов, 1970, № 6, с. 108.
- Назаров С. Т. Методы контроля качества сварных соединений. Изд-во «Машиностроение», 1964.
- Гржимальский Л. Л., Петрунин И. Е. Сварочное производство, 1969, № 12, с. 40.
- Попов А. С. Заводская лаборатория, 1959, № 4, с. 496.
- Петрунин И. Е. В сб. «Пайка в промышленности», МДНТП им. Дзержинского, 1970, с. 7.
- Общемашиностроительные нормативы времени на жестяницкие, паяльные работы и лужение. Изд-во «Машиностроение», 1969.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАЙКИ МЕТАЛЛОВ	8
Глава I. Общие сведения	8
§ 1. Виды спаев	10
§ 2. Виды пайки	14
§ 3. Способы пайки	17
§ 4. Способы удаления окисной пленки	22
Глава II. Окисные пленки и процессы их удаления при пайке	24
§ 1. Состав и строение окисных пленок	24
§ 2. Флюсы и их роль	37
§ 3. Газовые среды и их роль	52
§ 4. Физико-механические способы удаления окисных пленок	70
Глава III. Физико-химические процессы образования паяного шва	74
§ 1. Процессы смачивания и капиллярного течения припоев	74
§ 2. Процессы диффузии и растворения при пайке	89
§ 3. Процессы кристаллизации при пайке	109
РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ	123
Глава IV. Паяемые конструкционные материалы и припои	123
§ 1. Паяемые конструкционные материалы	123
§ 2. Состав и свойства припоев	124
Глава V. Конструирование паяных изделий	141
§ 1. Соединения, применяемые в паяных изделиях	141
§ 2. Особенности конструирования паяных изделий	146
Глава VI. Прочность паяных изделий	156
§ 1. Характеристика прочности паяных изделий	154
§ 2. Расчет паяных соединений на прочность	161
§ 3. Концентрация напряжений в паяных соединениях	163
§ 4. Собственные напряжения и деформации в паяных конструкциях	167
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ И ОБОРУДОВАНИЕ	177
Глава VII. Общие принципы технологии пайки	177
§ 1. Подготовка поверхностей деталей к пайке	178
§ 2. Сборка деталей и узлов перед пайкой	180
§ 3. Пайка	183
§ 4. Обработка деталей после пайки	194

Глава VIII. Технология пайки различных материалов	195
§ 1. Пайка меди и ее сплавов	195
§ 2. Пайка конструкционных сталей	197
§ 3. Пайка никеля и его сплавов	199
§ 4. Пайка чугуна	200
§ 5. Пайка инструментальных сталей и твердых сплавов	201
§ 6. Пайка титана и его сплавов	202
§ 7. Пайка тугоплавких металлов	205
§ 8. Пайка бериллия	208
§ 9. Пайка алюминия и его сплавов	209
§ 10. Пайка магниевых сплавов	211
§ 11. Пайка металлов с неметаллическими материалами	213
Глава IX. Оборудование для пайки	215
§ 1. Печи для пайки	215
§ 2. Оборудование для индукционной пайки	226
§ 3. Оборудование для пайки сопротивлением	232
§ 4. Оборудование для пайки погружением	233
§ 5. Оборудование для пайки с радиационным нагревом	238
§ 6. Горелки для пайки	238
§ 7. Паяльники	240
РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА. ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ	243
Глава X. Контроль паяных изделий	243
§ 1. Дефекты паяных изделий	243
§ 2. Методы контроля и оборудование	247
Глава XI. Организация паяльных работ	257
§ 1. Рабочее место паяльщика	257
§ 2. Техническое нормирование пайки	260
Глава XII. Техника безопасности	266
§ 1. Производство припоев и флюсов	266
§ 2. Подготовка к пайке и производство паяльных работ	268
§ 3. Эксплуатация оборудования	270
Приложение	272
Список литературы	278