

С.Н.ЛОЦМАНОВ И.Е.ПЕТРУНИН

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

С. Н. ЛОЦМАНОВ и И. Е. ПЕТРУНИН

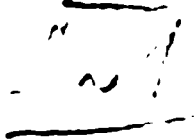
ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР в качестве учебника
для высших технических учебных заведений*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Москва 1966



В учебнике отражены современные представления о сущности протекающих при пайке процессов, описаны методы и особенности конструирования паяных соединений, технология пайки и применяемое оборудование, контроль качества, техническое нормирование и техника безопасности при выполнении паяльных работ.

При изложении теоретических вопросов пайки рассмотрены структура и свойства окисных пленок на металлах, способы удаления их при пайке, процессы смачивания и капиллярного течения припоев, процессы диффузии, растворения и кристаллизации при пайке.

Значительное внимание уделено рассмотрению существующих способов пайки, их классификации, а также технологии пайки различных материалов.

Освещена методика механических испытаний и металлографических исследований паяных соединений.

Учебник предназначен для студентов вузов сварочной специальности, а также может быть использован конструкторами и технологами, занимающимися проектированием и изготовлением паяных изделий.

Абсент

Рецензенты:
кафедра «Технология сварочного производства» МАТИ
и д-р техн. наук М. В. Мальцев

Редактор канд. техн. наук В. П. ФРОЛОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

С каждым годом все большее применение находит сварка металлов. По уровню механизации этого процесса, по объему применения автоматической сварки наша страна прочно занимает ведущее место в мире. Пайка по ряду признаков является процессом, родственным сварке, однако имеет существенные преимущества перед ней. По природе процесса пайка — групповой метод обработки деталей, поэтому механизированные и автоматизированные способы пайки дают высокую производительность труда. Пайка легко обеспечивает соединение разнородных металлов, металлов с неметаллами, при пайке не расплавляются соединяемые кромки деталей, что позволяет более точно выдерживать их заданные размеры и форму. В связи с этим вполне закономерен интерес к пайке со стороны специалистов самых различных отраслей техники.

Как наука и как производственный процесс пайка развивается на базе многих отраслей знаний и, в первую очередь, на базе физической химии, технической термодинамики, металловедения, учения о прочности металлов, учения о коррозии и т. д., поэтому курс «Пайка металлов» необходимо изучать после прохождения этих дисциплин.

Настоящий учебник является кратким и систематическим изложением курса «Пайка металлов» в соответствии с программой, утвержденной для студентов специальности «Оборудование и технология сварочного производства».

ВВЕДЕНИЕ

Пайка является наиболее древним способом соединения металлов. На основе археологических раскопок установлено, что человек достаточно хорошо владел им еще 3—5 тысяч лет назад. Так, при раскопках на территории древнего Египта были найдены паяные медно-серебряным припоем трубы, которые, по заключению специалистов, были изготовлены около пяти тысяч лет тому назад [57]. На территории этой страны при раскопках находят паяные изделия, относящиеся к еще более раннему периоду [58].

На территории СССР также было найдено большое количество 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 г. Киева [40, 46].

В развитие пайки металлов сделали вклад русские ученые. Так, например, М. В. Ломоносов впервые наблюдал и описал явление спаивания металлов в разряде атмосферного электричества [32]. Д. И. Менделеев в своем капитальном труде «Основы химии» первым дал объяснение процесса флюсования при пайке с применением в качестве флюса хлористого цинка [33].

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, пайка начала находить широкое промышленное применение. Именно в этот период разработана пайка в высокопроизводительных конвейерных электропечах и созданы автоматы для индукционной вакуумной пайки.

Советские ученые 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, кера-

микой и другими материалами [31]. После второй мировой войны начался период бурного развития пайки, вызванного прогрессом в атомной, ракетной, радиоэлектронной и в других отраслях новой техники. Пайка металлов быстро превращается в современный высокопроизводительный технологический процесс.

В настоящее время пайка металлов находит применение во всех отраслях техники. Например, в самолетостроении наметился переход от алюминиевой обшивки, соединяемой клепкой, на кон-

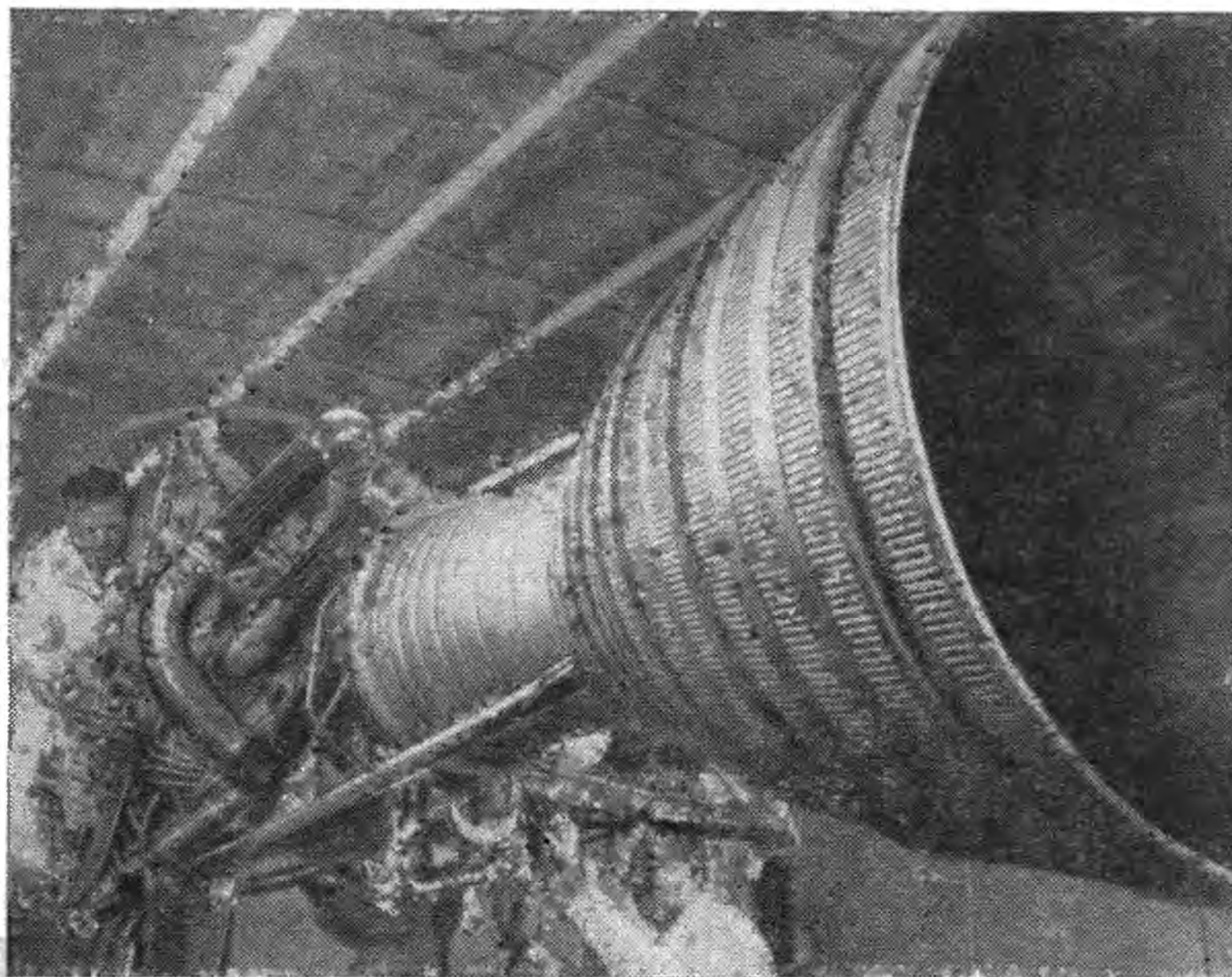


Рис. 1. Камера сгорания современного ракетного двигателя, изготовленная пайкой [65]

струкции, изготавливаемые из высокопрочных нержавеющей сталей в виде паяных в печи панелей с сотовым заполнителем; 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. Станкоинструментальная промышленность широко использует пайку при изготовлении режущего инструмента, в особенности из твердых сплавов. Механизация и автоматизация процессов пайки снижает трудоемкость изготовления инстру-

мента, увеличивает выпуск и повышает его качество. За последние годы впервые создан универсальный полуавтомат роторного типа, который механизмирует процесс пайки и термообработки твердосплавного инструмента [12].

В автотракторостроении пайка находит применение в производстве радиаторов, а также при изготовлении трубопроводов топливных и масляных систем и ряда других деталей. Механизация процессов пайки позволяет улучшать качество паяных соединений и значительно сокращать расход дефицитных оловянно-

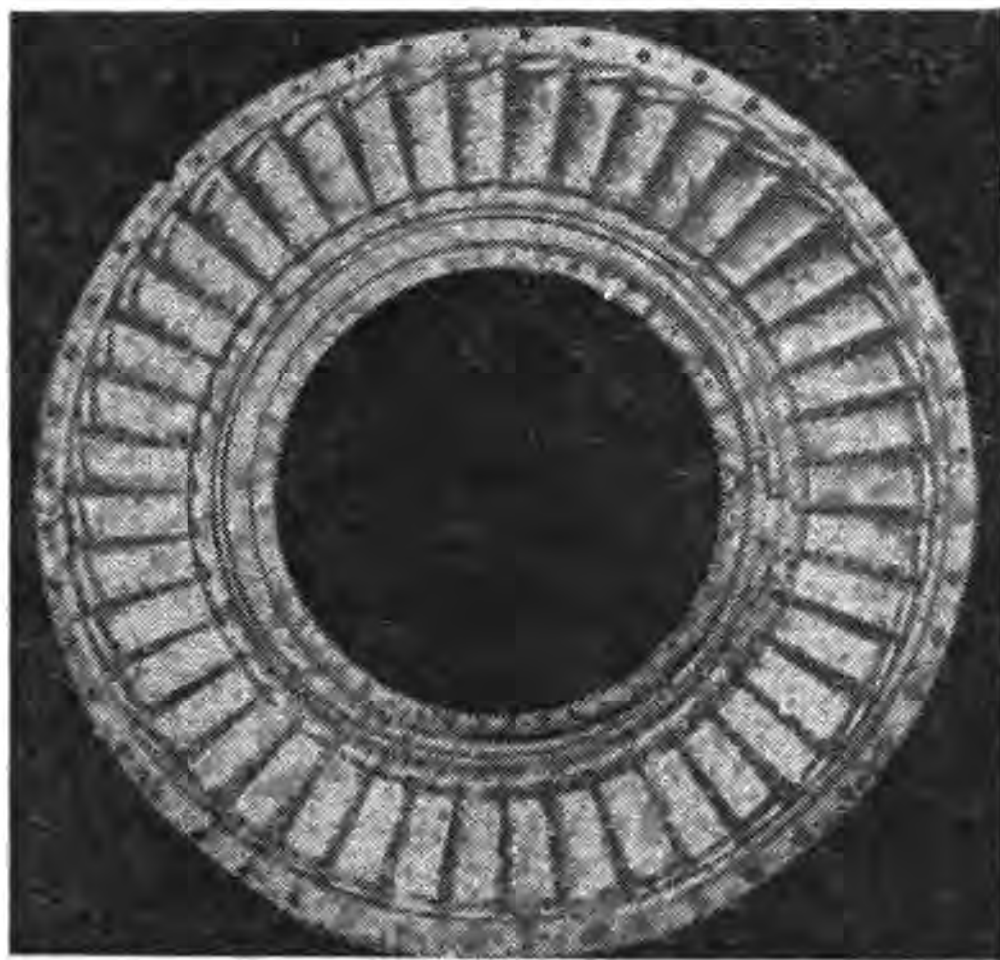


Рис. 2. Направляющий аппарат газовой турбины, изготовленный пайкой

свинцовых припоев. Так, на Московском автозаводе им. Лихачева успешно работает автоматическая линия по изготовлению автомобильных радиаторов, позволившая высвободить большое количество 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 [31].

Одним из основных преимуществ пайки является возможность соединения за один прием множества заготовок. Это наглядно видно из рис. 2 и 3, на которых изображены изделия, состоящие из значительного количества элементов, соединенных 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 материала в заготовках, поскольку значительно сокращается объем обработки резанием, а следовательно, отход металла в стружку. 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,

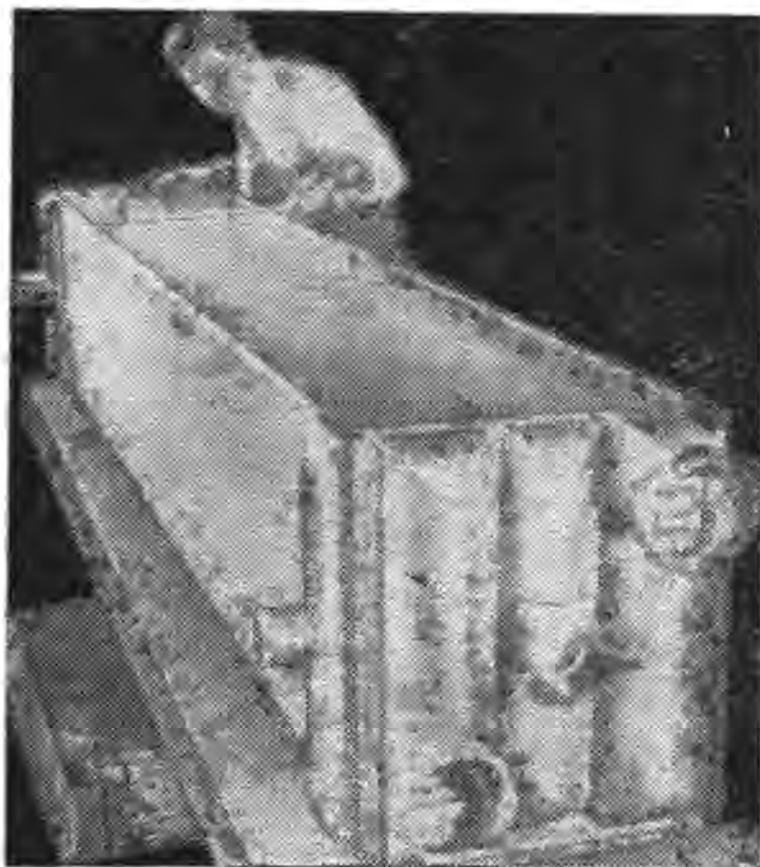


Рис. 3. Паяный теплообменник [41]

в ряде случаев паяные соединения делаются специально разъемными. Исходя из этого, пайку следует рассматривать как метод получения не только неразъемных, но и разъемных соединений.

Последнее свойство пайки широко используется для контроля 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 неметаллическими 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.

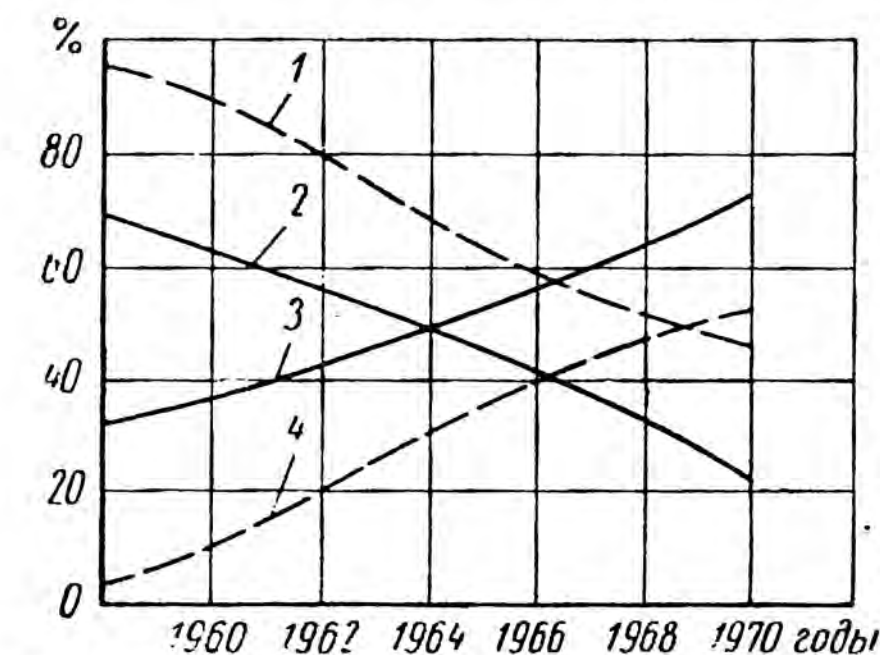


Рис. 4. Тенденции развития пайки и сварки в США:

1 — сварка вручную; 2 — пайка вручную; 3 — полуавтоматическая и автоматическая пайка; 4 — полуавтоматическая и автоматическая сварка

Лишь преимуществами пайки можно объяснить тот факт, что темпы механизации и автоматизации этого процесса в последние годы стали значительно выше, чем сварки. Так, по данным США,

развитие полуавтоматической и автоматической пайки в 1960—1970 годы (рис. 4) должно происходить значительно более быстрыми темпами, чем развитие полуавтоматической и автоматической сварки.

Конструктивные, технологические и экономические преимущества механизированных способов пайки металлов свидетельствуют о целесообразности широкого внедрения их в машиностроение, особенно в условиях массового производства деталей малых и средних размеров из заготовок, получаемых механической обработкой, штамповкой или литьем.

Пайка металлов, как прогрессивный технологический процесс, получает с каждым годом все большее развитие в нашей стране, способствуя быстрейшему решению задач создания материально-технической базы коммунизма.

Глава I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАЙКИ МЕТАЛЛОВ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

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

Из определения следует, что процесс образования паяного соединения связан с нагревом. Для получения спая наряду с нагревом необходимо обеспечить еще два основных условия: удалить с поверхности металлов в процессе пайки окисную пленку и ввести в соединительный зазор между ними расплавленный связующий металл. При кристаллизации вступившего во взаимодействие с паяемыми металлами более легкоплавкого связующего металла образуется паяное соединение.

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

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

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

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

И, наконец, пайка, в отличие от сварки плавлением, может быть осуществлена при любых температурах, лежащих ниже температуры плавления основного металла. Эти различия имеют своим следствием иную, чем при сварке плавлением, природу процессов, протекающих при образовании паяного шва.

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 оловянно-свинцовыми 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 прежний смысл.

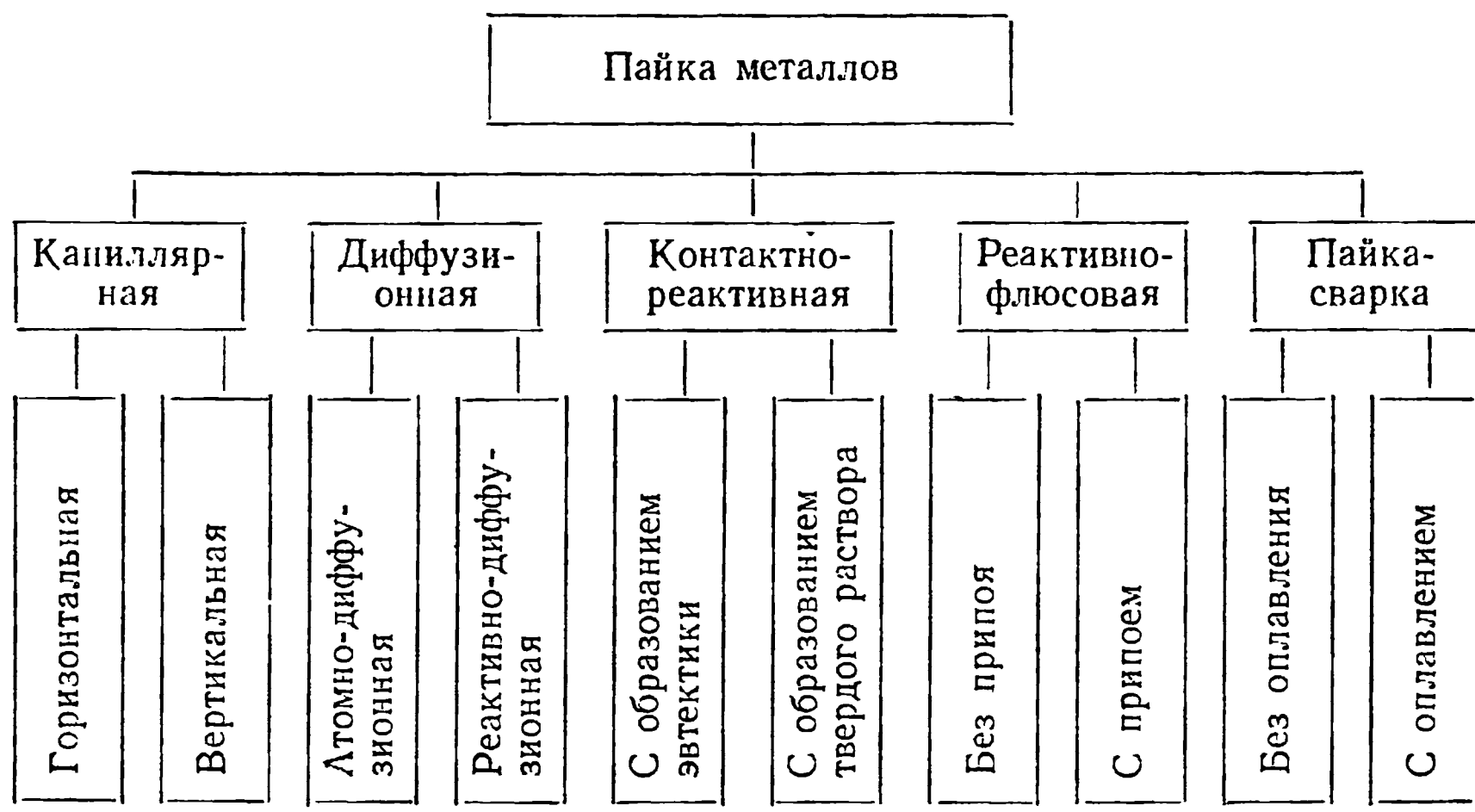


Рис. 5. Классификация методов пайки

В настоящее время, когда применяется очень много припоев и по указанному признаку их разграничить очень трудно, пайку металлов необходимо рассматривать как единый процесс, который принципиально можно осуществлять при любых температурах, лежащих ниже точки плавления основного металла. Поэтому от устаревших терминов «мягкая» и «твердая» пайка следует отказаться.

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

Классификация процессов пайки. Пайку можно классифицировать, во-первых, по сущности физико-химических процессов, протекающих при формировании паяных швов (рис. 5), и, во-вторых, по разновидностям технологии пайки, связанным с применяемыми для нагрева источниками тепла или оборудованием (рис. 9).

Методы пайки. По сущности физико-химических процессов к основным разновидностям или методам пайки относятся: капиллярная пайка, диффузионная пайка контактно-реактивная, реактивно-флюсовая пайка и пайка-сварка. Классификация методов пайки приведена на рис. 5.

Капиллярной пайкой называется метод пайки, при котором припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями деталей и удерживается в нем за счет капиллярных сил. Схема образования шва при капиллярной пайке приведена на рис. 6. Эта разновидность пайки наиболее распространена. Во всех случаях, когда в паяном соединении имеется перекрытие элементов деталей

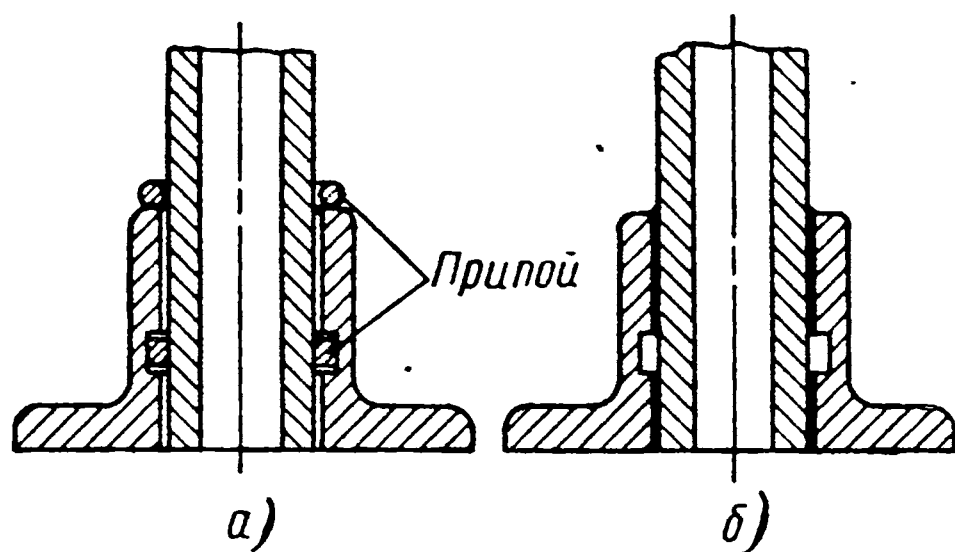


Рис. 6. Схема образования шва при капиллярной пайке:

а — перед пайкой; б — после пайки

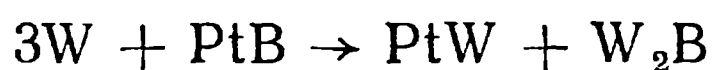
(нахлестка), возможна капиллярная пайка. Однако капиллярные явления присущи всем методам пайки, поэтому данный термин является условным, обозначающим процессы пайки, связанные с течением припоя под действием капиллярных сил. Капиллярная пайка делится на горизонтально-капиллярную и вертикально-капиллярную, 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 выполнении пайки необходимо стремиться создавать условия для горизонтального течения припоя.

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

При диффузионной пайке в зависимости от сочетания основного металла и припоя, во-первых, возможно взаимное растворение припоя и основного металла с образованием 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 в сечении паяного соединения 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, возникающих при протекании реактивной диффузии, которая приводит к повышению температуры плавления металла шва и, следовательно, к повышению жаропрочности паяных соединений. Так, например, при пайке вольфрама припоем системы платина—бор с температурой плавления 855°C протекает реакция



с образованием в шве сплава с температурой плавления выше 2000°C [54, 61].

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

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

Диффузионная пайка может проводиться с выдержкой в процессе пайки при температуре образования паяного шва и после завершения процесса пайки при температуре ниже солидуса припоя. В первом случае расплавленный припой в процессе пайки, постепенно насыщаясь основным металлом, переходит в твердое состояние. Во втором случае длительная выдержка деталей производится после завершения процесса пайки при температуре ниже солидуса припоя.

Контактно-реактивной пайкой называется метод пайки, при котором между соединяемыми металлами или между соединяемыми металлами и припоем протекают активные реакции с образованием в контакте между ними нового более легкоплавкого сплава эвтектического состава или твердого раствора с минимумом на кривой ликвидуса. Образовавшийся легкоплавкий сплав заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение.

Случай взаимодействия между соединяемыми металлами имеет место, например, при пайке меди с серебром без нанесения припоя. При нагреве до температуры пайки происходит контактное растворение соединяемых металлов с образованием эвтектики медь—серебро. Аналогичное взаимодействие может протекать между одним из соединяемых металлов и покрытием на втором или между соединяемыми металлами и фольгой третьего металла, вводимого в зазор между ними. При этом пайка в отличие от обычных условий производится при температуре, лежащей ниже

температуры плавления покрытия или фольги, вводимой в качестве прослойки между соединяемыми металлами. Схема контактно-реактивной пайки без нанесения припоя приведена на рис. 7.

Случай взаимодействия между соединяемыми металлами и припоем наблюдается при соединении стали или никеля с применением в качестве припоя палладия, который образует с ними сравнительно легкоплавкие сплавы типа твердого раствора.

Реактивно-флюсовой пайкой называется метод пайки, при котором припой образуется за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом. Реактивно-флюсовая пайка может осуществляться в двух вариантах, без введения припоя и с допол-

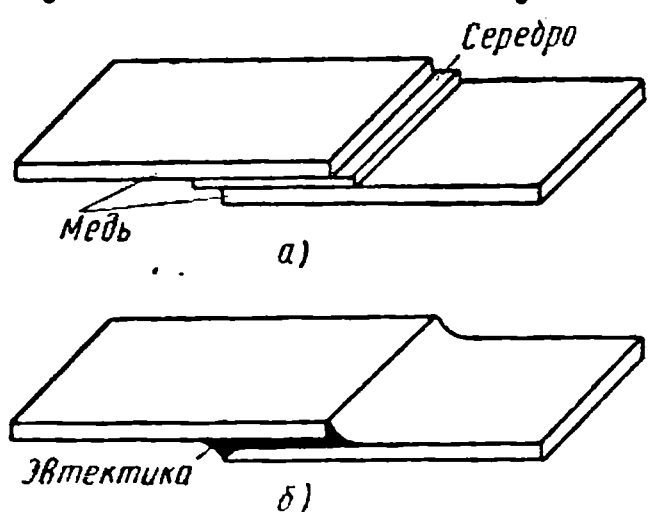


Рис. 7. Схема контактно-реактивной пайки:

а — перед пайкой; б — после пайки

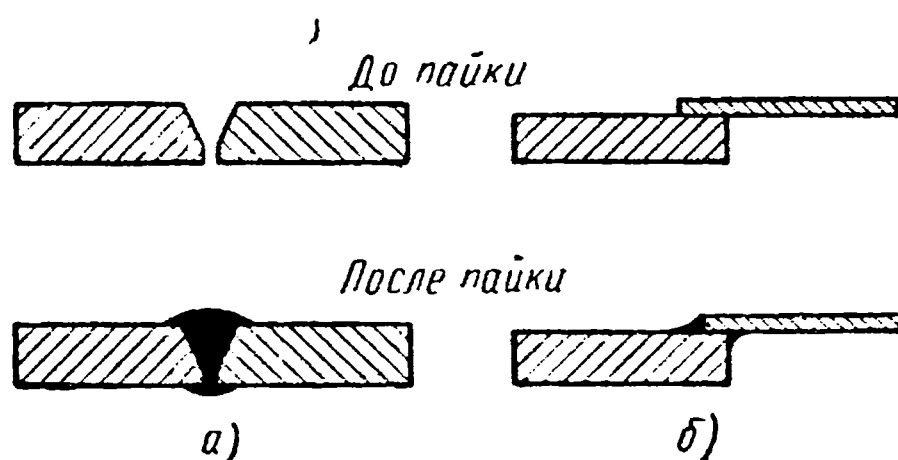


Рис. 8. Схема образования шва при пайке-сварке:

а — без оплавления кромок деталей; б — с оплавлением кромки одной детали

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



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

Пайкой-сваркой называется метод пайки, при котором паяное соединение образуется способами, характерными для сварки плавлением, но с применением припоя в качестве присадочного материала.

Пайка-сварка делится на пайку без оплавления кромок соединяемых деталей и с оплавлением кромок одной из соединяемых деталей, изготовленной из более легкоплавкого металла. Схема образования шва при пайке-сварке приведена на рис. 8.

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. Лужение может применяться как предварительный процесс с целью создания более надежного контакта между основным металлом и припоем или как покрытие для защиты металлов от коррозии.

Наиболее широкое применение в производстве паяных конструкций в настоящее время получила капиллярная пайка. Диффузионная и контактно-реактивная пайка менее изучена, но они обеспечивают высокое качество паяных соединений. Их целесообразно применять в тех случаях, когда в процессе пайки можно обеспечить минимальные зазоры между соединяемыми деталями. Пайка-сварка обычно применяется при устранении поверхностных дефектов в литых деталях. Для соединения конструкционных материалов пайка-сварка применяется сравнительно редко. Реактивно-флюсовая пайка мало изучена и из-за большого расхода флюса не получила распространения.

При изучении особенностей диффузионной, контактно-реактивной и реактивно-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.

Способы пайки. Рассмотренные методы пайки могут быть осуществлены с применением различных способов пайки в зависимости от используемых источников нагрева. Классификация наиболее распространенных в настоящее время способов пайки приведена на рис. 9. Пайка в печах обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной деформации даже при их больших габаритах и сложной конфигурации. Для пайки применяются печи с нагревом электросопротивлением, с индукционным нагревом и газопламенные печи. В настоящее время получают распространение также газовые печи с беспламенным горением.

Пайка крупногабаритных деталей производится в камерных печах с неподвижным подом. Для массовой пайки сравнительно мелких деталей применяются печи с сетчатым конвейером или роликовым подом. В этих печах для предохранения деталей от окисления и повышения качества пайки создается специальная газовая атмосфера. Пайка в печах позволяет широко применить механизацию паяльных работ и обеспечить стабильное качество паяных соединений.

Индукционная пайка может производиться 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

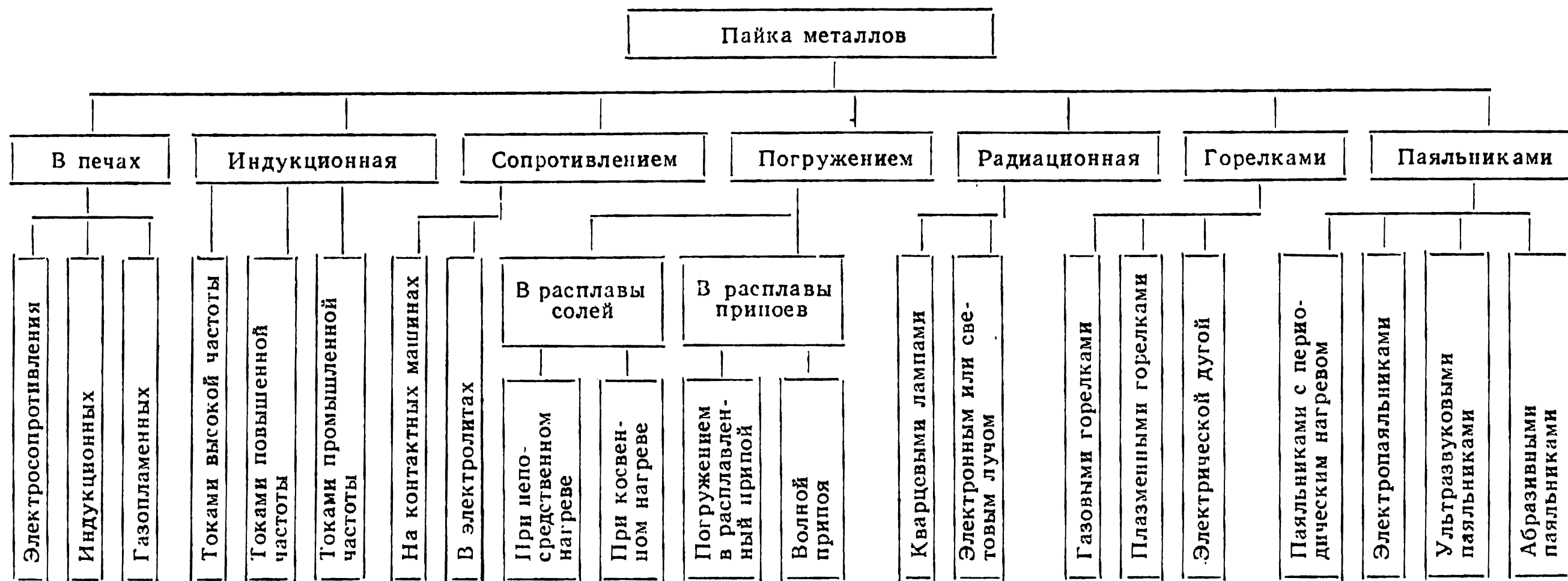


Рис. 9. Классификация способов пайки

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. 10.

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 элек-

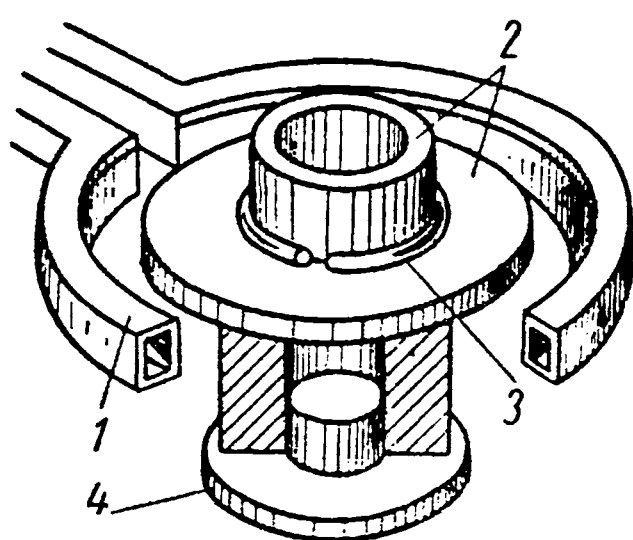


Рис. 10. Схема индукционного нагрева при пайке:

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

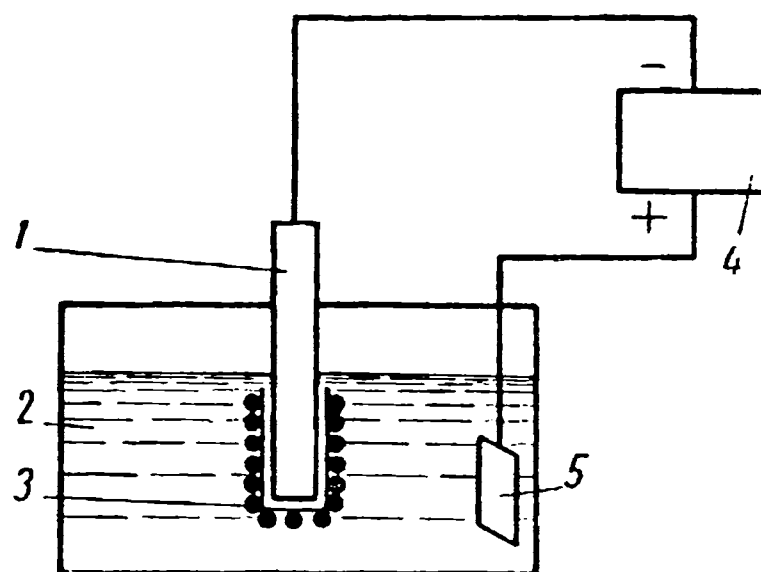


Рис. 11. Схема нагрева в электролите:

1 — нагреваемая деталь; 2 — электролит;
3 — водородная оболочка; 4 — источник
тока; 5 — анод

тролитах. Пайка с нагревом на контактных машинах типа сварочных или в контактных клещах имеет значительное распространение и применяется при изготовлении тонкостенных изделий или при соединении тонкостенных элементов с толстостенными.

При пайке в электролитах тепловой эффект возникает за счет высокого электрического сопротивления водородной оболочки, образующейся вокруг паяемой детали (катода), погруженной в электролит. Схема нагрева в электролите приведена на рис. 11 [52]. Для целей пайки нагрев 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 погружаются непосредственно в расплавленные соли, выполняющие роль не только источника тепла, но и флюса. Преимуществом этого способа является очень высокая скорость нагрева. При пайке в соляных ваннах с косвенным нагревом паяемая деталь, помещенная в контейнер со специальной газовой средой или вакуумом, погружается в соляную ванну. Такой способ пайки обеспечивает несколько меньшую скорость нагрева, но качество поверхности паяных деталей получается более высоким.

При нагреве в расплавленных припоях подготовленная к пайке деталь частично или полностью погружается в ванну с припоем. Этот способ пайки нашел широкое применение при изготовлении автомобильных и авиационных радиаторов, твердосплавного инструмента, а также в радио- и электропромышленности. Пайка в расплавленных припоях имеет две разновидности: погружением в расплавленный припой (рис. 12) и волной припоя. Пайка волной припоя состоит в том, что подаваемый насосом расплавленный припой образует волну над уровнем расплава. Паяемая деталь перемещается в горизонтальном направлении. В момент касания

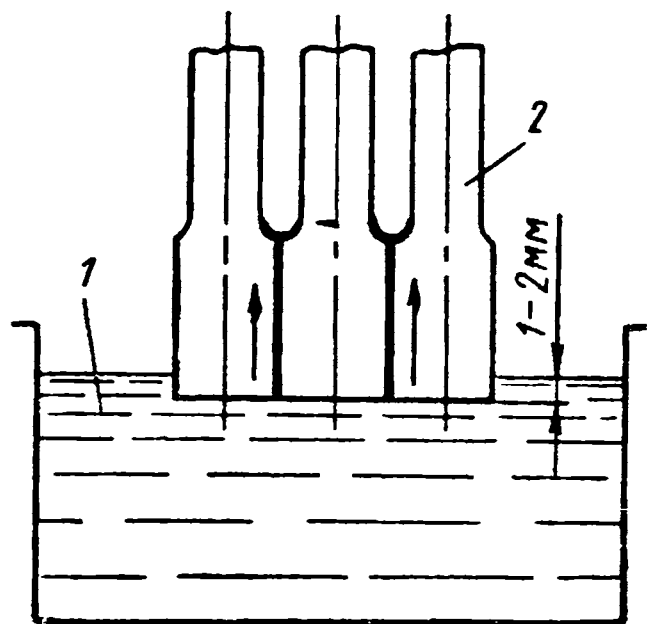


Рис. 12. Схема пайки погружением в расплавленный припой:

1 — припой; 2 — детали

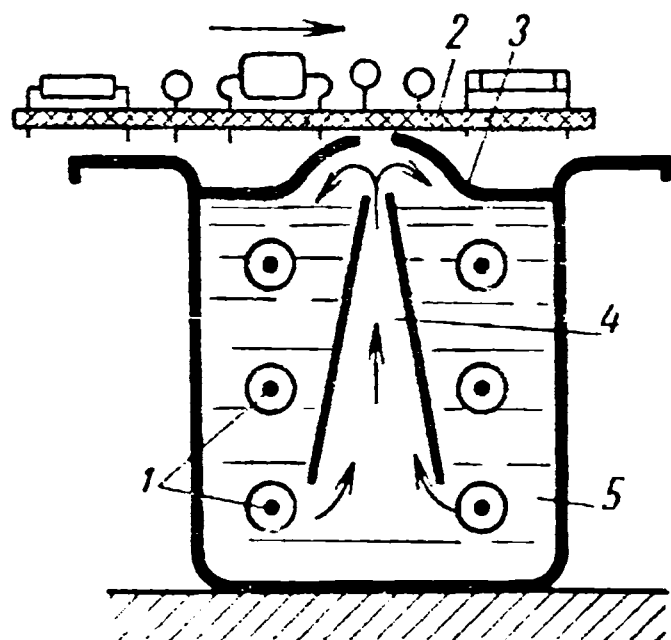


Рис. 13. Схема пайки волной припоя:

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

волны происходит пайка (рис. 13). Этот способ пайки получил большое распространение в радиоэлектронной промышленности при производстве печатного радиомонтажа.

Радиационный нагрев 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 радиационном способе пайки лучистая энергия превращается в тепловую непосредственно в материале паяемых деталей.

При пайке горелками 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 применение их для пайки идентично, поэтому их можно рассматривать одновременно.

Из перечисленных способов нагрева газовые горелки обладают большей универсальностью. Применяя различные углеводороды

в смеси с воздухом или кислородом, можно получать необходимые для пайки металлов температуры нагрева. Питание газовых горелок горючим газом может производиться от баллонов, газовой сети или от газового генератора. Плазменные горелки дают более высокую температуру нагрева и поэтому могут быть перспективными для пайки таких тугоплавких металлов, как вольфрам, тантал, молибден, ниобий. Электрическая дуга косвенного действия, горящая между угольными или графитовыми электродами, 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 при пайке в полевых условиях или в ремонтных мастерских.

Пайка паяльниками ввиду простоты их устройства и общедоступности этого способа нашла чрезвычайно широкое применение в различных областях техники. При этом способе пайки нагрев основного металла и расплавление припоя осуществляются за счет тепла, аккумулированного в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе пайки подогревается. В том случае, когда тепла аккумулированного в массе металла паяльника недостаточно, паяемая деталь предварительно или в процессе пайки подогревается от постороннего источника нагрева. Паяльники можно разделить на четыре группы: с периодическим нагревом, с электронагревом, ультразвуковые и абразивные. Паяльники с периодическим нагревом и электронагревом нашли наибольшее распространение для флюсовой пайки черных и цветных металлов при температурах ниже 300—350° С.

В ультразвуковых паяльниках колебания ультразвуковой частоты используются для разрушения окисной пленки на поверхности паяемого металла под слоем расплавленного припоя. Паяльники для ультразвуковой пайки могут быть с подогревателем и без подогревателя. В последнем случае для расплавления припоя используется посторонний источник нагрева. Основное преимущество ультразвуковых паяльников — возможность бесфлюсовой пайки. Они нашли применение главным образом для пайки алюминия легкоплавкими припоями.

Абразивные паяльники, как и ультразвуковые, применяются для облуживания алюминия и алюминиевых сплавов без флюса, однако окисная пленка при пайке удаляется за счет простого 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, а также индукционная являются наиболее высоко-

производительными технологическими процессами. Они могут быть легко механизированы и даже автоматизированы. Поэтому особенно в массовом и крупносерийном производстве предпочтение следует отдавать этим способам пайки.

В последние годы нашли применение такие новые способы пайки, как термитная, электронагревательными матами и блоками. *Термитная пайка* — это способ пайки, при котором нагрев паяемых материалов и расплавление припоя осуществляются теплом, выделяемым при сгорании термитной смеси. Этот способ применяется при пайке стержней, профилей, трубопроводов и т. п. *Пайка электронагревательными матами* — это 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 применяются при пайке тонкостенных крупногабаритных конструкций и 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.

Пайка блоками — это способ пайки, при котором нагрев паяемых материалов и расплавление припоя происходят за счет тепла предварительно нагретых массивных металлических тел (блоков), обработанных в соответствии с конфигурацией паяемых деталей. Этот способ пайки применяется в тех случаях, когда необходимо провести скоростную пайку при строго дозированном количестве тепла. Перечисленные новые способы пайки имеют пока ограниченное применение.

Классификация способов удаления окисной пленки. При всех рассмотренных способах пайки нагрев основного металла и расплавление припоя должны производиться при удалении с их поверхности окисной пленки и защите от дальнейшего окисления под действием кислорода воздуха. С этой целью при пайке применяются флюсы, газовые среды, 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. 14. Флюсовая пайка является наиболее древним и наиболее распространенным процессом.

Флюсом называется вещество, применяемое в процессе пайки для удаления окисной пленки с поверхности металлов и защиты их от окисления. Паяльные флюсы по своему составу делятся на четыре группы. Флюсы на основе соединений бора применяются при пайке всех черных и многих цветных металлов. Флюсы на основе фторидов применяются при пайке тех металлов и сплавов,

для которых боридные флюсы недостаточно активны и вследствие этого не обеспечивают удаления окисной пленки в процессе пайки. Флюсы на основе хлоридов более легкоплавки и нашли применение главным образом при пайке алюминиевых и магниевых сплавов. Флюсы на основе водных растворов хлористого цинка обладают высокой химической активностью и применяются для низкотемпературной пайки сталей, никеля и медных сплавов. Флюсы на основе канифоли и других органических соединений применяются только для низкотемпературной пайки меди и не-



Рис. 14. Классификация способов удаления окисной пленки в процессе пайки

которых сплавов на ее основе. Флюсы могут наноситься на паяемую деталь и припой в порошкообразном или в 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, результатом которого является удаление окисной пленки.

Газовые среды, применяемые при пайке, делятся 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 защиты их от окисления в процессе пайки. В качестве активных составляющих таких сред распространение получили водород и окись углерода. Нейтральные и активные газовые среды, состав которых контролируется и поддерживается постоянным в процессе пайки, называются контролируемыми газовыми атмосферами.

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

Физико-механические способы удаления окисных пленок в процессе пайки имеют две разновидности. Во-первых, разрушение окисных пленок механическим воздействием и, во-вторых, 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 с образованием легкоплавких шлаков, которые, растекаясь по поверхности основного металла и припоя, предохраняют их от окисления. По составу и характеру действия в процессе флюсования применяемые в настоящее время самофлюсующие припои можно разделить на четыре группы: содержащие щелочные металлы, содержащие бор, содержащие фосфор и содержащие несколько флюсующих компонентов. Литий и другие щелочные металлы вводятся обычно в состав серебряных припоев. Фосфор вводится в медные и медно-серебряные припои, которые применяются только для пайки меди и ее сплавов, так как со сталью и другими металлами он образует хрупкие соединения. Бор вводится в жаропрочные припои, а вместе с литием — в припои для пайки в сухой газовой атмосфере.

Легирование припоев бором и фосфором производят через лигатуры ($\text{Ni} - \text{B}$, $\text{Cu} - \text{P}$); литий и другие щелочные металлы вводят непосредственно в расплав припоя в конце плавки.

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 как аморфную, так и кристаллическую структуру. Например, в случае окисления алюминия при комнатной температуре образуется аморфная пленка толщиной 20—45 Å, которая при нагреве приобретает кристаллическое строение.

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 [26]. 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 кристаллическость пленок определяются энергетическими условиями на поверхности и внутри окисных пленок. Образование первичной пленки зависит от энергетических условий на поверхности кристаллов окисляющихся металлов.

Исследования, проведенные на монокристаллах, показали, что образующаяся на металле первичная кристаллическая пленка имеет 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 кристаллами окисной пленки. При окислении металлам свойственна тенденция к сохранению в окисных пленках своей собственной атомной структуры. При этом чем тоньше окисная пленка, тем полнее сходство в ориентации кристаллов металла и кристаллов пленки.

При дальнейшем окислении с увеличением толщины пленки в структуре пленки 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 \AA и затем почти не изменяется [50]. 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 будет внутри окисной пленки. Схема роста окисной пленки в этом случае представлена на рис. 15.

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

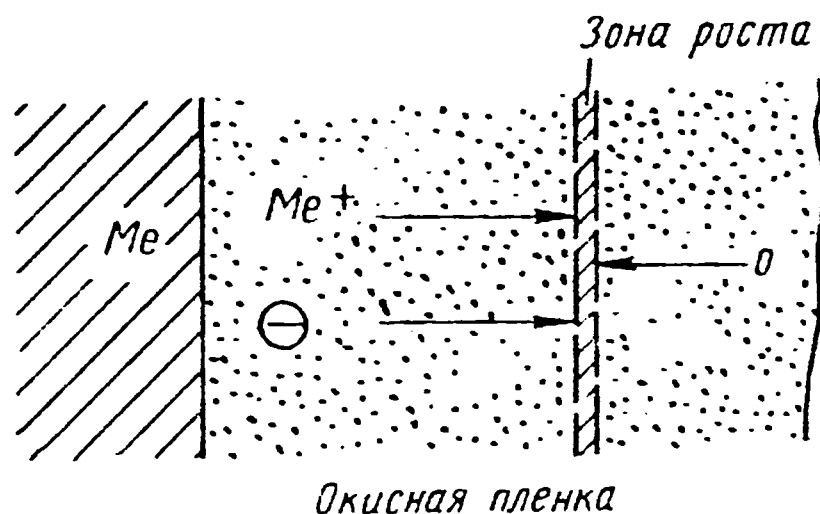


Рис. 15. Схема роста окисной пленки при соизмеримых скоростях встречной диффузии металла и кислорода

электроны. Можно считать также возможным образование ионов кислорода на внешней поверхности пленки за счет ионизации проходящими со стороны металла электронами. Образующиеся при этом ионы кислорода диффундируют в сторону металла. В процессе роста окисной пленки не исключена возможность также и атомной 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 2 с лишним раза больше его атома [45]. Атомные и ионные радиусы некоторых элементов, входящих в состав основного металла и припоев, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Название элемента	Химический знак	Атомный радиус в Å	Обозначения ионов	Ионный радиус Å	Название элемента	Химический знак	Атомный радиус в Å	Обозначения ионов	Ионный радиус Å
Кислород	O	0,60	O ²⁻	1,40	Кобальт	Co	1,25	Co ²⁺	0,82
Азот	N	0,81	N ⁵⁺	0,15	Молибден	Mo	1,39	Mo ⁶⁺	0,62
Железо	Fe	1,26	Fe ²⁺	0,75	Ниобий	Nb	1,47	Nb ⁵⁺	0,70
			Fe ³⁺	0,67	Титан	Ti	1,49	Ti ³⁺	0,69
Углерод	C	0,77	C ⁴⁺	0,15	Медь	Cu	1,28	Cu ⁺	0,96
Никель	Ni	1,25	Ni ²⁺	0,78	Серебро	Ag	1,44	Ag ⁺	1,26
Хром	Cr	1,25	Cr ³⁺	0,65	Бериллий	Be	1,12	Be ²⁺	0,31
			Cr ⁶⁺	0,52	Алюминий	Al	1,43	Al ³⁺	0,50
Марганец	Mn	1,29	Mn ²⁺	0,80	Магний	Mg	1,62	Mg ²⁺	0,65
			Mn ³⁺	0,70	Цинк	Zn	1,31	Zn ²⁺	0,74
			Mn ⁴⁺	0,52	Кадмий	Cd	1,54	Cd ²⁺	0,97
			Mn ⁷⁺	0,46	Свинец	Pb	1,74	Pb ²⁺	1,21
Кремний	Si	1,18	Si ⁴⁺	0,41				Pb ⁴⁺	0,84

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 связывают с миграцией ионов и вакансий в кристаллической решетке окислов.

Двусторонний характер диффузии в процессе образования окисной пленки подтвержден экспериментальными данными. Так, при окислении железа и его низколегированных сплавов при температуре выше 900° С установлено, что кислород диффундирует через окисную пленку к металлу, образуя на границе с ним низ-

шие окислы. В то же время металл диффундирует через пленку, на поверхности которой происходит наслоение высшего окисла. Микроструктура пленки, образовавшейся после выдержки железа в течение суток в атмосфере воздуха при температуре 625°C , приведена на рис. 16.

В процессе образования окисных пленок закон их роста может быть различным. Металлы, у которых отношение объема окисла $V_{ок}$ к объему металла $V_{ме}$, из которого образовался окисел, меньше единицы, т. е.

$$\frac{V_{ок}}{V_{ме}} < 1,$$

образуют несплошные, пористые окисные пленки, обладающие слабыми защитными свойствами. Для таких металлов скорость роста окисной пленки определяется линейным законом:

$$\frac{dy}{dt} = K,$$

где y — толщина пленки;
 t — время окисления;
 K — константа.

После интегрирования получим

$$y = Kt + A,$$

где A — постоянная интегрирования, характеризующая толщину пленки в начальный момент окисления.

Таким образом, для металлов, не образующих при окислении защитной пленки, скорость роста окисной пленки будет пропорциональна времени окисления. Линейный закон роста устанавливается через некоторое время после начала окисления, когда пленка достигнет некоторой критической величины. Линейный характер роста окисной пленки наблюдается для щелочных и щелочноземельных металлов, а также таких металлов, как ванадий, молибден, вольфрам, образующих окислы, легко испаряющиеся при нагреве. На рис. 17 приведена линейная зависимость, характеризующая закон роста окисной пленки в случае окисления магния при различных температурах.

Металлы, для которых $\frac{V_{ок}}{V_{ме}} > 1$, при окислении образуют сплошной слой окисной пленки. В этом случае с ростом пленки процесс диффузии через нее будет тормозиться, и дальнейший рост ее постепенно замедляться. Для таких металлов рост пленки происходит по параболическому закону:

$$y^2 = Kt + A.$$

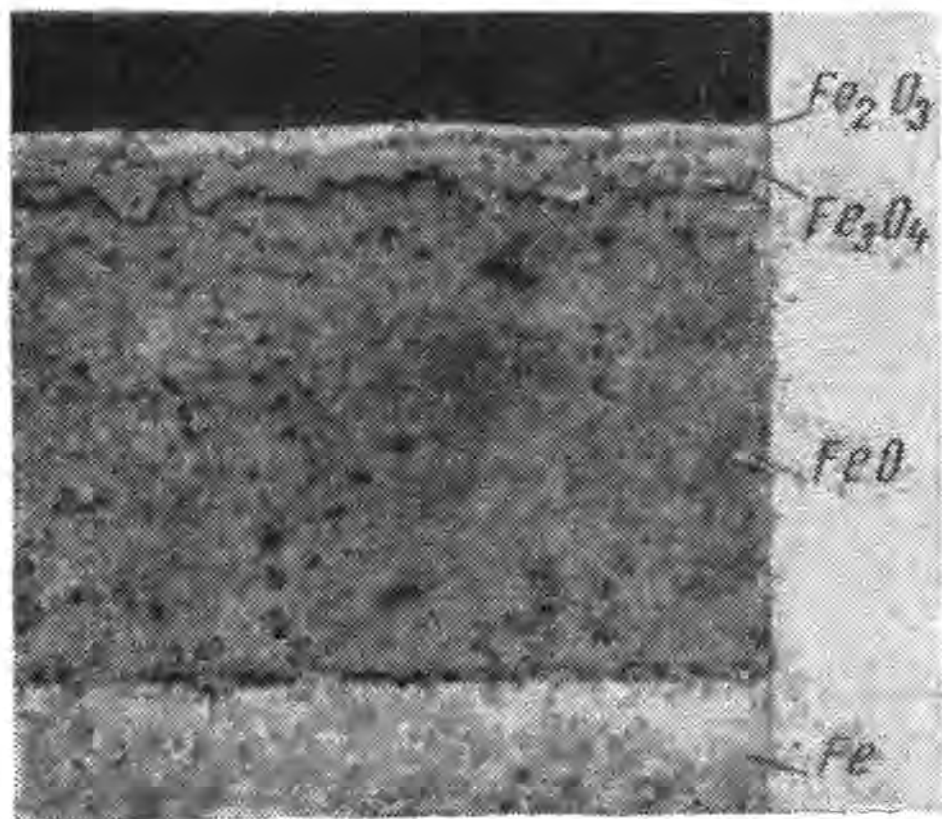


Рис. 16. Микроструктура окисной пленки на железе

Параболическая зависимость наблюдается при окислении железа, меди, никеля (рис. 18). Как и в случае линейной зависимости, параболический закон роста окисной пленки не соблюдается для начальных стадий окисления, когда пленка еще тонка.

мг/см²

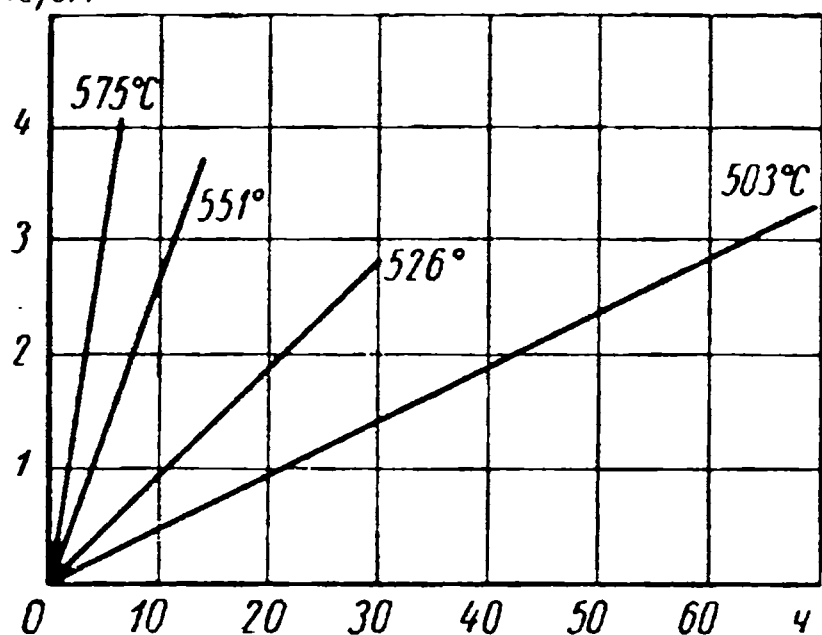


Рис. 17. Линейный закон роста окисной пленки при окислении магния в кислороде при различных температурах

В ряде случаев наиболее правильно рост окисной пленки описывает зависимость

$$y^n = Kt + A,$$

где $1 < n \leq 2$.

Для некоторых металлов наблюдается логарифмический закон 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 логарифмический закон роста окисной пленки установлен экспериментально для железа до 375° С, для меди до 100° С, для никеля до 650° С, для алюминия и цинка от 25 до 225° С. На рис. 19 приведены логарифми-

мг/см²

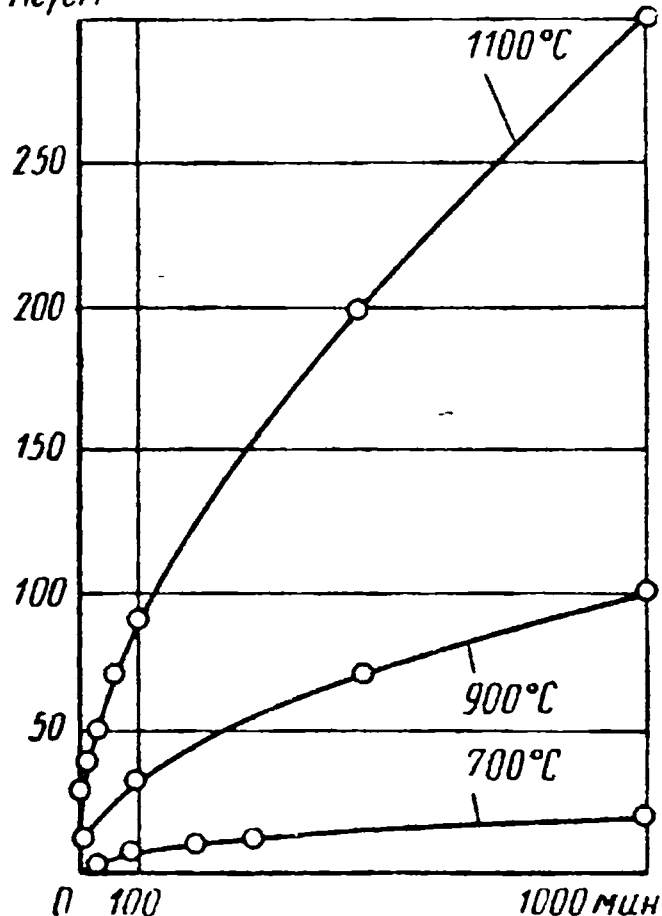


Рис. 18. Параболические кривые роста окисной пленки при окислении железа

ммк

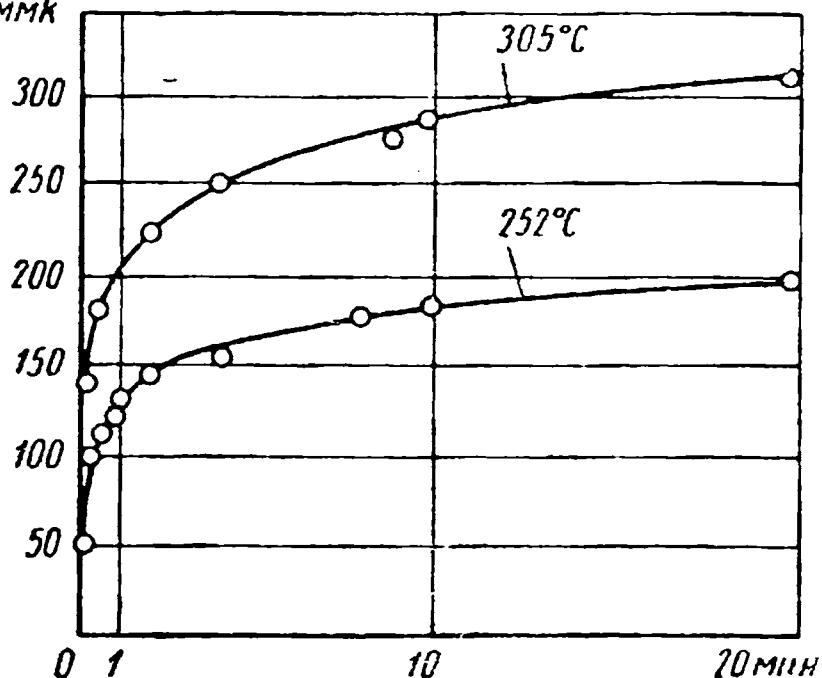


Рис. 19. Логарифмические кривые роста окисной пленки при окислении железа

ческие кривые, характеризующие рост окисной пленки при окислении железа на воздухе. Следует отметить, что логарифмический закон роста окисной пленки наиболее характерен в случае окисления металлов при низких температурах.

Скорость роста окисной пленки зависит от температуры в процессе окисления. С повышением температуры скорость увеличивается. Зависимость скорости роста толщины пленки от температуры может быть выражена уравнением

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

где Q — энергия активации процесса;
 R — газовая постоянная;
 T — абсолютная температура.

Образующиеся на металлах в результате окисления пленки делятся на тонкие, средние и толстые. Тонкими принято считать невидимые пленки от мономолекулярных до 400 Å, средними — 400—5000 Å и толстыми — выше 5000 Å (0,5 мкм). Толщины пленок, образующихся на металлах в зависимости от условий окисления, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Окисляющийся металл	Условия окисления	Толщина пленки в Å
Железо (0,04% С)	Выдержка несколько дней в сухом воздухе при комнатной температуре	15—25
Нержавеющая сталь X18H9T	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

Для осуществления процесса пайки металлов большое значение имеют не только толщина, но и свойства окисных пленок. Плотные, прочно связанные с металлом окисные пленки с трудом удаляются с поверхности металла, осложняя 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.

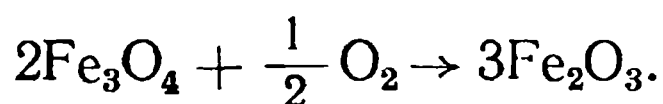
При окислении железа кислородом между ними возможно образование всех соединений, согласно диаграмме состояний железо—кислород. Окисная пленка на железе обычно имеет четко выраженный слоистый характер. На границе с металлом образуется закись железа FeO, соответствующая наименьшему содержанию кислорода в окисле. Затем следует промежуточный слой закиси-оксида железа Fe₃O₄ и на внешней поверхности пленки — высший окисел Fe₂O₃. 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 кристаллографическая ячейка вюстита содержит четыре иона железа Fe^{2+} и четыре иона кислорода O^{2-} . Закись железа устойчива только при температурах выше 570°C . При более низких температурах она не образуется, а при медленном охлаждении распадается с выделением металла:



При температуре 1377°C закись железа плавится.

Закись-окись железа Fe_3O_4 (кристаллографическое название — магнетит) имеет кубическую решетку. В состав элементарной ячейки магнетита входит восемь ионов железа Fe^{2+} , 16 ионов 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 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:



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 кристаллографической ячейки гематита, построенной по типу корунда, входит четыре иона железа Fe^{3+} и шесть ионов кислорода O^{2-} . Гематит устойчив в широком интервале температур, но при нагреве выше 1100°C он 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 образуется два вида окислов — закись меди Cu_2O и окись меди CuO . При взаимодействии с кислородом вначале образуется окись меди, которая при дальнейшем взаимодействии с медью переходит в закись. Окисная пленка на поверхности окислившейся меди состоит из очень тонкого наружного

слоя почти черной окиси меди и толстого, плотного и прочно связанного с металлом внутреннего слоя закиси меди, имеющей красный цвет.

При окислении никеля возникает только один тип окисла — закись никеля NiO , кристаллизующаяся в кубическую решетку типа каменной соли. Электронографические и рентгенографические исследования окисных пленок на никеле показали, что других возможных для никеля окислов, таких как Ni_3O_4 , Ni_2O_3 , при его окислении не образуется.

При окислении хрома образуются окислы состава Cr_2O_3 и CrO_3 . Окись хрома Cr_2O_3 имеет две модификации: $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$, кристаллизующуюся в ромбоэдрической решетке, и $\gamma\text{-Cr}_2\text{O}_3$, кристаллизующуюся в кубической решетке. В окисной пленке на поверхности хрома 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 наступает замедленная стадия взаимодействия хрома с кислородом воздуха. В термодинамическом отношении окись хрома очень устойчива. Она не диссоциирует даже в вакууме $1,33 \cdot 10^{-4}$ н/м² (10^{-6} мм рт. ст) при температуре 1000°C .

Кобальт при нагреве до высоких температур окисляется с образованием пленки, состоящей из двух слоев окислов. Оба эти слоя состоят в основном из фазы CoO . Опытами установлено, что внутренний слой получается передвижением кислорода в сторону металла, а внешний слой — передвижением кобальта наружу. При температурах ниже $900\text{—}950^\circ\text{C}$ образуется один слой окислов, который в основном состоит из фазы Co_3O_4 .

Титан 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. Поверхностный слой металла, как показали рентгенографические исследования, является твердым раствором кислорода в $\alpha\text{-Ti}$. При окислении титана в парах воды при температурах $800\text{—}1200^\circ\text{C}$ окисная пленка состоит только из фазы TiO_2 в модификации рутила; фаз Ti_2O_3 и TiO не обнаруживается. При этом образующаяся окисная пленка отличается монолитностью по сравнению со слоистой и пористой пленкой, образующейся при окислении на воздухе. При окислении титана одновременно протекают два процесса: образование окисной пленки на поверхности металла и растворение ее в металле. До температуры $300\text{—}350^\circ\text{C}$ с заметной скоростью протекает только первый процесс, который описывается логарифмическим законом. Выше 450°C определяющую роль в кинетике окисления играет процесс диффузии кислорода через окисную пленку. При нагреве титана в ва-

кууме и в инертных газах при температуре выше 700°C окисная пленка начинает интенсивно растворяться в титане [18].

Ниобий при взаимодействии с кислородом при температурах выше 400°C окисляется с образованием низкотемпературной модификации окисла $\alpha\text{-Nb}_2\text{O}_5$, под которым последовательно залегают фазы Nb_2O , NbO , а затем 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 $\beta\text{-Nb}_2\text{O}_5$. Этот процесс при нагреве выше 900°C усиливается. При температурах до 500°C на ниобии образуется сплошная, плотно прилегающая к металлу пленка. 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.

Алюминий при взаимодействии с кислородом при комнатной температуре окисляется с образованием первичной пленки толщиной $20\text{—}45\text{ \AA}$. Образование первичной пленки происходит в результате взаимодействия кислорода с поверхностью алюминия. Дальнейшее окисление алюминия тормозится, так как образовавшаяся пленка надежно изолирует металл от кислорода. Для окиси алюминия Al_2O_3 известны модификации: α , β , γ и др. Модификация $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) имеет ромбоэдрическую решетку, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ — гексагональную решетку и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ — кубическую гранцентрированную решетку. Наряду с этим 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 кубической модификации $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. В результате взаимодействия с влагой воздуха в окисной пленке на поверхности алюминия могут образовываться гидроокиси [5, 9, 16].

Магний при взаимодействии с кислородом быстро окисляется с образованием рыхлой пленки, состоящей из окиси магния. При взаимодействии магния с влажным воздухом весьма вероятно наряду с безводной окисью магния образование также и гидроокиси магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

При введении в рассмотренные металлы небольших добавок других металлов, последние по-разному могут влиять на процесс образования окисной пленки. Введенный металл может распределяться в окисной фазе, в которой некоторые катионы основного металла замещаются легирующей добавкой. В этом случае ско-

рость 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, могущие привести к перемене 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 закиси никеля NiO .

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 производится механическая зачистка или травление поверхности металлов в растворах щелочей или кислот. Однако за время между очисткой и пайкой тонкая окисная пленка на поверхности металлов вновь образуется. 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, активных газовых сред, вакуума, а также физико-механических способов разрушения окисной пленки.

§ 2. Флюсы и их роль

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

Несмотря на то, что при подготовке деталей к пайке окисная пленка с них удаляется, в атмосфере воздуха металл снова окисляется. С повышением температуры процесс окисления усиливается. Окисная пленка надежно изолирует металл, поэтому взаимодействие его с расплавленным припоем возможно лишь при

условии удаления пленки окислов непосредственно в процессе пайки, что достигается многими средствами, наиболее распространенным из которых является применение флюсов. Одновременно с удалением окисной пленки и защитой основного металла и припоя от окисления флюс должен удовлетворять еще ряду требований. Он должен иметь при температуре пайки достаточную жидкотекучесть, способствовать формированию шва, легко удаляться после пайки. Остатки флюса не должны оказывать коррозионного воздействия на паяемый металл. Нагрев флюса не должен вызывать изменения его состава и свойств, флюс должен сохранять свои флюсующие свойства в течение всего процесса пайки.

Нанесенный на соединяемые поверхности паяемых металлов и припой флюс в процессе нагрева плавится, растекается, смачивает их и при некоторой температуре, называемой минимальной температурой действия флюса, вступает в химические взаимодействия, результатом которых является удаление окисной пленки. 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 при паянии. С повышением температуры интенсивность этого взаимодействия усиливается. Верхний предел температурного интервала действия флюса ограничивается максимальной температурой действия флюса, при которой существенно снижается его активность за счет испарения отдельных компонентов и начинается окисление основного металла и припоя под слоем флюса. Интервал температур между минимальной и максимальной температурой действия флюса называется температурным интервалом действия флюса.

Композиция флюсов. В зависимости от физико-химических свойств паяемых металлов и припоя в качестве компонентов флюсов применяются соли, кислоты, окислы, а также вещества органического происхождения. Флюсы могут быть как однородными веществами, например тетраборнокислый натрий (обезвоженная бора) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ или хлористый цинк ZnCl_2 , так и сложными системами, состоящими из двух и более компонентов.

При разработке флюсов сложного состава исходят из следующего. Во-первых, флюс должен содержать вещества, которые являются как бы его основой, т. е. растворяют в своем составе остальные компоненты флюса и продукты флюсования, а при растекании образуют плотную пленку, защищающую металл от взаимодействия с воздухом. Во-вторых, флюс должен содержать вещества, способные интенсивно растворять окислы, находящиеся на поверхности основного металла и припоя. И, наконец, во флюс должны входить химически активные компоненты, которые являются активными флюсующими веществами, вступающими в химическое взаимодействие с окислами металлов или непосред-

ственно с металлами. Это разграничение имеет условный характер, однако оно позволяет сгруппировать составные части флюсов сложного состава и понять характер действия их в процессе флюсования.

В существующих флюсах сложного состава, применяемых для высокотемпературной пайки, в качестве основы чаще всего применяются устойчивые при нагреве соли или системы солей, например $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; $\text{KCl}-\text{NaCl}$; $\text{NaCl}-\text{BaCl}_2$; $\text{KCl}-\text{LiCl}$ и др. Свойства некоторых солей, применяемых в качестве основы флюсов сложного состава, приведены в табл. 3.

В боридных флюсах наиболее распространенной основой является система сплавов $\text{B}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, диаграмма состояний которой приведена на рис. 20. 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.

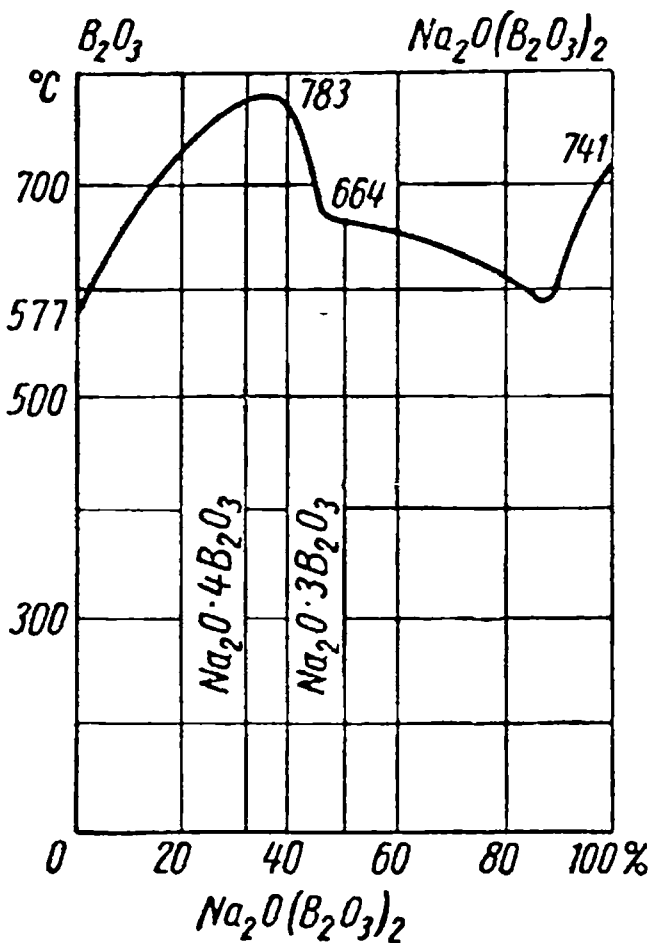


Рис. 20. Диаграмма состояний сплавов системы $\text{B}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}(\text{B}_2\text{O}_3)_2$

Из приведенных в табл. 3 хлоридов наиболее легкоплавкую эвтектику образуют между собой хлористый литий и хлористый калий (рис. 21). Сравнительно низкая температура плавления эвтектики $\text{LiCl}-\text{KCl}$ обеспечивает хорошую жидкотекучесть и высокие капиллярные свойства флюсов при довольно низких температурах пайки. Эта система солей устойчива также при

Таблица 3

Наименование вещества	Химическая формула	Плотность в г/см ³	Температура в °C	
			плавления	кипения
Тетраборнокислый натрий	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	2,37	741	1575
Хлористый калий	KCl	1,99	768—770	1406
» литий	LiCl	2,07	613	1380
» натрий	NaCl	2,16	800	1467
» барий	BaCl_2	3,86	960	1560
» кальций	CaCl_2	2,15	772	> 1600
» магний	MgCl_2	2,33	708	1412

повышенных температурах нагрева, что позволяет производить пайку при длительных выдержках.

Способностью растворять окислы металлов обладают фториды щелочных и щелочноземельных металлов, которые благодаря этому нашли широкое применение во флюсах (табл. 4).

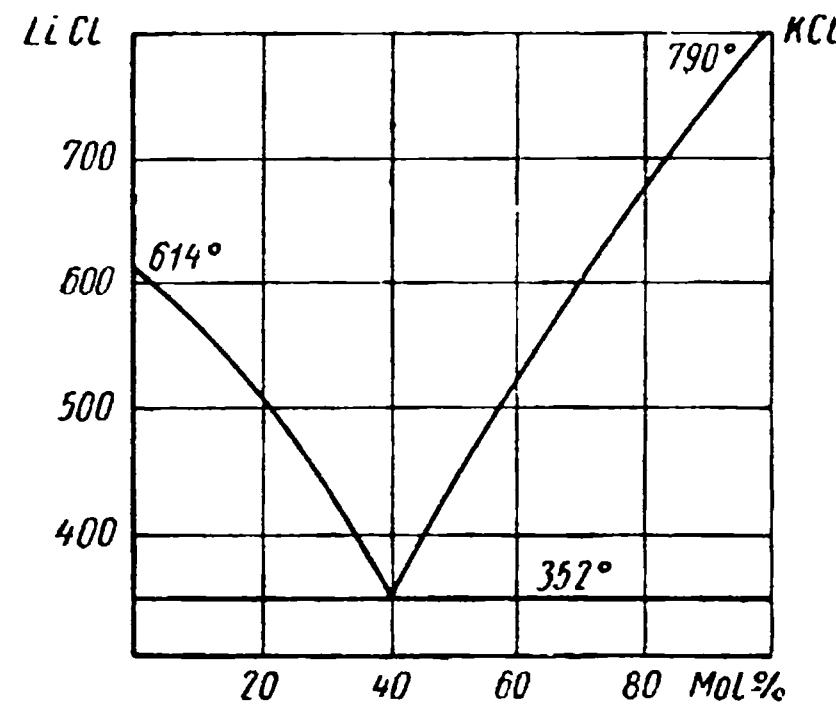


Рис. 21. Диаграмма состояния сплавов системы LiCl—KCl

Растворяющая способность приведенных фторидов по отношению к окислам различных металлов изменяется в довольно широких пределах, поэтому они выбираются 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 алюминиевых 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 определяется экспериментально.

Таблица 4

Наименование вещества	Химическая формула	Плотность в г/см³	Температура в °C	
			плавления	кипения
Фтористый калий . . .	KF	2,48	857	1505
» натрий . . .	NaF	2,79	995	1700
» литий . . .	LiF	2,30	842	1676
» барий . . .	BaF₂	4,83	1280	2267
» кальций . .	CaF₂	3,18	1403	2500
» магний . . .	MgF₂	3,00	1263	2239

Как можно видеть из кривой на рис. 22, площадь растекания припоя быстро возрастает 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 за счет содержания в нем фторидов является сравнительно длительным процессом

и не приводит к полному удалению окисной пленки. Поэтому во флюсы вводятся специальные активные вещества, которые при температуре пайки вступают в химические реакции с окисной пленкой или основным металлом. В качестве таких веществ в существующих флюсах применяются соли тяжелых металлов ($ZnCl_2$, $CdCl_2$, $SnCl_2$ и др.), вступающие со многими металлами в обменные реакции, и окислы, например B_2O_3 , взаимодействующие с окисной пленкой с образованием легкоплавких комплексов, переводящих ее в шлак. Количество активных компонентов, вводимых во флюс, определяется на основе экспериментальных

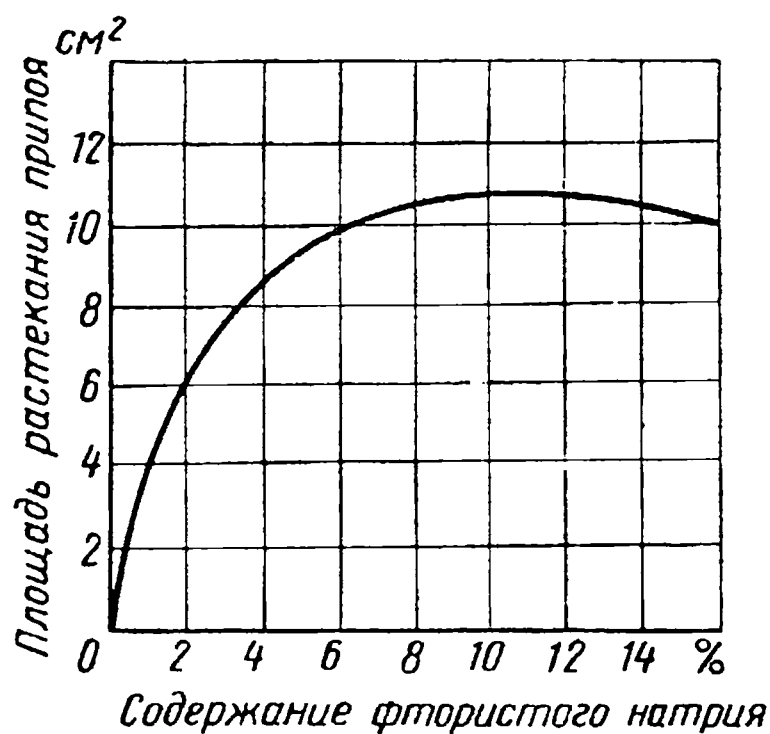


Рис. 22. Зависимость площади растекания припоя марки 34А по алюминию от содержания фтористого натрия во флюсе

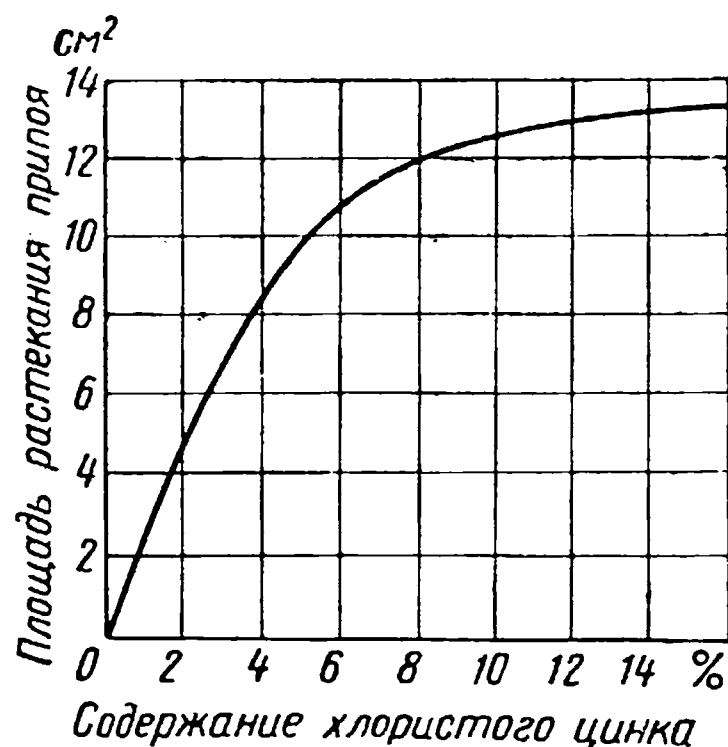


Рис. 23. Зависимость площади растекания припоя 34А по алюминию от содержания хлористого цинка во флюсе

данных в зависимости от площади растекания навески припоя по поверхности основного металла. На рис. 23 приведена зависимость площади растекания припоя 34А на алюминии от содержания хлористого цинка во флюсе. Из кривой можно видеть, что площадь растекания припоя до содержания хлористого цинка во флюсе 6—8% возрастает интенсивно, дальнейшее увеличение его содержания уже мало влияет на растекание припоя.

Таким образом, в состав флюсов сложного состава должны входить компоненты, способствующие удалению окисной пленки с поверхности основного металла и припоя, а также компоненты, выполняющие другие требования, предъявляемые к флюсам.

Классификация и составы флюсов. 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) 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. Тетраборно-кислый натрий, нашедший наиболее широкое применение во флюсах, получается 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°C происходит удаление 80% кристаллизационной воды. Полное обезвоживание наступает при температуре $350\text{—}400^\circ\text{C}$. Тетраборно-кислый натрий плавится при температуре около 740°C , однако до 800°C он остается очень вязким, и пайка с применением его в качестве флюса может производиться только при температурах выше 800°C .

Таблица 5

Химический состав флюса в % по весу	Температура пайки в $^\circ\text{C}$
Тетраборнокислый натрий (или его гидрат) — 100	800—1150
Тетраборнокислый натрий, гидрат — 50 Борная кислота — 50	850—1150

Борная кислота H_3BO_3 представляет собой белое кристаллическое вещество, довольно легко растворимое в горячей воде. При нагреве выше 70°C борная кислота разлагается. Во флюсы борная кислота, как правило, вводится вместе с тетраборнокислым натрием.

Борный ангидрид получается путем обезвоживания борной кислоты. При нагреве борная кислота теряет воду, последовательно превращаясь в метаборную HBO_2 , тетраборную кислоту $\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и в борный ангидрид B_2O_3 . По своим флюсующим свойствам борная кислота несколько уступает тетраборнокислому натрию.

Тетраборнокислый натрий, борная кислота и их смеси применяются в качестве флюсов при пайке углеродистых сталей, чугуна, меди, бронз, латуней медно-цинковыми и серебряными припоями с температурой плавления выше 800°C (табл. 5).

Если компоненты указанных флюсов предварительно обезвожить, то качество паяных соединений получается более высоким, что связано с уменьшением вредного влияния на металлы образующихся в процессе флюсования паров воды. Для пайки нержавеющих 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 применяются боридные флюсы сложного состава, в которые введены в качестве растворителей окисной пленки фториды металлов. Наиболее распространенные флюсы сложного состава на основе боридов приведены в табл. 6.

Более высокими флюсующими свойствами обладает флюс № 201 благодаря наличию в нем лигатуры. Действие ее основано

Флюс	Химический состав в % по весу	Температура пайки в °С
№ 200	Борная кислота — 68—72 Тетраборноокислый натрий — 19—21 Фтористый кальций — 8—10	850—1150
№ 201	Борная кислота — 79—81 Тетраборноокислый натрий — 13—15 Фтористый кальций — 5—6 Лигатура ¹ — 0,4—0,6	850—1150

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

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 припоя Л62 по нержавеющей стали Х18Н9Т при введении ее в основу флюса № 201 представлено на рис. 24. Образцы, представленные на рис. 24, а, характеризуют растекание припоя при применении флюса типа № 201 без лигатуры. Растекание навески припоя на образцах рис. 24, б—е происходило под флюсом типа № 201, содержащим лигатуру соответственно 0,5; 1,0; 1,5; 2 и 2,5%. При сравнении площадей растекания припоя видно, что наилучшими флюсующими свойствами обладает флюс при содержании 1,5—2% лигатуры. Вводя в этот флюс дополнительно 5—6% фтористого кальция, аналогичный результат можно получить при содержании лигатуры в количестве 0,4—0,6%.

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° С, находится в растворенном состоянии и при избыточном введении выпадает в осадок, то во флюсах на основе фторидов последние образуют легкоплавкую систему и при температуре пайки полностью находятся в расплавленном состоянии (табл. 7).

Наиболее легкоплавким и весьма активным является флюс № 284, который обеспечивает высокие механические свойства паяных соединений. Следующим по активности является флюс № 209, который из-за его 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.

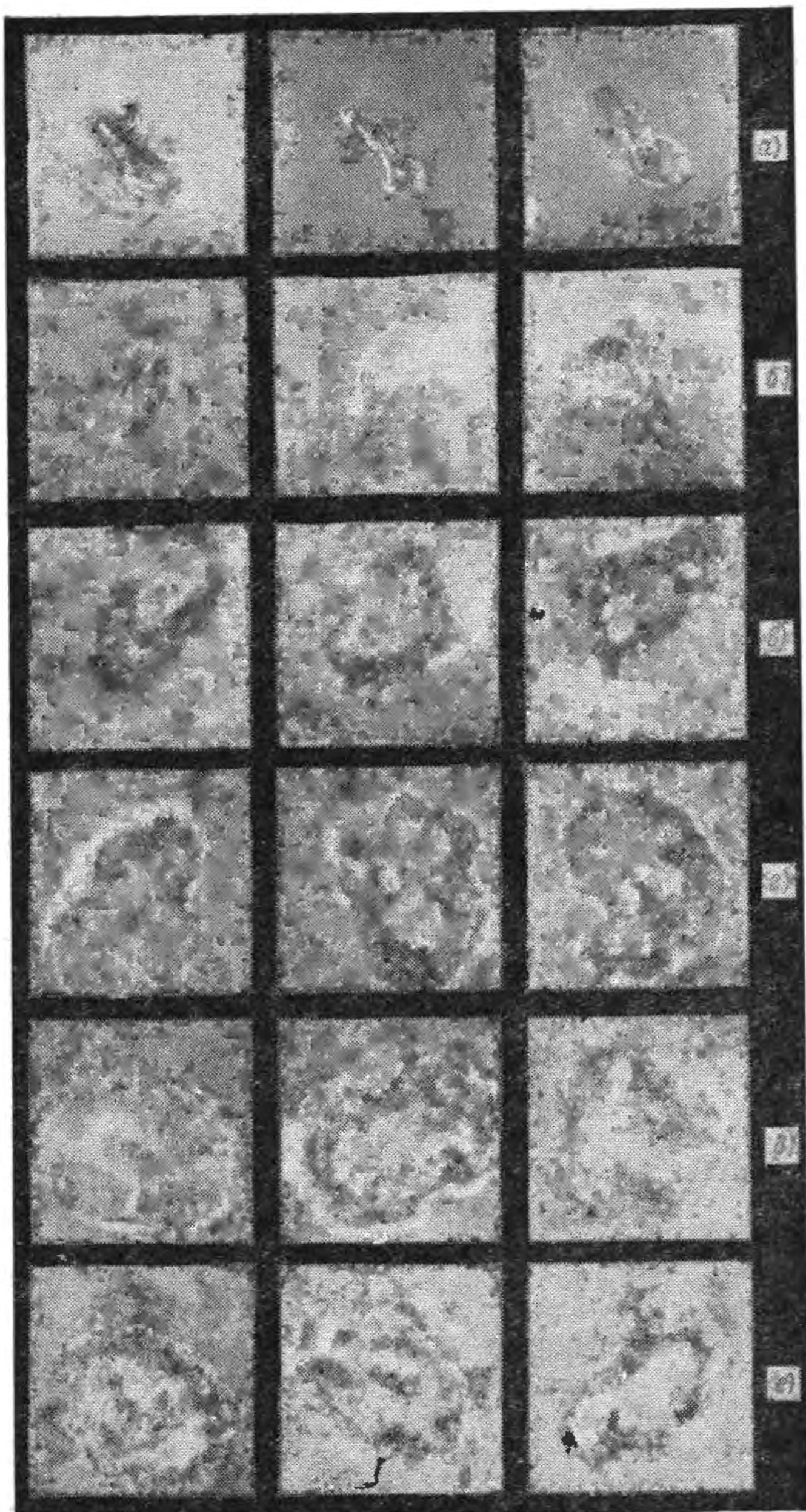


Рис. 24. Влияние лигатуры Al—Cu—Mg во флюсе на растекание припоя Л62 по стали X18H9T

Таблица 7

Флюс	Химический состав в % по весу	Температура пайки в °С
№ 209	Фтористый калий (обезвоженный) — 40—44 Фторборат калия — 21—25 Борный ангидрид — 33—37	600—850
№ 284	Фтористый калий (обезвоженный) — 33—37 Фторборат калия — 40—44 Борный ангидрид — 23—25	500—850
№ 18В	Фтористый калий — (обезвоженный) — 40 Борная кислота — 60	650—850

Рассмотренные выше флюсы на основе соединений бора и фтористых соединений пригодны для пайки конструкционных, нержавеющих 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 применяются флюсы третьей группы. Основой этих флюсов обычно является легкоплавкая эвтектика LiCl—KCl или минерал карналлит. Растворителем окислов обычно является фтористый натрий. В качестве активного компонента чаще всего применяется хлористый цинк. Составы некоторых флюсов для пайки алюминия, магния и сплавов на их основе приведены в табл. 8 [29, 30].

Таблица 8

Флюс	Химический состав в % по весу	Температура пайки в °С	Назначение флюса
34А	Хлористый калий — 54—56 Хлористый литий — 29—35 Фтористый натрий — 9—11 Хлористый цинк — 8—12	420—620	Для пайки алюминия и его сплавов
Ф 320А	Хлористый калий — 28 » литий — 42 Фтористый натрий — 6 Хлористый цинк — 24	420—620	Для пайки алюминия и его сплавов
№ 5	Карналлит плавленный — 89 Криолит — 8 Окись цинка — 3	425—620	Для пайки магниевых сплавов

Исследования (рис. 23) показали, что оптимальное содержание хлористого цинка во флюсах для пайки алюминиевых сплавов составляет около 10%. 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) около паяного шва.

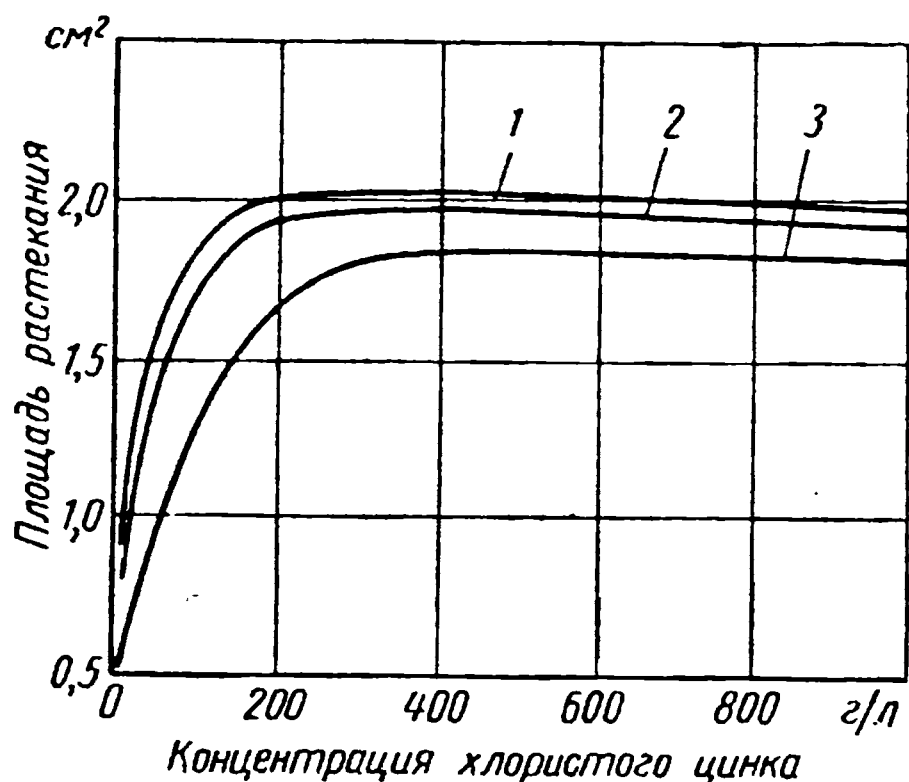


Рис. 25. Изменение площади растекания припоев по стали 08кп в зависимости от содержания во флюсе хлористого цинка:

1 — ПЛОСС4-6; 2 — олово; 3 — свинец

С флюсами 34А и Ф 320А можно паять также и магниевые сплавы, однако из-за большого количества хлористого цинка эти флюсы (особенно Ф 320А) вызывают сильную эрозию поверхности магния. Флюс № 5 не имеет этого недостатка.

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

Из приведенных на рис. 25 кривых можно видеть, что при применении в качестве припоя даже чистого свинца, увеличение концентрации хлористого цинка выше 300 г/дм³ (г/л) не имеет смысла. Поэтому в существующих флюсах на основе водных растворов хлористого цинка содержание последнего составляет обычно 200—300 г/дм³ (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. 9.

Таблица 9

Химический состав флюса в % по весу	Температура пайки в °C	Назначение флюса
Хлористый цинк — 25 Вода — 75	290—350	Для пайки сталей, меди и ее сплавов
Хлористый цинк — 18 » аммоний — 6 Вода — 76	180—320	То же
Хлористый цинк — 25 Соляная кислота — 25 Вода — 50	180—320	Для пайки нержавеющей сталей

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.

Флюсы четвертой группы на основе канифоли и других органических соединений применяются при низкотемпературной пайке металлов 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 для применения ее растворы в спирте.

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. Флюсующее действие канифоли объясняется наличием в ее составе абиетиновой кислоты $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$ и других органических кислот, растворяющих окислы меди и некоторых других металлов. При температуре 125°C канифоль переходит в жидкое состояние, а при нагреве до 300°C разлагается. Нагрев канифоли выше 300°C приводит к обугливанию и потере флюсующих свойств. Составы канифольных

флюсов, применяемых для пайки монтажных соединений из меди в электро- и радиоаппаратуре, приведены в табл. 10.

Для пайки металлов и сплавов, окислы которых плохо удаляются канифолью или ее растворами, применяют канифольные флюсы с добавками активизаторов. Такими активизи-

рующими добавками являются анилин $C_6H_5NH_2$, триэтанолламин $N(CH_2CH_2OH)_3$, 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 коррозионно-активных компонентов остатки флюса могут вызвать коррозию. Составы и области применения некоторых активизированных канифольных флюсов приведены в табл. 11 [15].

Наименование флюса	Химический состав в % по весу	Температура пайки в °C
Канифоль	Канифоль — 100	150—300
Флюс КЭ	Канифоль — 25 Спирт этиловый — 75	150—300

Таблица 11

Наименование флюса	Химический состав в % по весу	Температура пайки в °C	Назначение флюса
Флюс ЛК-2	Канифоль — 28 Хлористый цинк — 3 » аммоний — 1 Спирт этиловый — остальное	280—300	Для пайки меди, ее сплавов, оцинкованного железа и никеля
Флюс ЛТИ-120	Канифоль — 20—25 Триэтанолламин — 1—2 Диэтиламин солянокислый — 3—5 Спирт этиловый — остальное	230—330	То же
Флюс КС	Канифоль — 30 Салициловая кислота — 2,8 Триэтанолламин — 1,4 Спирт этиловый — остальное	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 начинают находить применение флюсы, содержащие в качестве активных компонентов борфториды кадмия и цинка. В качестве основы таких флюсов применяют обычно высококипящие органические соединения, например триэтаноламин. Так, в промышленности начинает находить применение флюс Ф61А (10% борфторида кадмия, 8% борфторида цинка и 82% триэтанолamina) для пайки алюминия сравнительно легкоплавкими припоями [24].

Механизм флюсования. Ввиду резкого различия применяемых при пайке флюсов по составу химизм их действия в процессе флюсования весьма разнообразен. 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, механизм взаимодействия активных компонентов флюсов в процессе пайки сводят, обычно, к трем основным схемам:

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

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

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

В условиях флюсовой пайки все три схемы действия флюса могут проявляться одновременно. Кроме того, на протекание этих процессов определяющее влияние оказывает состав основного металла и припоя, что нельзя не учитывать, особенно при содержании в них таких активных компонентов, как 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 рыхлится. После расплавления флюса происходит смачивание им окисленной поверхности основного металла, при этом создаются

условия для взаимодействия активных компонентов флюсов с поверхностью основного металла и припоя. Наиболее легко смачивают поверхность окисленного металла органические жидкости, что объясняется их низким поверхностным натяжением. Соли, входящие в состав флюсов, имеют в расплавленном состоянии также сравнительно низкое поверхностное натяжение, что способствует хорошей смачиваемости ими поверхности основного металла и припоя. Смачивание зависит также от величины поверхностного натяжения флюса на границе твердое тело — флюс. Величины поверхностного натяжения для солей, входящих во флюсы, приведены в табл. 12.

Таблица 12

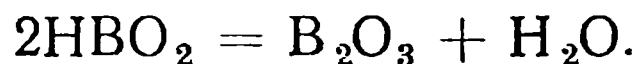
Наименование соли	Химическая формула	Температура в °С	Поверхностное натяжение в н/м (эрг/см ²)
Тетраборнокислый натрий	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	1000	0,211 (211,9)
Хлористый калий	KCl	780	0,097 (97)
» натрий	NaCl	801	0,114 (114)
Хлористый литий	LiCl	603	0,140 (140)
» кадмий	CdCl_2	602	0,077 (77,2)
» барий	BaCl_2	962	0,171 (171)
Двухлористое олово	SnCl_2	307	0,097 (97)
Фтористый цезий	CsF	692	0,107 (107)
» литий	LiF	840	0,255 (255)
» калий	KF	846	0,098 (98,4)
» натрий	NaF	1010	0,199 (199,5)

С повышением температуры пайки поверхностное натяжение расплавленных солей снижается, что улучшает условия смачивания. После растекания флюса и смачивания им поверхности основного металла, ввиду неодинаковой растворяющей способности флюса по отношению к окислам различных металлов, происходит избирательное растворение окисной пленки. Она как бы выщелачивается 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

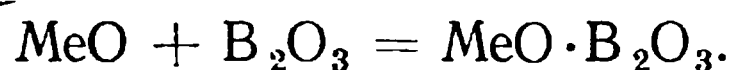
флюсов, содержащих бориды. Так, тетраборнокислый натрий при флюсовании разлагается с выделением борного ангидрида:



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 главным образом химически воздействует на окисную пленку основного металла и припоя, связывая окислы в комплексы по реакции

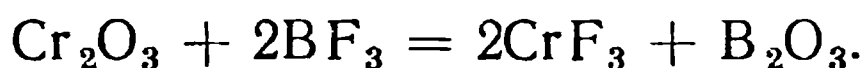


Так, при пайке сталей, меди и латуней образуются следующие легкоплавкие бораты: $2\text{FeO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3$, $\text{CuO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, $\text{CuO} \times \text{ZnO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ и др.

Бораты более сложного состава, такие как фторборат калия KBF_4 , разлагаются при пайке по реакции



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:



Борный ангидрид, образующийся при этой реакции, может вступать в дальнейшие взаимодействия с окислами, образуя бораты.

Если в процессе флюсования протекает реакция между активным флюсующим веществом флюса и паяемым металлом, то удаление окисной пленки происходит в основном в результате ее механического разрушения 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. Указанному 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



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



Рис. 26. Микроструктура поверхностного слоя алюминия после взаимодействия с припоем 34А при температуре пайки; $\times 80$

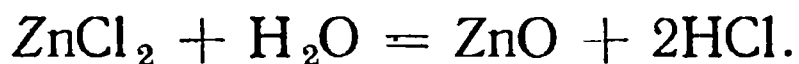
последнего с припоем. Из рис. 26 можно видеть, что в результате флюсования на поверхность алюминия отлагается довольно значительный слой металлического цинка. Пары хлористого алюминия, выделяющиеся при флюсовании, токсичны, однако они интенсивно растворяются в расплавленном флюсе в процессе пайки, поэтому не оказывают вредного действия.

По современным воззрениям, расплавленные соли находятся в ионизированном состоянии, поэтому приведенные выше процессы флюсования следует рассматривать как электрохимические. Так, при флюсовании алюминия, электрохимический процесс протекает 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 Al^{3+} , на катоде в результате перехода ионов кислорода O^{2-} . Ионы алюминия, отрываясь от поверхности металла, приводят к постепенному нарушению связей частиц окисной пленки с металлом. Таким образом, электрохимический процесс

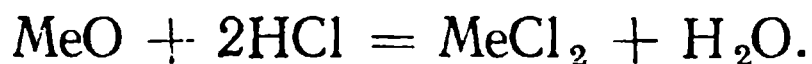
вызывает разрыхление окисной пленки, отрыв ее от металла и переход в шлак.

В результате взаимодействия ионов алюминия и кислорода в расплаве электролита (флюса) образуется дисперсная окись алюминия. Требуемый для протекания этой реакции кислород, постепенно поступая 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. 27 [60].

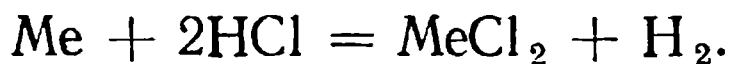
Рассмотренные выше флюсы применяются при высокотемпературной пайке в состоянии расплавов. При низкотемпературной пайке солевые флюсы используются также в виде водных растворов. Наиболее распространенными из них являются флюсы на основе хлористого цинка. При пайке с этими флюсами вследствие гидролиза 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



Образующийся хлористый водород взаимодействует с окисной пленкой по реакции



Хлористый водород, растворяясь в воде, образует соляную кислоту, которая непосредственно взаимодействует с металлами:



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

Флюсующее действие применяемых при низкотемпературной пайке канифоли и флюсов на ее основе объясняется способностью органических кислот, содержащихся в ней, растворять окислы некоторых металлов. Механизм действия активных добавок канифольных флюсов к настоящему времени изучен мало. Некоторые из них обладают исключительно ценными свойствами. Так,

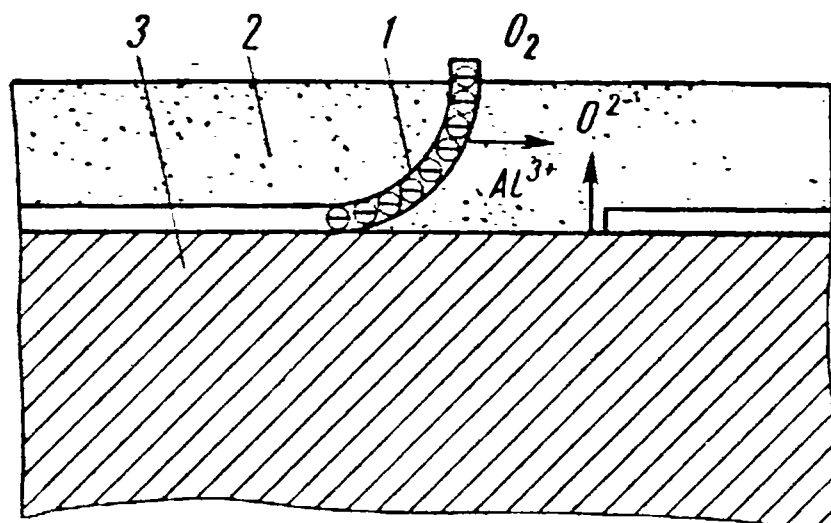
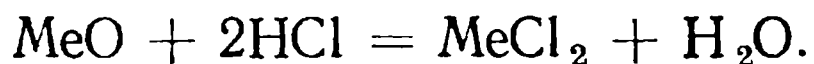


Рис. 27. Схема механизма удаления окисной пленки при пайке алюминия в результате электрохимических процессов:

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

солянокислый анилин $C_6H_5NH_2HCl$ при нагреве выделяет хлористый водород, который взаимодействует с окислами основного металла и припой с образованием легко растворимых во флюсе хлоридов [63]:



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 произойдет преждевременное протекание процесса флюсования. В этом случае слой расплавленного флюса будет слишком тонким, что может привести к окислению основного металла до момента расплавления припоя.

Пайка с флюсами является наиболее распространенной и общедоступной, так как ее можно осуществлять в обычных атмосферных условиях без применения дорогостоящего оборудования. Однако область ее применения ограничена ввиду невозможности в ряде случаев полного удаления остатков 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 металлов в процессе пайки. В результате были найдены искусственные газовые среды, применение которых позволило производить пайку без флюсов. Такие искусственные среды можно разделить на три основных типа: нейтральные атмосферы, активные атмосферы, вакуум.

Нейтральные газовые атмосферы не вступают в процессе пайки в химические взаимодействия ни с окисными пленками на поверхности металлов, ни с металлами. Роль газовой среды в этом случае сводится к защите металлов от окисления. В качестве нейтральных сред при пайке нашли применение главным образом инертные газы, аргон и гелий.

Наряду с нейтральными средами при пайке применяются активные газовые среды, которые не только защищают металлы от окисления, но и способствуют удалению окисной пленки в процессе пайки. Среди активных сред наибольшее распростра-

нение получили водород и различные газовые смеси, содержащие водород и окись углерода.

Вакуум так же, как и активные газовые среды, создает защиту от окисления и способствует удалению с поверхности металлов окисной пленки. При пайке в вакууме в результате разрежения парциальное давление кислорода становится ничтожным, и, следовательно, резко уменьшается возможность окисления металлов. Вместе с тем, при высокотемпературной пайке в вакууме создаются условия для диссоциации некоторых окислов металлов.

Нейтральные атмосферы выступают в роли защитной атмосферы. Среди нейтральных газов, получивших наибольшее распространение, является аргон — одноатомный газ с плотностью $1,78 \text{ кг/м}^3$. Он добывается из воздуха как побочный продукт при получении кислорода. Составы чистого аргона, поставляемого по ГОСТу 10157-62, приведены в табл. 13.

Таблица 13

Состав аргона	Аргон в % не менее	Азот в % не более	Кислород в % не более	Влага в г/м ³ не более
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 выбираются в зависимости от активности паяемых металлов и припоя к кислороду. Чистый аргон всех трех составов нашел применение при пайке нержавеющей и жаропрочных сталей, вольфрама, титана и других металлов. При пайке титана и его сплавов предпочитается аргон состава А. Для сталей может применяться аргон состава Б и В. Чистый аргон всех трех составов может применяться для пайки без дополнительной осушки и очистки его от примесей кислорода. Ввиду высокой стоимости аргона целесообразно в случае печной пайки производить его регенерацию.

Гелий — одноатомный инертный газ, имеет плотность $0,178 \text{ кг/м}^3$. 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 любых конструкционных материалов. Широкого распространения в нашей стране гелий не получил, так как его промышленное производство еще не освоено и он является пока дорогим.

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 с плотностью $1,251 \text{ кг/м}^3$. При комнатной температуре азот отличается большой инертностью, но при нагреве до высоких темпера-

тур вступает во взаимодействие со многими металлами. В чистом виде азот применяется при пайке меди и сталей. В потоке сухого азота окислы меди разлагаются при температуре 740—750° С, вместо 2000° С при нагреве в атмосфере воздуха. Следовательно, бесфлюсовая пайка меди в атмосфере азота возможна при температуре 750° С и выше. Пайка сталей в атмосфере азота, особенно нержавеющей, происходит при температуре около 1200° С. 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.

Активные атмосферы делятся 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 относятся 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 кг/м³. В заметное взаимодействие с кислородом водород вступает при температуре 300° С. При нагреве до 700° С водород с кислородом взаимодействует со взрывом. Очищенный от примесей других газов и паров воды водород является одним из лучших восстановителей металлов из окислов, но взрывоопасность ограничивает его применение, поэтому для пайки водород в чистом виде применяется редко и только в печах малого объема. Наиболее целесообразно применение водорода 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 NH₃ при нормальных условиях имеет плотность 0,77 кг/м³. При нагреве до температуры выше 535° С в присутствии катализатора аммиак разлагается на водород и азот:



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 снижение восстановительных свойств. Образующаяся при диссоциации газовая смесь водорода с азотом не должна содержать также недиссоциированного аммиака, 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 применением их для пайки необходимо производить тщательную осушку, а также очистку от примеси кислорода.

Наряду с рассмотренными восстановительными газами и газовыми смесями при пайке нашли применение газовые атмосферы сложного состава, представляющие собой продукты сгорания, образующиеся при сжигании горючих газов с дозированным количеством воздуха. Меняя соотношение горючего газа и воздуха, состав получаемых продуктов сгорания можно регулировать. 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 подвергаются осушке и очистке от соединений серы. При недостаточно тщательной осушке газовые среды, особенно экзотермические, вызывают обезуглероживание поверхности сталей и для пайки непригодны.

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 подбираются так, чтобы происходило разложение углеводородов при неполном сгорании. Основными составляющими образующейся при неполном сгорании газовой смеси являются водород, окись углерода и азот. Такие газовые смеси, не содержащие влаги, не обезуглероживают сталей в процессе пайки или даже оказывают слегка науглероживающее действие. Составы атмосфер, полученных при неполном сгорании городского газа в воздухе, приведены в табл. 14 [7]. Продукты

Соотношение горючий газ: воздух	Химический состав в %					Точка росы в °С*
	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

* Точкой росы называется температура, до которой должен быть охлажден газ, чтобы содержащийся в нем водяной пар достиг насыщения и начал конденсироваться на окружающих предметах.

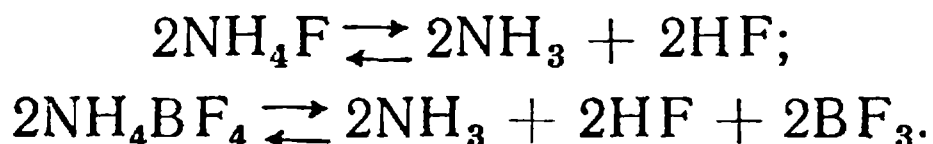
сгорания при неполном сжигании получаются более сухими, поэтому надобность в применении осушителей при пайке низкоуглеродистых сталей отпадает. Из реторты, где происходит разложение углеводородов, газ может направляться непосредственно в печь для пайки. Состав и назначение применяемых при пайке восстановительных газовых сред приведены в табл. 15.

Таблица 15

Наименование атмосферы	Химический состав в %				Назначение
	H ₂	CO	N ₂	CO ₂	
Водород	100	—	—	—	Для пайки сталей и жаропрочных сплавов
Диссоциированный аммиак	75	—	25	—	Для пайки углеродистых и низколегированных сталей
Продукты неполного сжигания диссоциированного аммиака	7—20	—	Ост.	—	Для пайки низкоуглеродистых сталей
Продукты сгорания горючего газа	14—15	9—10	70—71	5—6	То же
Продукты сгорания горючего газа	38—40	17—19	41—55	—	Для пайки средне- и высокоуглеродистых сталей

Приведенные в таблице газовые атмосферы обычно содержат примеси кислорода и паров воды, которые необходимо тщательно удалять перед пайкой. Осушка газов производится путем пропускания их через силикагель, алюмогель или фосфорный ангидрид, которые обеспечивают точку росы соответственно — 40° С; —60° С и —80° С [19]. При осушке фосфорным ангидридом газ предварительно пропускается через силикагель и алюмогель, что удлиняет срок службы колонки с фосфорным ангидридом. Примеси кислорода из восстановительных атмосфер удаляются путем пропускания газа через поглотители, в качестве которых применяется обычно медная стружка. Для тонкой очистки инертных газов от кислорода, азота и паров воды применяется титановая или циркониевая губка.

К активным газовым средам относятся также газообразные флюсы. Они применяются как самостоятельные газовые атмосферы или как добавка в нейтральные и восстановительные газовые среды для повышения их активности в процессе пайки. В качестве газообразных флюсов применяются фтористый водород HF, трехфтористый бор BF₃, борорганические соединения и другие вещества. Газообразные флюсы получают или в специальном диссоциаторе, из которого он подается к месту пайки, или же исходные продукты, при разложении которых образуется газообразный флюс, вносятся непосредственно в контейнер, в котором производится пайка. Для получения газообразных флюсов служат фтористый аммоний NH₄F, фторборат аммония NH₄BF₄, фторборат калия KBF₄. При неполном распаде фтористого аммония и фторбората аммония протекают реакции:



Полный распад фтористого аммония на водород, азот и фтористый водород происходит при температуре 600—800° С. Фторборат аммония полностью разлагается на водород, азот, фтористый водород и трехфтористый бор при 850—950° С. 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—900° С по реакции

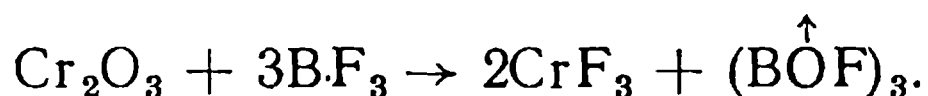


Следует отметить, что при пайке с применением фторбората калия высокой флюсующей активностью обладает как сам фторборат калия, так и продукты его распада.

В качестве активной добавки в нейтральные и восстановительные газовые среды чаще всего используется трехфтористый бор, который может поставляться в баллонах.

При пайке газовыми горелками пары исходных продуктов, из которых образуются газообразные флюсы, могут добавляться в горючие газы, при сгорании которых 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.

Механизм действия газообразного флюса рассмотрим на примере трехфтористого бора. При температуре пайки трехфтористый бор вступает в реакцию с окислами металлов:



При недостаточном количестве трехфтористого бора в зоне пайки протекает реакция



Фторокись бора $(\text{BOF})_3$ газообразна и легко удаляется. Твердые остатки B_2O_3 и CrF_3 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 в их промывке после пайки. Применение газовых сред облегчает также механизацию и автоматизацию процесса пайки.

Вакуум представляет собой разреженное состояние газа, создаваемое путем откачки его насосами из контейнера или печи, в которых производится пайка. Вакуум разделяется на низкий, средний (форвакуум) и высокий. Границей между высоким и средним вакуумом принято считать давление $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ н/м}^2$ ($10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$). Область давлений ниже $13,3 \text{ н/м}^2$ ($10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$) относят к низкому вакууму. Низкий вакуум для пайки, как правило, не применяется. Средний вакуум от $1,33 \cdot 10$ до $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ н/м}^2$ (10^{-1} до $10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$) используется 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 созда-

ния высокого вакуума, пайку указанных 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 $1,33—1,33 \cdot 10^{-1}$ н/м² ($10^{-2}—10^{-3}$ мм рт. ст.), после чего вакуумированное пространство заполняется чистым аргоном, который вновь откачивается 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 вакуумноплотных и прочных паяных соединений.

Пайка в вакууме наряду с высокой прочностью паяных соединений позволяет предупредить охрупчивание нержавеющей стали и жаропрочных сплавов, ввиду отсутствия возможности образования на их поверхности нитридов и гидридов. Единственным недостатком пайки в вакууме является сравнительная сложность и высокая стоимость оборудования.

При пайке металлов в рассмотренных 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.

Диссоциация окислов. Прочность связи элементов в окислах, определяющая возможность их разложения, может быть приближенно оценена по теплотам их образования, на основе которых можно судить о стойкости окислов и способности их диссоциировать при нагреве. 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 окисной пленки в целом 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. Температуры полного разложения некоторых окислов металлов в атмосфере воздуха приведены в табл. 16.

Как можно видеть из табл. 16, значения температур полного разложения в атмосфере воздуха окислов отдельных применяемых в машиностроении металлов достаточно высоки. Для того чтобы создать условия разложения при более низких температурах, необ-

ходимо наряду с нагревом уменьшать 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 обратимой реакции между металлом и кислородом

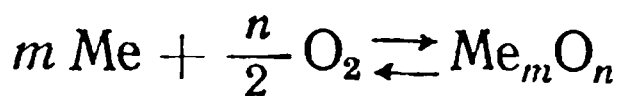


Таблица 16

Наименование окислов	Химическая формула	Температура разложения в °C
Закись золота	Au ₂ O	250
Окись платины	PtO ₂	300
» серебра	Ag ₂ O	300
» ртути	HgO	440
» кадмия	CdO	900
Закись меди	Cu ₂ O	1835
Окись свинца	PbO	2348
Закись никеля	NiO	2751
» железа	FeO	3000
Закись марганца	MnO	3500
Окись цинка	ZnO	3817

определяется из соотношения

$$K_c = \frac{C_{\text{Me}}^m \cdot C_{\text{O}_2}^{\frac{n}{2}}}{C_{\text{Me}_m \text{ O}_n}},$$

где C_{Me} , C_{O_2} , $C_{\text{Me}_m \text{ O}_n}$ — концентрации металла, кислорода и окисла.

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

$$K_p = \frac{p_{\text{Me}}^m \cdot p_{\text{O}_2}^{\frac{n}{2}}}{p_{\text{Me}_m \text{ O}_n}},$$

где p_{Me} , p_{O_2} , $p_{\text{Me}_m \text{ O}_n}$ — парциальные давления металла, кислорода и окисла.

При неизменной температуре реакции между металлом и кислородом парциальные давления металла p_{Me} и окисла $p_{\text{Me}_m \text{ O}_n}$ являются величинами постоянными. Поэтому в общем случае для реакций окисления металлов или разложения их окислов можно записать

$$K_p = a p_{\text{O}_2},$$

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

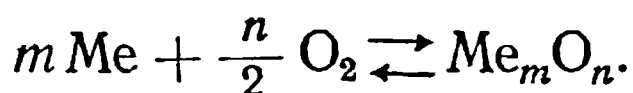
$$\lg p_{\text{O}_2} = -\frac{Q_v}{4,571T} + 1,75 \lg T + 2,8,$$

где Q_v — теплота диссоциации окисла, отнесенная к молю кислорода;

T — температура в °K.

На основе этой формулы были построены кривые зависимости давления диссоциации окислов некоторых элементов от температуры (рис. 28).

Каждая из приведенных кривых отражает равновесное состояние реакции



Из кривых можно видеть, что при неизменном парциальном давлении кислорода в газовой среде увеличение температуры нагрева смещает равновесие в сторону диссоциации окисла. При постоянной температуре нагрева при уменьшении парциального давления кислорода будет происходить диссоциация окислов, при увеличении — 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. 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. Значения необходимого вакуума для диссоциации окислов некоторых металлов приведены в табл. 17.

Приведенные данные вычислены теоретическим путем [53]. При анализе их 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 необычайно высокие значения вакуума, которые в условиях пайки совершенно недостижимы, указывают на то, что пайку этих металлов в вакууме осуществить нельзя. Но общеизвестно, что при температуре 1100—1200° С пайка сталей и титановых сплавов протекает успешно при среднем вакууме. Отсюда

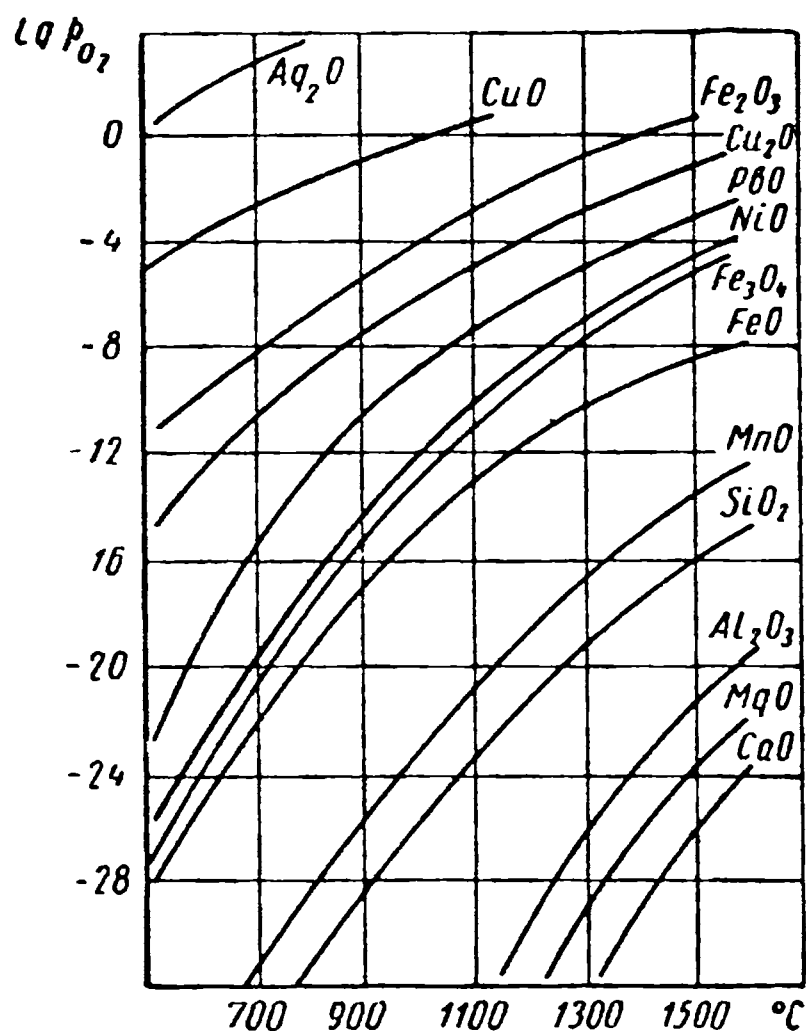


Рис. 28. Зависимость давления диссоциации окислов от температуры

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, подготавливая таким образом основной металл для смачивания припоем. Наиболее яркий при-

Таблица 17

Наименование окисла	Химическая формула	Температура в °C	Давление при равновесии в н/м ² (мм рт. ст.)
Закись железа	FeO	1150	$1,33 \cdot 10^{-8}$ (10^{-10})
Окись хрома	Cr ₂ O ₃	1150	$1,33 \cdot 10^{-13}$ (10^{-15})
То же	Cr ₂ O ₃	850	$1,33 \cdot 10^{-21}$ (10^{-23})
Закись марганца	MnO	1150	$1,33 \cdot 10^{-16}$ (10^{-18})
Окись кремния	SiO ₂	1150	$1,33 \cdot 10^{-17}$ (10^{-19})
Дву-окись титана	TiO ₂	1150	$1,33 \cdot 10^{-19}$ (10^{-21})
Окись алюминия	Al ₂ O ₃	1150	$1,33 \cdot 10^{-25}$ (10^{-27})

мер, подтверждающий сказанное, пайка титана в вакууме ($1,33—1,33 \cdot 10^{-2}$ н/м² или $10^{-2}—10^{-4}$ мм рт. ст.), успешно протекающая при температуре около 1000° С. Последнее вполне согласуется с данными о том, что окисная пленка титана растворяется в металле при температуре выше 700° С.

Не исключена также возможность испарения некоторых окислов, а также растворения их в расплавленном припое. Сказанное выше о механизме удаления окисной пленки в процессе пайки в вакууме относится также и к высокотемпературной

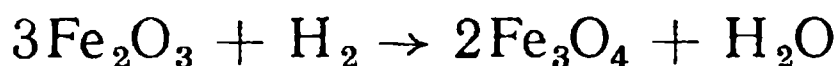
пайке в нейтральных газовых атмосферах, тщательно очищенных от кислорода и других вредных примесей.

Восстановление окислов. При пайке металлов в качестве восстановителей окислов окисной пленки нашли применение главным образом водород Н₂ и окись углерода СО. Водород обладает более высокими восстановительными свойствами по сравнению с окисью углерода. Проведенные опыты по восстановлению магнетита Fe₃O₄ и гематита Fe₂O₃ при 500° С и давлениях до 0,02 мм рт. ст. показали, что водород восстанавливает их примерно в 20 раз быстрее, чем окись углерода. Восстановление тех же окислов при 800° С 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° С в момент прекращения реакции



содержание паров воды составляет 16%, в то время как равновесное содержание паров воды близко к 100%.

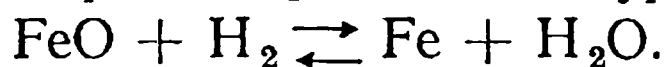
При восстановлении магнетита окисью углерода реакция



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 индукционном периоде восстановления. Кривые, характеризующие влияние продуктов реакций восстановления на восстановительные свойства водорода и окиси углерода при взаимодействии с окислами железа и хрома, приведены на рис. 29. Выше кривых расположена область восстановления, ниже — область окисления.

Как можно видеть из кривых 1 и 3, 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 необходимо повышение температуры.

При температурах выше 570°C , при которых протекает высоко-температурная пайка железоуглеродистых сплавов, реакция между закисью железа и водородом протекает по уравнению



Скорость прямой и обратной реакции, когда одновременно взаимодействуют газы и твердые вещества, зависит не от объемной концентрации твердых веществ, а от их поверхности, по которой происходит реакция. Поскольку при пайке она неизменна и ско-

рость реакции зависит только от концентрации газообразных веществ, то константа равновесия приведенной реакции определится отноше-нием

$$K_1 = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

При увеличении констан-ты равновесия, т. е. при уве-личении содержания водо-рода или снижении влажности газовой среды, реакция сме-щается вправо, в сторону восстановления металла из окислов. При уменьшении константы равновесия, т. е. при уменьшении содержания водорода или повышении влажности газовой среды, реакция между металлом и газовой средой смещается

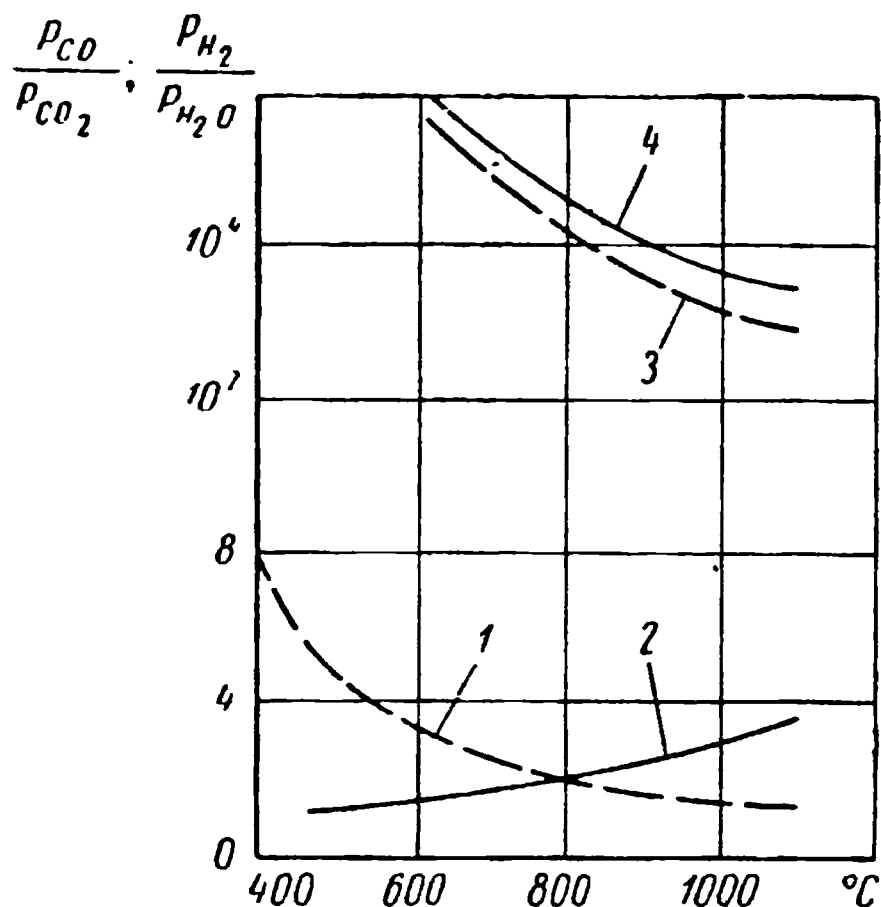


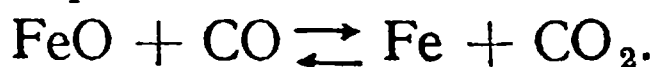
Рис. 29. Кривые равновесия атмосферы $\text{H}_2\text{—H}_2\text{O}$; CO—CO_2 с железом и хромом:

1 — восстановление окислов железа водородом; 2 — восстановление окислов железа окисью углерода; 3 — восстановление окислов хрома водородом; 4 — восстановление окислов хрома окисью углерода

в сторону окисления. Чтобы обеспечить протекание процесса восста-новления окислов металла водородом при повышенной влажности газовой среды, необходимо, как это можно видеть из кривой 1, поднимать температуру в камере нагрева.

Сравнение кривых, характеризующих условия равновесия при нагреве железа — 1 и хрома — 3, показывает, что для восстано-вления окислов хрома водородом требуется более тщательная осушка газовой среды или высокая температура нагрева. Поскольку по-вышение температуры пайки не всегда целесообразно, то для улучшения условий восстановления окислов металлов идут по пути снижения парциального давления водяного пара в водороде, т. е. по пути тщательной осушки газов.

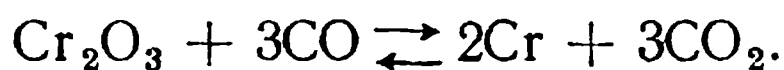
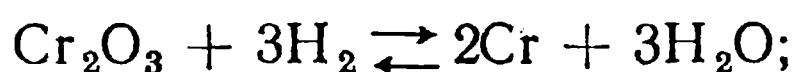
При применении в качестве восстановительной среды окиси углерода восстановление закиси железа при температуре выше 570°C происходит по реакции



Константа равновесия этой реакции при условиях, аналогичных условиям восстановления металла из закиси железа водородом, определяется отношением

$$K_2 = \frac{P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2}}.$$

Увеличение концентрации углекислого газа при постоянной температуре смещает реакцию 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 нагрева (кривая 2). Это является особенностью восстановления окислов железа окисью углерода. Так, при одинаковом соотношении концентраций газов-восстановителей и продуктов восстановления, например, при $\frac{\text{H}_2}{\text{H}_2\text{O}} = 2$ и $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2} = 2$ при температуре 1000°C в среде водорода происходит восстановление окислов железа, а в среде окиси углерода окисление железа. 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). Восстановление окиси хрома водородом и окисью углерода происходит согласно реакций:



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. 30. 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. 31*. В зависимости от содержания продуктов окисления, т. е. от соотношения $\frac{H_2O}{H_2}$ и $\frac{CO_2}{CO}$ и температуры, в газовой смеси будут иметь место условия или окисления, или восстановления окислов железа. 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

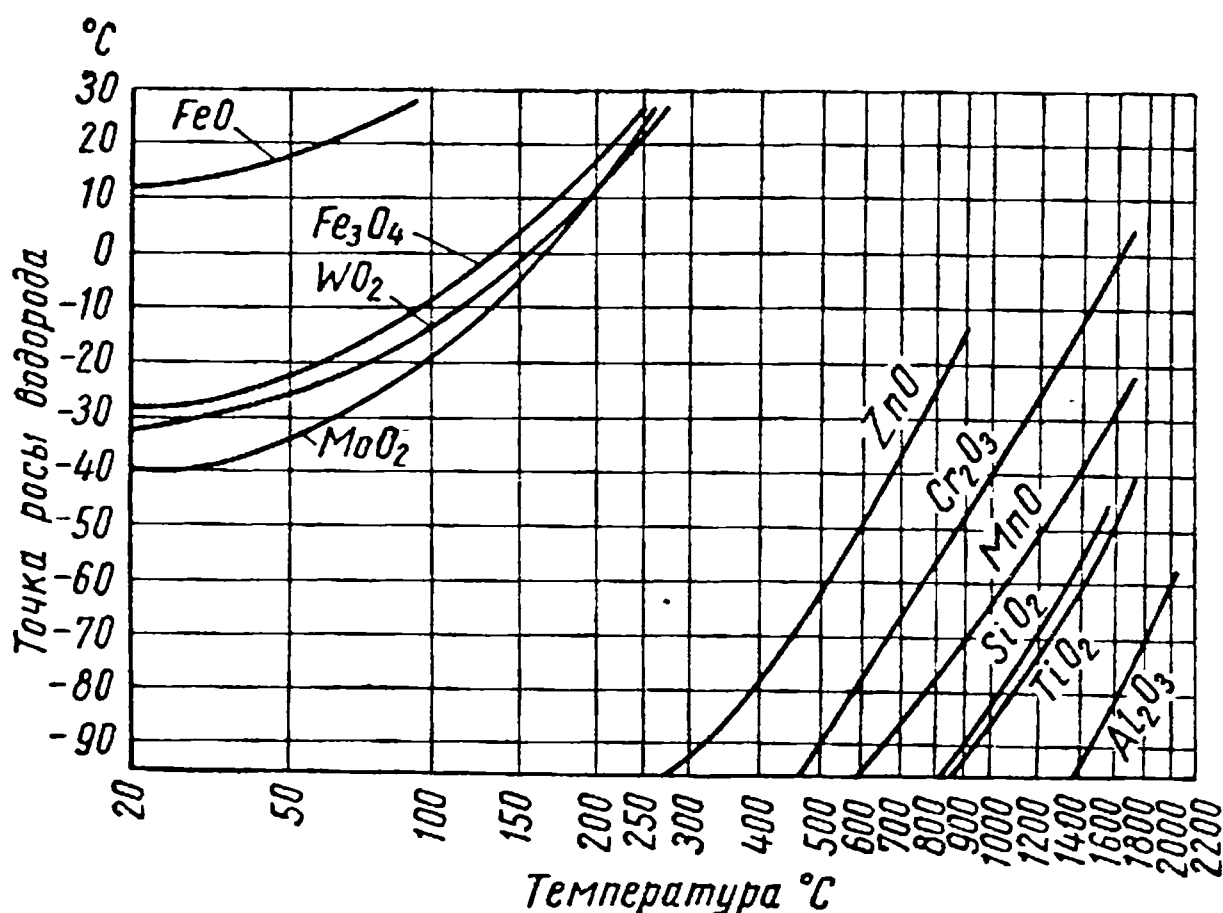


Рис. 30. Зависимость точки росы водорода от температуры обратимых реакций между окислами металлов и водородом

соответствует такому составу газовой фазы, при котором при температуре 900° С 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 $\frac{CO_2}{CO}$ будет уменьшаться, но условия восстановления могут быть созданы только при повышении температуры, например, при 1100° С это будет соответствовать точке 3. Если в газовой смеси, по составу соответствующей точке 1, снижать только содержание паров воды, то соотношение $\frac{H_2O}{H_2}$ будет уменьшаться и газовая смесь будет обладать восстановительными свой-

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

ствами при более низких температурах, например, при $\frac{H_2O}{H_2} = 0,35$ 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 $\frac{H_2O}{H_2} = 0,4$ соотношение $\frac{CO_2}{CO}$ должно быть не более 0,7 [19].

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 имеет место за счет подсоса воздуха и адсорбированного кислорода) на поверхности паяемых деталей, нагревательных элементов и футеровке печи восстановительные свойства газовых сред будут ухудшаться.

Пайка в восстановительных газовых атмосферах обеспечивает получение высококачественных паяных соединений, не требующих дополнительной обработки поверхности после пайки. 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 сопровождается не термичес-

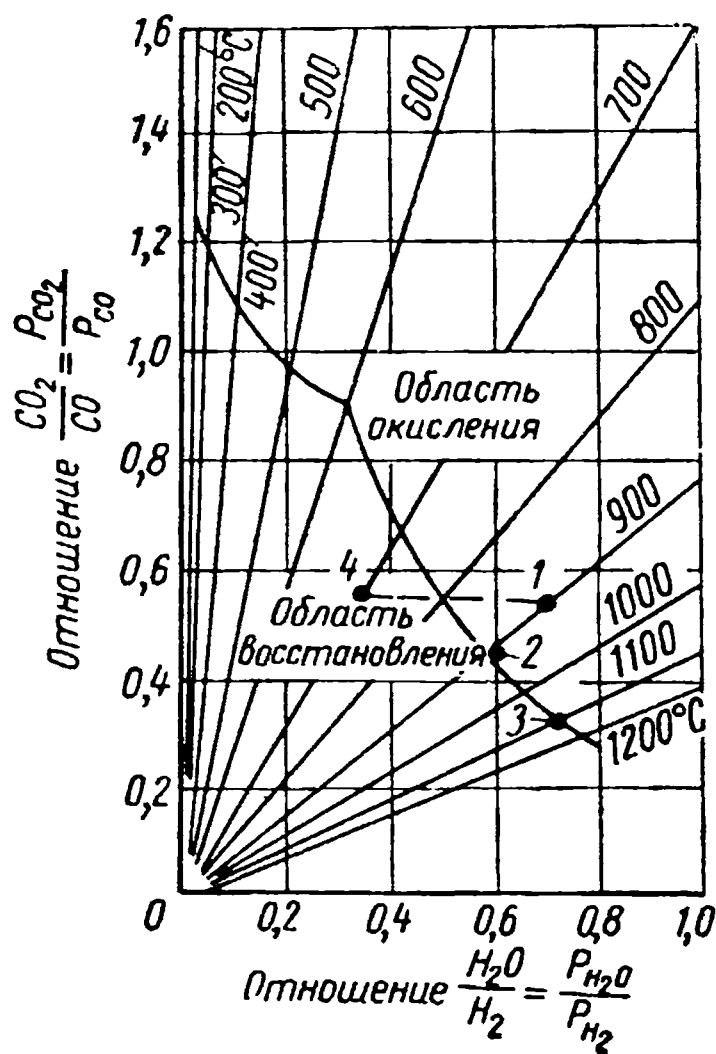
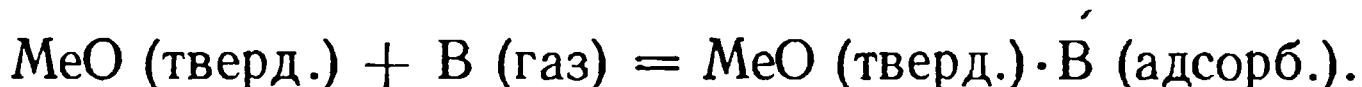


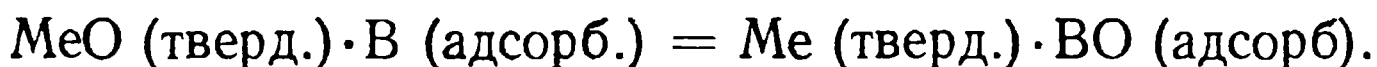
Рис. 731. Кривая равновесия газовой смеси сложного состава при взаимодействии с железом

ким разрушением, а взаимодействием с восстановителем. При восстановлении происходит как бы борьба между катионами окислов и восстановителем за обладание анионами. Однако отрыв аниона от окислов восстановителем облегчается, так как в процессе этой реакции выделяется энергия связи аниона (кислорода) с восстановителем. По этой причине восстановление окислов происходит при температурах, существенно более низких, чем процессы их диссоциации.

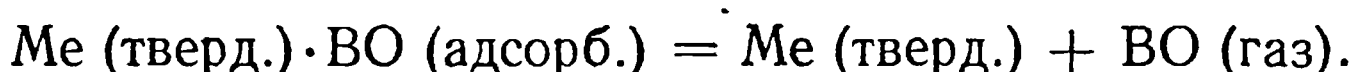
Согласно современной «адсорбционно-автокаталитической» теории процесс восстановления складывается из нескольких стадий. Первым актом восстановления является адсорбция газа-восстановителя (В) на поверхности окисной пленки:



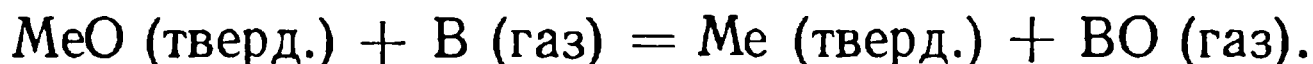
После этого следует отрыв кислорода от окисла и переход его к адсорбированным молекулам восстановителя:



Эта реакция сопровождается образованием новых фаз.



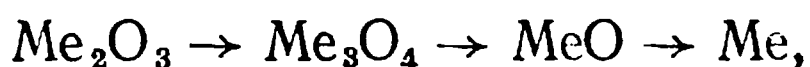
Итоговая реакция приведенных взаимодействий будет иметь вид



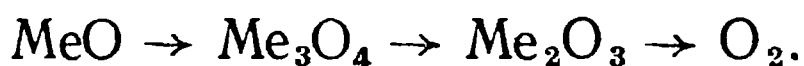
Последним актом процесса восстановления является десорбция соединения восстановителя с кислородом с реакционной поверхности. Адсорбционная природа процесса восстановления характеризуется тем, что с окислами окисной пленки реагируют лишь те молекулы восстановителя, которые вступили с пленкой в определенное 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

мым металлом, в ряде случаев является катализатором и, таким образом, процесс восстановления может стать автокаталитическим.

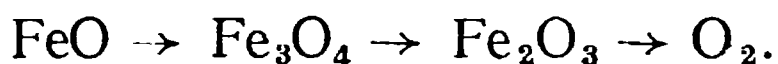
Процессы восстановления окислов металлов, как показали многочисленные исследования, применительно к окислам железа, развиваются ступенчато и зонально. Ступенчатость заключается в том, что высший окисел при взаимодействии с восстановителем последовательно переходит в такой низший, с которым он находится в равновесии согласно диаграмме состояния металл—кислород. В более широкой форме это представление было сформулировано академиком А. А. Байковым в виде принципа, состоящего в том, что восстановление окислов может идти ступенчато или по пути последовательного отщепления кислорода от высшего окисла к низшему по схеме



или по пути последовательного отщепления металла от его низшего окисла к высшему:



Для случая восстановления окислов железа при отщеплении кислорода этот принцип может быть записан в следующем виде: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ (для температур выше 570°C) и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ (для температур ниже 570°C) или в случае отщепления и удаления атомов железа



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 в окисной пленке, восстанавливает ее 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 [10, 21].

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 диссоциация 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

Механические способы удаления окисных пленок. 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 под слоем расплавленного припоя. Использование для этой цели механических средств вызвано главным образом отсутствием флюсов или газовых сред для удаления окисной пленки с поверхности некоторых металлов при низких температурах пайки. Способ удаления окисной пленки с поверхности алюминия и алюминиевых сплавов в процессе пайки с помощью шабера или напильника известен давно под названием пайки трением. При пайке трением соединяемые детали нагревают до температуры плавления припоя и механически удаляют окисную пленку под слоем расплавленного припоя, который предохраняет очищенные таким образом места от окисления кислородом воздуха. В тех местах, где рабочий инструмент не нарушил целостность окисной пленки, она сохраняется на основном металле, что вызывает местный непропай.

Для механического разрушения окисной пленки при пайке легкоплавкими припоями нашел применение также способ абразивной пайки. Сущность его состоит в том, что окисная пленка с паяемого металла удаляется с помощью абразивного стержня или круга, спрессованного из смеси порошкообразного припоя и измельченного асбеста (до 10%). При этом способе используются припой с температурой плавления от 75 до 450° С.

Представляет интерес так называемый способ абразивно-кристаллической пайки, при котором припой применяется в жидко-твердом состоянии. Удаление окисной пленки при этом способе производится твердыми кристаллами припоя, как абразивными частицами, жидкая фаза служит припоем. Исходя из этого, для абразивно-кристаллической пайки применяются припои с широким интервалом кристаллизации. Окисная пленка удаляется в про-

цессе относительного перемещения паяемого изделия и припоя. для этого или перемещается паяемая деталь через неподвижную ванну с припоем, или делается подвижной ванна. Неподвижные ванны целесообразно применять в том случае, когда можно обеспечить непрерывную подачу паяемого металла, как, например, при лужении фольги и проволоки. Схема лужения в неподвижной ванне представлена на рис. 32. Как можно видеть из схемы, фольга или проволока перематывается с одной катушки на другую и пропускаются через расплав припоя, находящегося в жидко-твердом состоянии. В тех случаях, когда детали невозможно облуживать

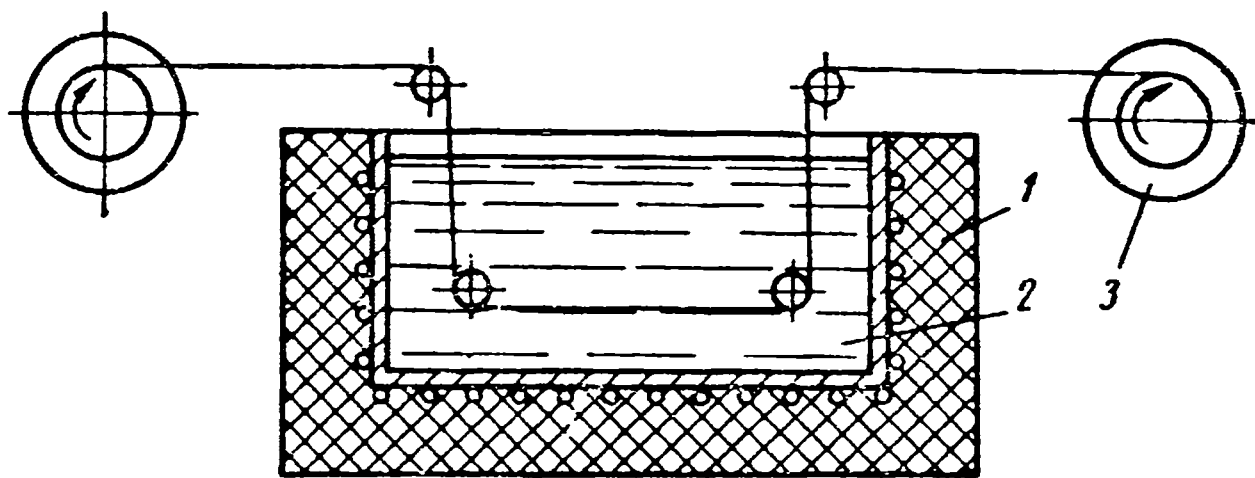


Рис. 32. Схема неподвижной ванны для абразивно-кристаллической пайки:

1 — электропечь с ванной; 2 — расплав припоя; 3 — катушки с облуживаемой фольгой или проволокой

в неподвижных ваннах, применяют вращающиеся ванны или ванны 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 соотношение между жидкой и твердой фазой в припое должно быть определенным. Если будет избыток жидкой фазы, то процесс удаления окисной пленки с поверхности изделия и время лужения увеличиваются. При избытке твердой фазы паяемое изделие в процессе лужения может быть деформировано. Способ абразивно-кристаллической пайки нашел применение для бесфлюсового лужения алюминия и его сплавов легкоплавкими припоями [25].

Физические способы удаления окисных пленок. Для разрушения окисной пленки в процессе пайки нашли применение также ультразвуковые колебания. К ультразвуковым относят упругие колебания и волны с частотой свыше 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 источников нашли применение магнитострикционные и электрострикционные (пьезоэлектрические) излучатели. В магнитострикционных излу-

чателях ультразвуковые колебания возникают за счет свойств 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 за счет свойств некоторых веществ изменять свои размеры под действием изменения электрического поля. В качестве электрострикционных излучателей находят применение 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 нашли применение преимущественно магнитострикционные излучатели, так как они позволяют работать при сравнительно высоких температурах. Недостатком их является ослабление магнитострикционного эффекта с увеличением нагрева. Излучатели из железо-кобальтового сплава позволяют, например, работать до температуры 400° С. Полное исчезновение магнитострикционного эффекта наступает в точке Кюри.

Применение ультразвука для целей 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, то расширение жидкости. При расширении, если гидростатическое давление упадет до упругости пара или ниже этой величины, 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 целей пайки применяются колебания с частотой 16 000—25 000 гц.

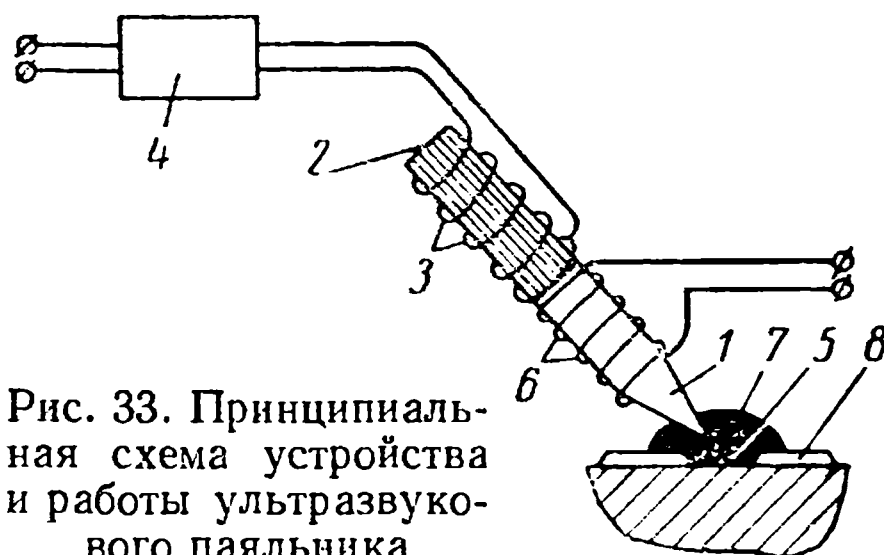
В настоящее время известны две схемы применения ультразвуковых колебаний при пайке:

1. Ультразвуковые паяльники, при применении которых ультразвуковые колебания создаются в расплаве припоя, нанесенного на основной металл.

2. Ультразвуковые ванны, при применении которых ультразвуковые колебания передаются расплавленному припою через стенки сосуда, в котором осуществляется облуживание способом погружения.

При применении как первой, так и второй схем основное 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. 33. 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 набирается, подобно трансформаторам, из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Нагрев рабочей части паяльника осуществляется обмоткой 6, по которой пропускается ток низкого напряжения. Иногда ультразвуковые паяльники изготавливаются без нагревателя, тогда для расплавления припоя применяются посторонние источники нагрева в виде обычного паяльника, газовой горелки и т. п.

Дополнительный нагрев от постороннего источника необходим также при пайке крупных деталей, так как нагрев, получаемый от рабочей части паяльника, в этом случае становится недостаточным. Разрушение окисной пленки 8 при помощи ультразвукового паяльника происходит очень быстро, приблизительно в течение $\frac{1}{20}$ сек, но в очень узкой зоне, непосредственно расположенной под рабочей частью паяльника. Для облуживания большой площади паяльником необходимо постепенно обрабатывать всю площадь.

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. Пайка производится после облуживания каждой

из соединяемых поверхностей, которые сжимают между собой, 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 облуженной поверхности образуются своеобразные пузыри.

Основным преимуществом пайки с применением ультразвука является возможность облуживания металлов, а также неметаллических материалов, соединение которых ранее считалось невозможным или вызывало большие затруднения. Наиболее эффективно применение ультразвука для пайки алюминиевых сплавов, для которых под действием кавитации при нагреве не 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 [23, 34].

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

ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПАЯНОГО ШВА

§ 1. Состав и свойства припоев

В качестве припоев для пайки металлов, а также металлов с неметаллическими материалами нашли применение как чистые металлы, так и сплавы. Чтобы удовлетворять условиям процесса пайки и обеспечивать получение качественных паяных соединений, припой должны отвечать следующим требованиям:

1. Температура плавления припоев должна быть не менее, чем на $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ ниже температуры плавления паяемых металлов.

2. При температуре пайки припой должны хорошо смачивать основной металл и заполнять соединительные зазоры.

3. С паяемыми металлами припой должны сплавляться с образованием прочных и коррозионностойких паяных соединений.

4. Коэффициенты термического расширения паяемого металла и припоя не должны резко отличаться.

5. Припой должны по возможности не содержать дефицитных компонентов.

6. Технология изготовления и применения припоев должна быть общедоступной.

В настоящее время в технике применяются десятки металлов в чистом виде и тысячи сплавов на их основе, которые могут подвергаться пайке. Однако наибольшее распространение в металлоконструкциях получили сплавы на основе железа, меди и никеля, для которых и разработано большинство известных припоев. Другие металлы в паяных конструкциях встречаются значительно реже и требуют применения специальных припоев. В машиностроении наибольшее распространение получили припои на основе меди, серебра и никеля. Низкотемпературные припои на основе олова и других легкоплавких металлов применяются реже. Поэтому рассмотрение основных групп припоев целесообразно начать с меди и ее сплавов.

Припои на основе меди. В качестве припоев на основе меди применяются медь в чистом виде и сплавы меди с цинком, марганцем, фосфором и другими элементами.

Медь в чистом виде широко используется 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 $16,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$. Предел прочности меди 176—245 Мн/м² (18—25 кг/мм²), относительное удлинение 35—40%. В зависимости от требований к паяемому изделию, в качестве припоев применяются различные сорта технической меди. Для пайки ответственных конструкций необходимо применять медь с наименьшим содержанием примесей, особенно мышьяка и фосфора, образующих со сталями хрупкие соединения в контакте основной металл—припой. Пайка медью осуществляется главным образом в атмосфере нейтральных и активных газовых сред, а также в вакууме. Медь применяется в качестве припоя 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 меди по ГОСТу 859-41, применяемой в качестве припоев, приведены в табл. 18.

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.

Припой— медь техниче- ская	Химсостав в % по весу					Назначение
	Cu	Примеси не более			Дру- гие при- меси	
		Bi	Sb	As		
M0	99,95	0,002	0,002	0,002	0,044	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 метал- лов
M1	99,90	0,002	0,002	0,002	0,094	
M2	99,70	0,002	0,005	0,01	0,283	

Медно-цинковые припои представляют собой двойные сплавы меди и цинка в различных соотношениях. Диаграмма состояния сплавов системы медь—цинк приведена на рис. 34. Наибольший

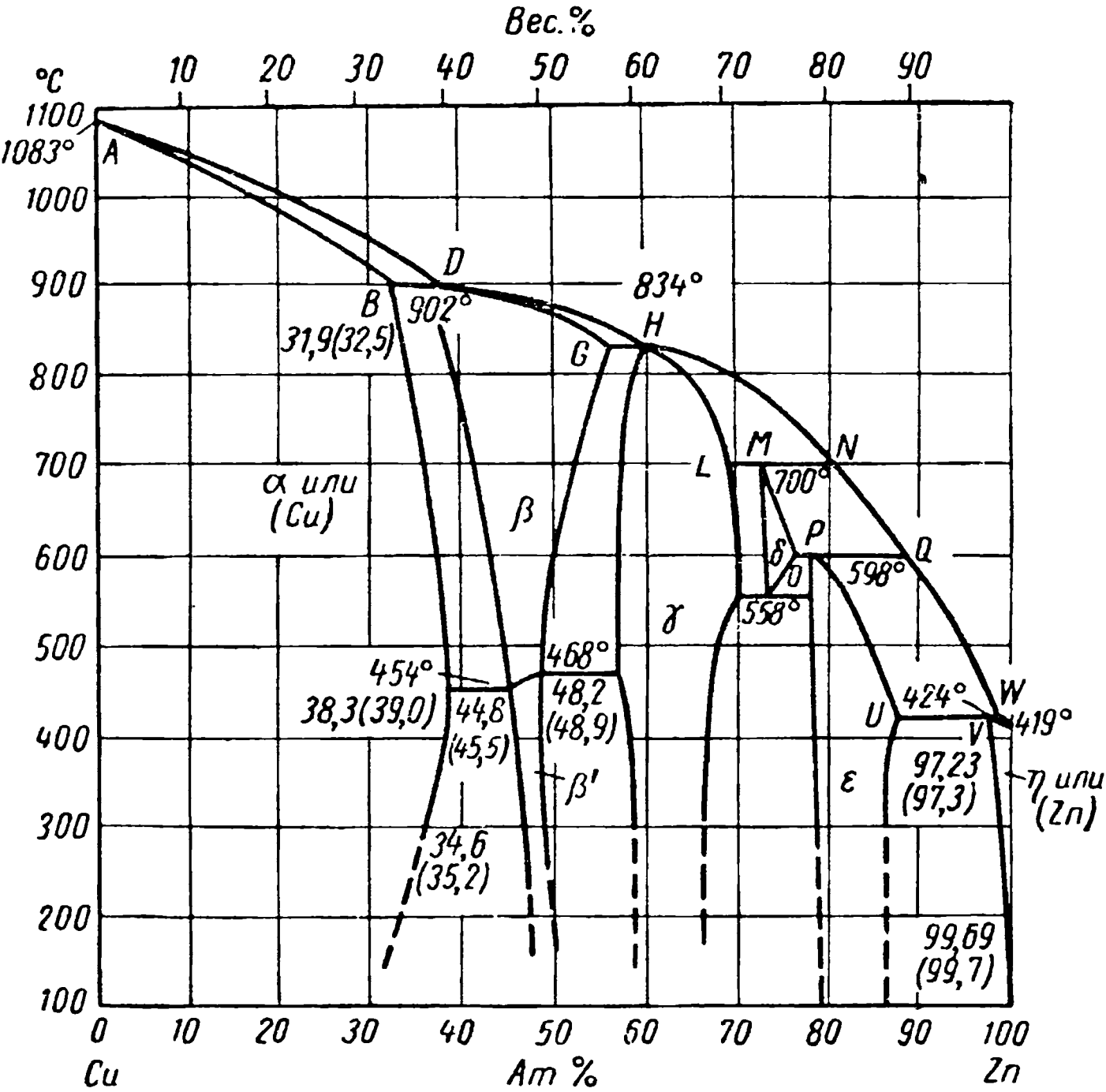


Рис. 34. Диаграмма состояния сплавов системы медь—цинк

интерес представляют сплавы, содержащие менее 39% цинка и имеющие однофазную структуру α -твердого раствора. С увеличением содержания цинка пластичность припоев значительно сни-

жается, вызывая снижение пластичности паяных соединений. Наряду с хорошими технологическими свойствами медно-цинковые 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 приводит к повышению температуры плавления сплава. Для снижения температуры плавления и повышения технологических свойств медно-цинковых 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 вводится кремний. Пайка медно-цинковыми припоями обычно производится газовыми горелками, погружением в соляные ванны и с индукционным нагревом. Пайка в печах применяется реже ввиду сильного испарения цинка. Составы и область применения медно-цинковых припоев приведены в табл. 19.

Таблица 19

Марка припоя	Химический состав в % по весу				Температура плавления в °C		Назначение
	Cu	Zn	Примеси не более		соли-дус	лик-видус	
			Fe	Pb			
ПМЦ 36	36±2	Ост.	0,1	0,5	800	825	Для пайки меди, томпака и латуни
ПМЦ 48	48±2	»	0,1	0,5	850	870	Для пайки меди и томпака
ПМЦ 54	54±2	»	0,1	0,5	875	885	Для пайки меди, томпака и сталей
Л 62	62±1,5	»	—	—	900	905	Для пайки меди и сталей
ЛОК 62-06-04 *	62±1,5	—	0,2	0,1	900	905	Для пайки меди и сталей

* 0,6% Sn; 0,4% Si; Zn — ост.

Припой ПМЦ 36 из-за низкой прочности и хрупкости в машиностроении не применяется. Припой ПМЦ 48 и ПМЦ 54 ввиду недостаточной пластичности и низкой вибростойкости паяных ими соединений применяются мало. Наибольшее распространение получили припой Л62 и ЛОК 62-06-04, дающие прочные паяные соединения. Предел прочности припоя Л62 составляет 294 Мн/м² (30 кг/мм²) при относительном удлинении 35%. Припой

ЛОК 62-06-04, отличающийся от Л62 лишь добавками олова и кремния, обладает более высокими технологическими свойствами. Наличие кремния уменьшило выгорание цинка за счет образования при пайке на поверхности расплавленного припоя пленки окиси кремния. В результате такого легирования повышается плотность и герметичность паяных швов. Недостатком латуни Л62 как припоя, кроме пониженной жидкотекучести и склонности к вы-

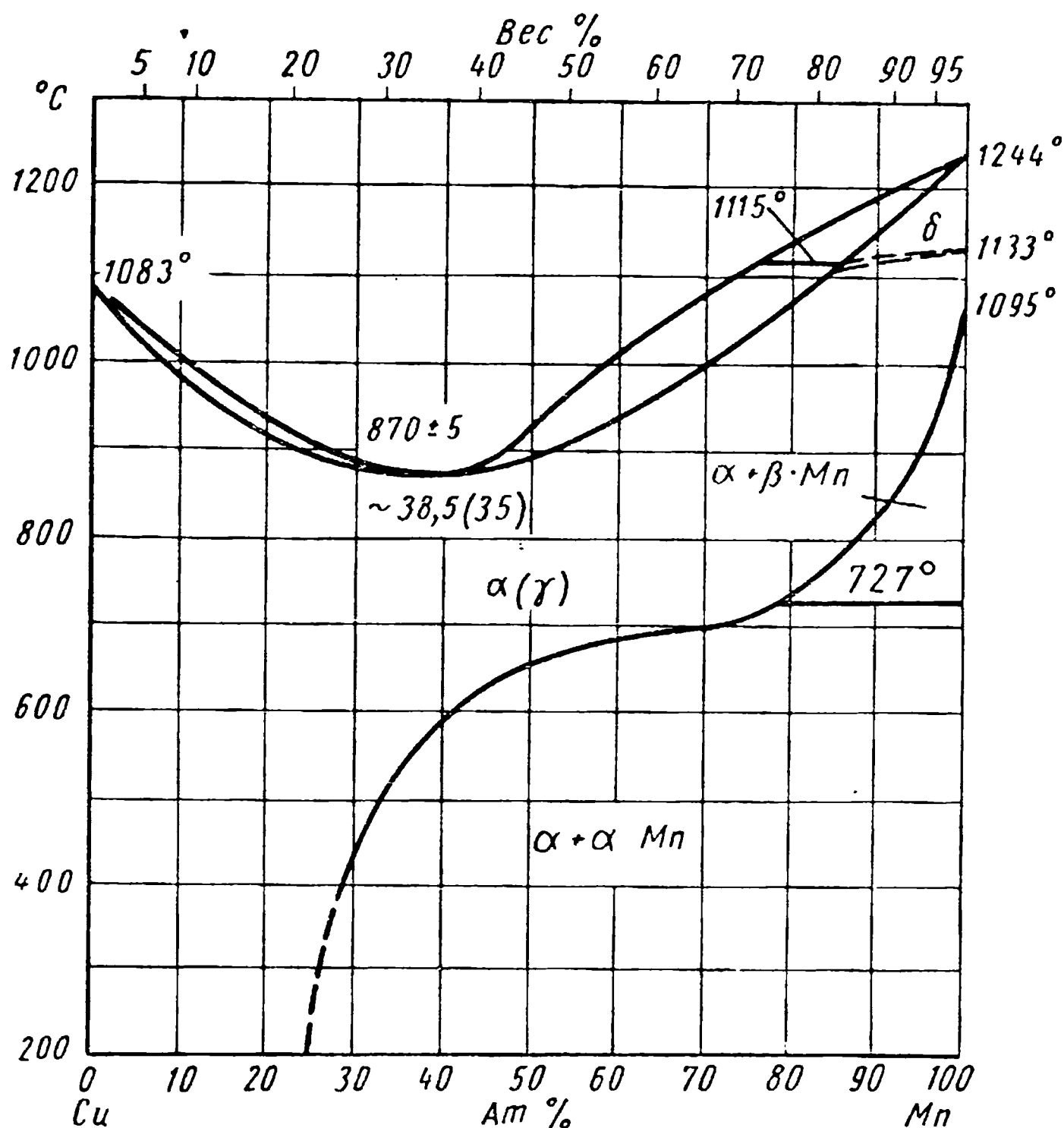


Рис. 35. Диаграмма состояния сплавов системы медь—марганец

горанию цинка, является также плохое затекание в соединительные зазоры [6]. Для повышения прочности медно-цинковых припоев их иногда легируют никелем и марганцем. Повышение жаростойкости достигается также введением небольших количеств железа и алюминия. Медно-цинковые припои, легированные этими компонентами, нашли широкое применение при пайке твердосплавного инструмента.

Припои на основе сплавов меди с марганцем обладают сравнительно низкой температурой плавления, достаточно высокой прочностью и пластичностью. Припои этой системы применяются пока мало, но являются весьма перспективными, так как паяные ими

соединения имеют более высокую, по сравнению с медно-цинковыми припоями, прочность при температурах 500—600° С. Диаграмма состояния сплавов системы медь—марганец приведена на рис. 35. В медно-марганцовые припои марганец вводится в пределах 10—30%. При введении марганца 10—20% пайку можно производить горелкой. При более высоком содержании марганца, во избежание выгорания его в пламени горелки, пайку целесообразно производить в печи с контролируемой атмосферой. Для снижения температуры плавления в эти припои вводят цинк, олово и серебро, а для повышения жаростойкости — никель. Для пайки сталей и медных сплавов предложен медно-марганцевый 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° 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 вводится в припой совместно с литием.

Медно-фосфористые припои. Наряду с медно-цинковыми и медно-марганцовыми припоями имеют распространение припои на основе сплавов меди с фосфором. Диаграмма состояния системы сплавов медь—фосфор приведена на рис. 36. Наиболее низкой температурой плавления обладает эвтектический сплав меди с 8,4% фосфора, однако, несмотря на легкоплавкость, он применяется редко, ввиду высокой хрупкости и низкой прочности. В качестве медно-фосфористых припоев чаще применяются доэвтектические сплавы, содержащие фосфора 5—7%. Медно-фосфористые припои обладают хорошей смачивающей способностью и большой жидкотекучестью. Они нашли применение при пайке медных и бронзовых

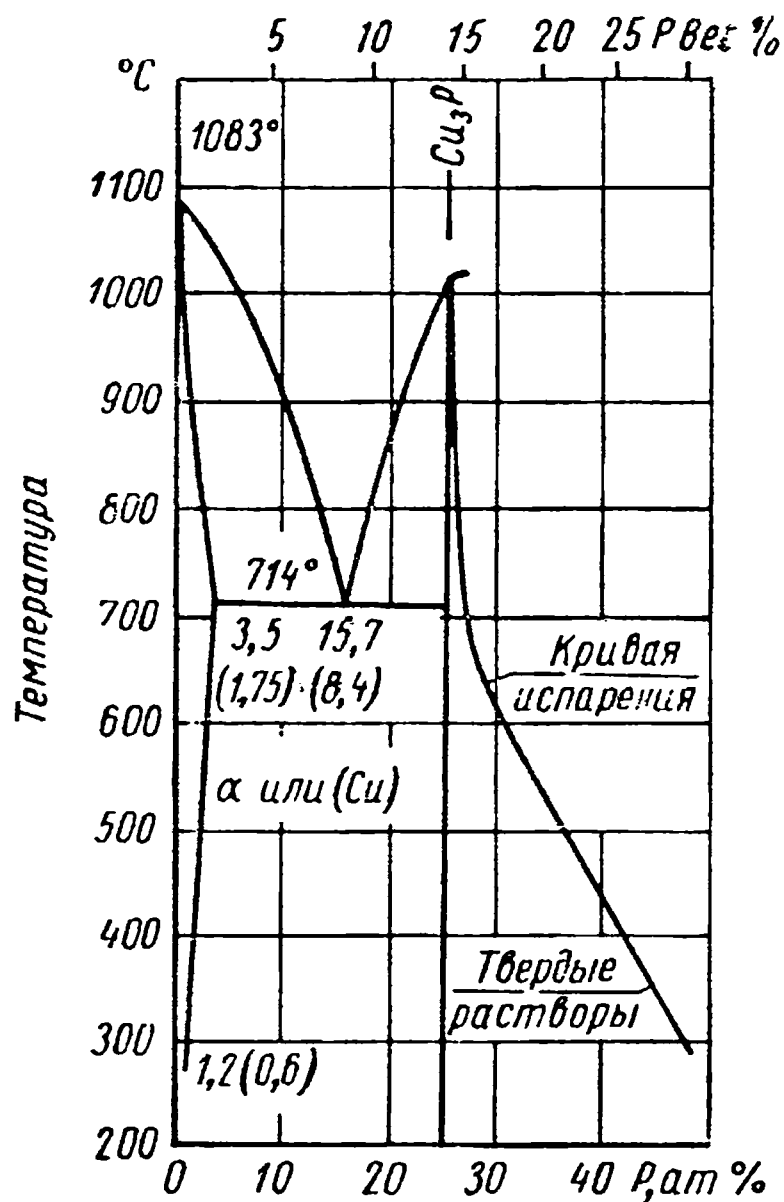


Рис. 36. Диаграмма состояния сплавов системы медь—фосфор

деталей, работающих в условиях статических нагрузок. При пайке ими сталей в результате взаимодействия железа с содержащейся в припое фосфористой медью Cu_3P образуется фосфористое железо Fe_3P , которое располагается по границе основной металл—припой в виде хрупкого слоя. Для снижения хрупкости таких соединений сталь иногда предварительно покрывается медью. Медно-фосфористые припои, благодаря восстановительным свойствам фосфора и флюсующим свойствам образующегося при его окислении фосфорного ангидрида, являются самофлюсующими. Составы и область применения некоторых медно-фосфористых припоев приведены в табл. 20.

Таблица 20

Марка припоя	Химический состав в % по весу			Температура плавления в °С		Назначение
	Сн	Р	Примеси не более	соли-дус	лик-видус	
—	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

Иногда в практике заводов в качестве припоя используется медно-фосфористая лигатура, содержащая фосфора в пределах 8,5—10%, что приводит к получению весьма хрупких паяных соединений. Для увеличения смачивающей способности и уменьшения хрупкости в медно-фосфористые припои добавляют иногда 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 изготовлять 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 294—490 Мн/м^2 (30—50 кг/мм^2) 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 нашли применение главным образом для пайки меди и ее сплавов. Для пайки сталей серебряные припои применяются в тех случаях, когда нельзя использовать другие припои из-за их высокой температуры плавления. Серебряные припои с успехом могут

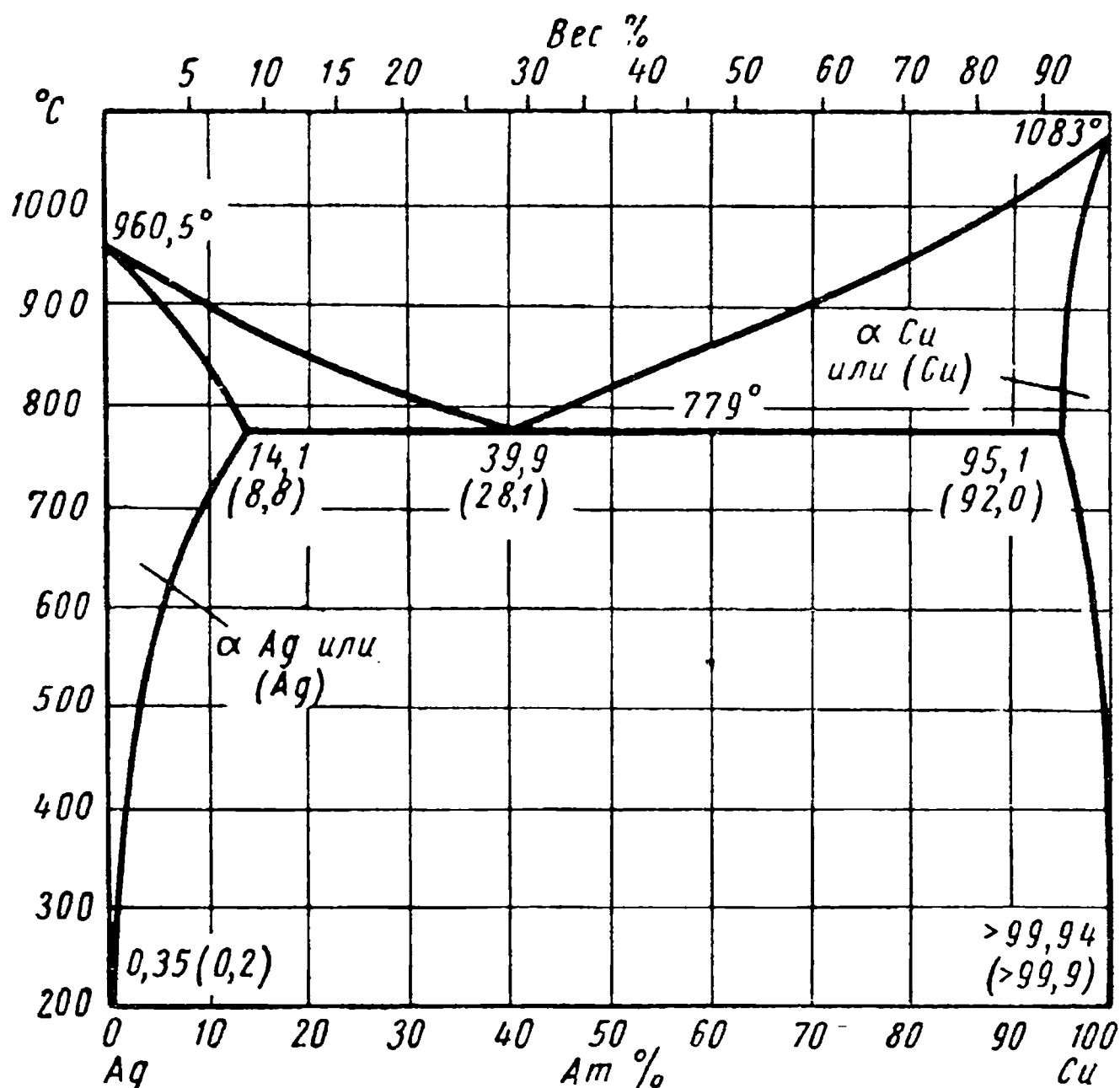


Рис. 37. Диаграмма состояния сплавов системы серебро—медь

применяться также для пайки никеля и его сплавов, а также для соединения перечисленных металлов между собой.

Серебряно-медные припои обладают низким омическим сопротивлением, поэтому они применяются для пайки соединений с высокой электропроводностью. Диаграмма состояния сплавов системы серебро—медь приведена на рис. 37. 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. 21.

Припой ПСр 72 не содержит легкоиспаряющихся компонентов, поэтому он может быть применен для пайки в газовых средах и вакууме.

Для улучшения смачивающей способности припоев серебро—медь в их состав вводится до 5% Pd, который существенно повышает качество соединений при пайке сталей. Введение в эти при-

Таблица 21

Марка припоя	Химический состав в % по весу *		Температура плавления в °С	
	Ag	При-меси не более	соли-дус	лик-видус
ПСр 72	$72 \pm 0,5$	0,25	779	779
ПСр 50	$50 \pm 0,5$	0,25	779	850

* Остальное — медь.

пой лития также повышает смачивающую способность припоев по отношению к сталям и медным сплавам.

Припой тройной системы серебро—медь—цинк также нашли большое распространение. Поверхности, ликвидуса и фазовый состав сплавов системы серебро—медь—цинк приведены на рис. 38. Большинство стандартных серебряных припоев системы серебро — медь — цинк обладают достаточно высокой прочностью и пластичностью.

Эти припои применяются для пайки ответственных изделий из сталей, меди и медных сплавов. Пайка производится газовой горелкой, погружением в соляные ванны с индукционным на-

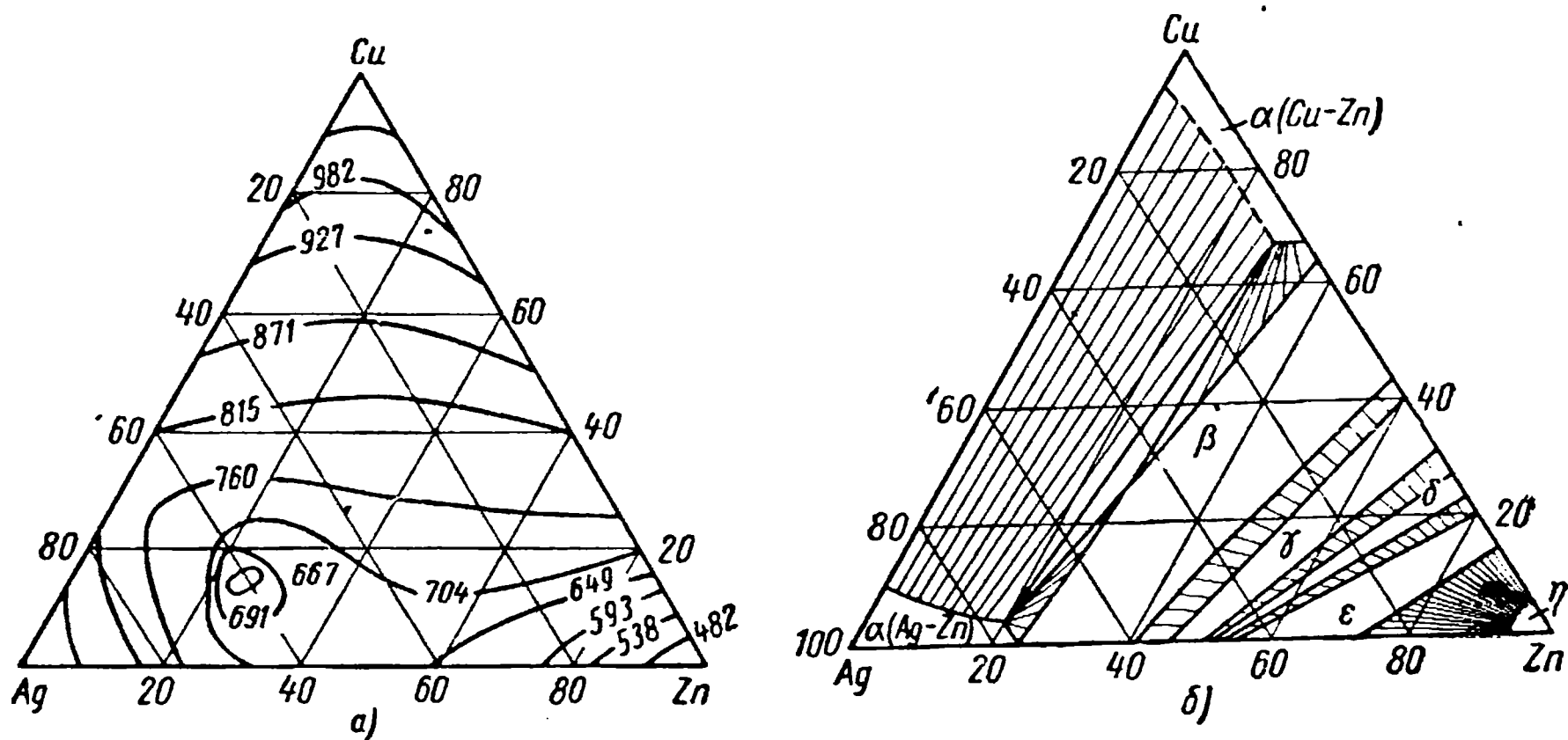


Рис. 38. Поверхности ликвидуса (а) и фазовый состав (б) сплавов системы серебро—медь—цинк

гревом, а также в печи. Составы по ГОСТу 8190-56 и область применения припоев системы серебро—медь—цинк приведены в табл. 22.

В припой на основе сплавов серебро—медь—цинк иногда вводят марганец, который хорошо растворяется в расплавленном серебре и удерживается приблизительно до 25% в твердом

Марка припоя	Химический состав в % по весу				Температура плавления в °С		Назначение
	Ag	Cu	Zn	Примеси не более	солидус	ликвидус	
ПСр 70	$70 \pm 0,5$	$26 \pm 0,5$	4 ± 1	0,5	730	755	Для пайки меди, латуни, бронз, сталей. Обладает высокой электропроводностью
ПСр 65	$65 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$15 \begin{smallmatrix} +1,0 \\ -1,5 \end{smallmatrix}$	0,5	740	—	То же, но менее электропроводен
ПСр 45	$45 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$25 \begin{smallmatrix} +1,0 \\ -1,5 \end{smallmatrix}$	0,5	660	725	Для пайки меди, латуни, бронз и сталей
ПСр 25	$25 \pm 0,3$	40 ± 1	$35 \begin{smallmatrix} +1,5 \\ -2,0 \end{smallmatrix}$	0,5	745	775	То же
ПСр 12М	$12 \pm 0,3$	52 ± 1	$36 \begin{smallmatrix} +1,5 \\ -2,0 \end{smallmatrix}$	0,5	780	825	Для пайки меди, бронз и сталей
ПСр 10	$10 \pm 0,3$	53 ± 1	$37 \begin{smallmatrix} +1,5 \\ -2,0 \end{smallmatrix}$	0,5	815	850	То же

растворе. Введение марганца делает эти припои теплостойкими. Так, припой под маркой ПСр 37,5, имеющий состав 37—38% Ag; 47,8—49,8% Cu; 5—6% Zn; 7,9—8,5% Mn, применяется для пайки стальных и медных деталей, работающих при температурах до 600°.

Наряду с рассмотренными серебряными припоями, большое распространение имеют в качестве припоев сплавы системы серебро—медь—цинк—кадмий. Наибольшее распространение из них имеет стандартный припой ПСр 40 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.

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. Хром в этом припое является основным компонентом, придающим

ему жаростойкость и жаропрочность. Марганец вводится для снижения температуры плавления. Титан также способствует повышению жаропрочности. Бор улучшает смачивающие свойства припоя. Кратковременная жаропрочность паяных соединений при 900° С достигает 147 Мн/м² (15 кг/мм²). За рубежом имеют распространение жаропрочные припои системы никель—хром—кремний—бор. Типичным представителем этого класса 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 нашел применение также отечественный припой системы медь—никель марки ВПр 1. Этот припой обеспечивает получение пластичных и прочных паяных соединений при пайке нержавеющей сталей. Паянные им детали могут надежно работать до температуры 600° С [14].

Наряду с указанными в последние годы начинают находить применение припои системы никель—хром—палладий, обладающие более высокой пластичностью и жаропрочностью. Однако ввиду дефицитности палладия припои этой системы широкого распространения пока не получили.

Составы жаропрочных припоев приведены в табл. 23.

Таблица 23

Марка припоя	Химический состав по весу в %									Температура плавления в °С	
	Ni	Cr	Mn	Si	Cu	Fe	Ti	C	B	соли-дус	лик-видус
№ 20	Ост.	14—18	20—25	—	—	—	1,5—2,5	—	0,05—0,1	1050	1180
«Кольманой»	»	15	—	4,5	—	4,0	—	0,45	3,75	1100	1150
ВПр 1	27—30	—	—	1,5—2	Ост.	<1,5	—	—	0,1—0,3	1080	1120

Припои 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 сплавов алюминий—кремний приведена на рис. 39.

Припои 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 147—176 Мн/м² (15—18 кг/мм²).

Составы и назначение наиболее распространенных припоев на основе алюминия приведены в табл. 24.

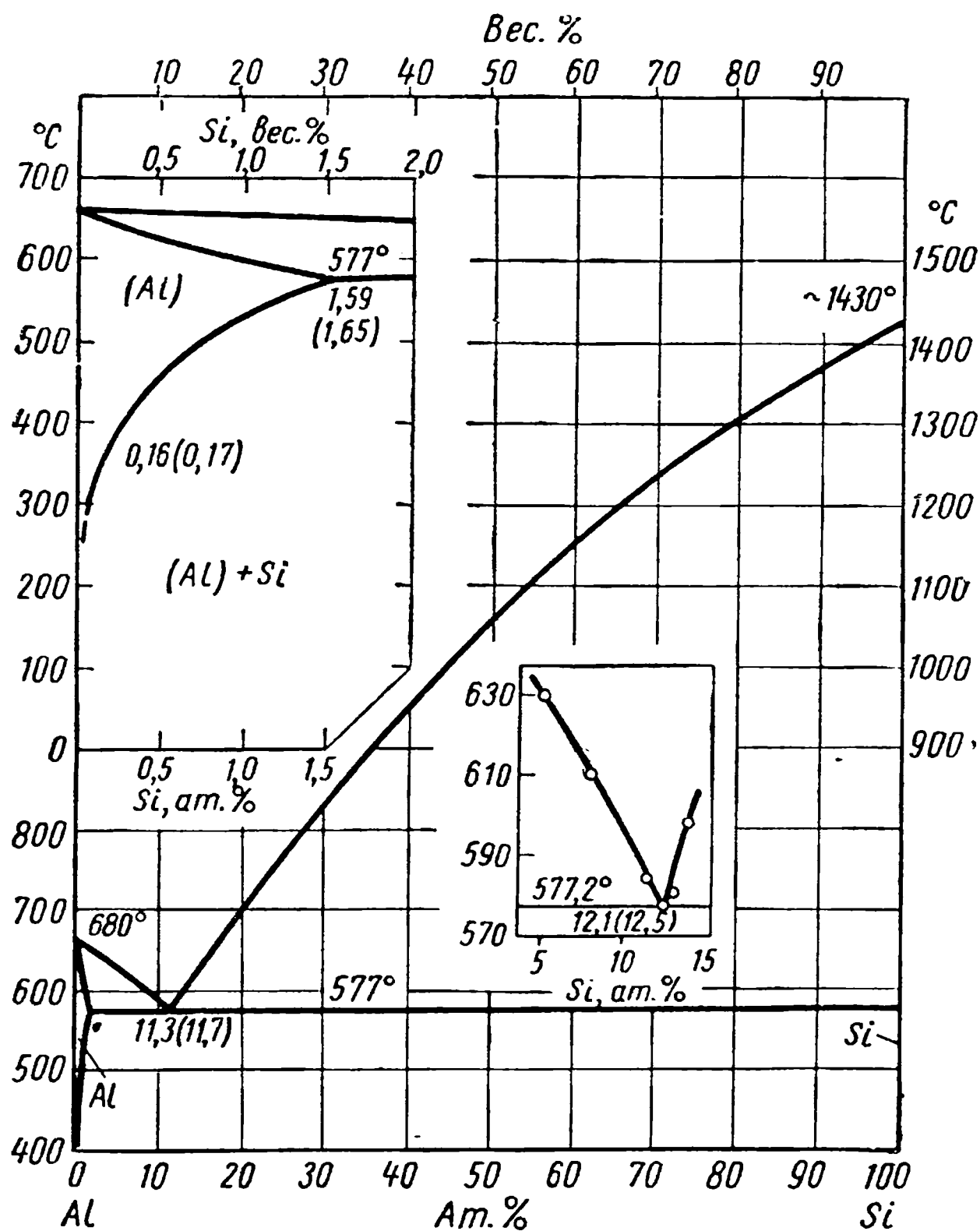


Рис. 39. Диаграмма состояния сплавов системы алюминий—кремний

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 получили распространение припои систем алюминий—цинк и алюминий—олово. Важной особенностью алюминиево-цинковых припоев является то, что паяные ими соединения можно анодировать, не опасаясь растворения галтелей припоя электролитом.

Марка припоя	Химический состав в % по весу *			Температура плавления в °C		Назначение
	Si	Cu	Zn	соли- дус	лик- видус	
Силумин	10—13	≤0,8	≤0,3	578	578	Для пайки алюми- ния и сплавов АМц и АВ
34А	6±0,5	28±1	—	525	525	Для пайки алю- миния и сплавов АМц, АМг и АВ
П575А	—	—	20	570	620	Для пайки алю- миния и сплава АМц
* Остальное — алюминий.						

Припой на основе системы алюминий—цинк обеспечивают при пайке алюминиевых сплавов 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 алюминиево-цинковых припоев имеют некоторое распространение сплавы на основе тройной эвтектики цинк—алюминий—медь. Однако, несмотря на высокие механические и технологические свойства, они практически не применяются ввиду отсутствия соответствующих флюсов.

Припой на основе олова наибольшее распространение получили за рубежом. Типичным представителем таких припоев является сплав, содержащий 10—20% Zn, остальное — олово. Этот припой используется 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 применяются только для пайки магниевых сплавов, так как при применении для других металлов дают хрупкие соединения, обладающие низкой коррозионной стойкостью. В качестве магниевых припоев применяются главным образом сплавы магния с алюминием, цинком и кадмием. Магний с алюминием при содержании 32,3% Al образуют 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. Цинк целесообразно вводить в эти припои на свыше 1—1,5%, так

как при большем содержании увеличивается интервал кристаллизации сплава и склонность к трещинообразованию. Для снижения температуры плавления магниевых припоев в них вводится кадмий. Пайку с применением магниевых припоев обычно производят газовой горелкой, погружением или в печи. Во всех случаях необходимо применение флюсов.

Составы и область применения некоторых магниевых припоев приведены в табл. 25.

Оловянно-свинцовые припой. Для низкотемпературной пайки сталей, меди, никеля и медных сплавов наиболее широко применяются припой системы олово—свинец, обладающие достаточной прочностью, коррозионной стойкостью и высокими технологическими свойствами. Они пластичны, хорошо сопротивляются знакопеременным нагрузкам и обладают хорошей смачивающей способностью по отношению ко многим металлам и сплавам. Диаграмма состояния системы сплавов олово—свинец приведена на рис. 40. При 38,1% Pb эти металлы образуют эвтектику с температурой плавления 183,3°С. В твердом состоянии при эвтектической температуре в олове растворяется 2,5% Pb. В свинце при этой температуре растворяется 19,5% Sn.

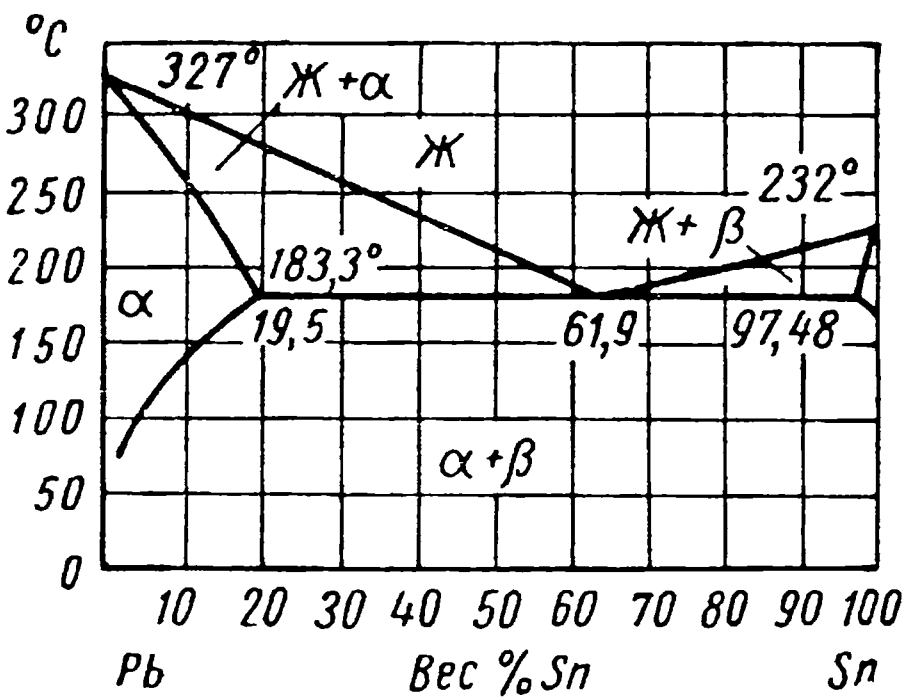


Рис. 40. Диаграмма состояния сплавов системы олово—свинец

Таблица 25

Марка припоя	Химический состав в % по весу *				Температура плавления в °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 МЛ5

* Остальное — магний.

Составы по ГОСТу 1499-54 и область применения наиболее распространенных оловянно-свинцовых припоев приведены в табл. 26.

Таблица 26

Марка припоя	Химический состав в % по весу *		Температура плавления в °C		Назначение
	Sn	Sb	соли- дус	лик- видус	
ПОС-90	89—90	≤0,15	183	220	Для пайки деталей, подвергаемых гальванопокрытиям (серебрение, золочение)
ПОС-61	59—61	≤0,8	183	185	Для пайки меди, латуни, бронз, сталей
ПОС-50	49—50	≤0,8	183	210	То же
ПОС-40	39—40	1,5—2,0	183	235	»
ПОС-30	29—30	1,5—2,0	183	256	»
ПОС-18	17—18	2,0—2,5	183	277	Для пайки ответственных деталей из меди, латуни, сталей
ПОСС-4-6	3—4	5—6	245	265	Для лужения меди и железа

* Остальное — свинец.

Введение в оловянно-свинцовые припои до 7% Sb приводит к повышению 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 оловянно-свинцовых припоев. При содержании цинка и алюминия свыше 0,005% снижается растекаемость припоев, ухудшается взаимодействие с паяемым 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 оловянно-свинцовых припоев обладают ПОС-61 и ПОС-50. Припой ПОС-61 имеет предел прочности 46 Мн/м^2 ($4,7 \text{ кг/мм}^2$) при относительном удлинении 34%, припой ПОС-50 соответственно $37,2 \text{ Мн/м}^2$ ($3,8 \text{ кг/мм}^2$) и 54%. Более высокой прочностью обладает припой ПОСС-4-6, но ввиду низкого содержания в нем олова паянные им соединения недостаточно пластичны. Оловянно-свинцовые припои с содержанием свыше 90% Sn обладают высокой коррозионной стойкостью; однако паять чистым оловом не всегда целесообразно, так как при низких температурах оно претерпевает алло-

тропическое превращение, при котором переходит в серый порошок. Наибольшее применение нашли припой, содержащие 30—50% Sn.

Свинцовые припой. Ввиду дефицитности олова его стремятся заменить в припоях другими металлами. Разработаны низкооловянистые и безоловянистые припой 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 распростране-

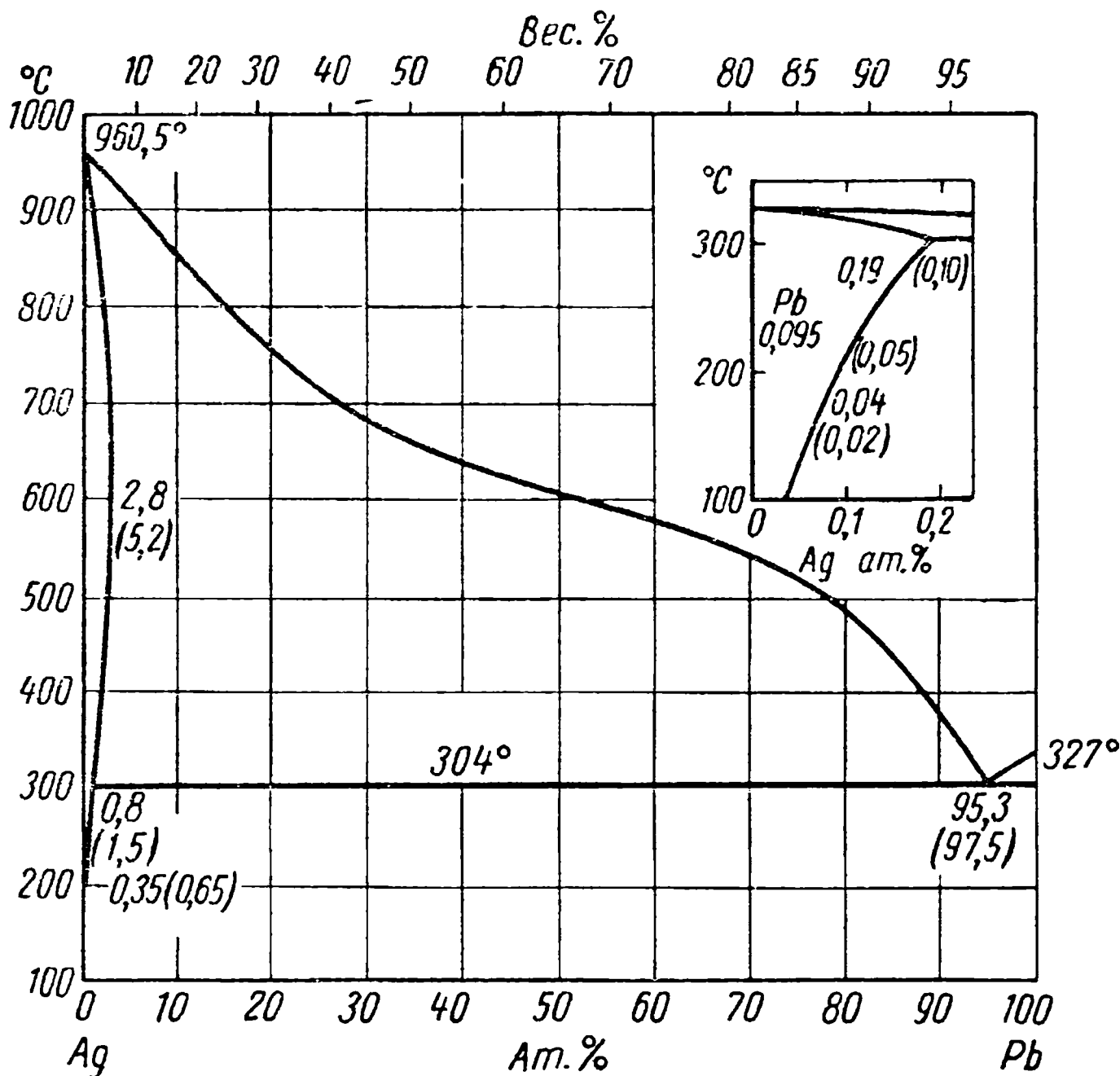


Рис. 41. Диаграмма состояния сплавов системы свинец—серебро

ние. Добавка к свинцу серебра, снижая температуру плавления припоев, увеличивает их прочность и смачивающую способность. Диаграмма состояния системы сплавов свинец—серебро приведена на рис. 41 [48]. Растворимость серебра в свинце очень мала. При содержании 2,5% Ag эти металлы образуют эвтектику с температурой плавления 304° С, которая и является основой для разработки припоев системы свинец—серебро. Свинцовые припой по сравнению с оловянно-свинцовыми имеют более высокие температуры плавления и, следовательно, могут обеспечить работу паяных соединений в условиях большего нагрева. Однако по своим технологическим свойствам они значительно хуже оловянно-свинцовых. Составы по ГОСТу 8190-56 и область применения наиболее теплостойких свинцовых припоев приведены в табл. 27.

Марка припоя	Химический состав в % по весу			Температура плавления в °С		Назначение
	Pb	Ag	Sn	соли-дус	лик-видус	
ПСр 3	97±1	3±0,3	—	300	305	Для пайки медных и латунных деталей, работающих при температуре до 150° С
ПСр 2,5	92±1	2,5±0,3	5,5±0,5	295	305	То же, припой более технологичен

Добавка олова в свинцово-серебряные припои улучшает их смачиваемость и растекаемость, а также снижает склонность к коррозии во влажной атмосфере.

Кадмиевые припои. В качестве кадмиевых припоев применяются 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—250° С. Однако технологические свойства кадмиевых припоев низкие, пайка с их применением вызывает значительные затруднения. Основное применение кадмиевые припои находят 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. 28.

Таблица 28

Химический состав в % по весу				Температура плавления в °С	
Cd	Zn	Sn	Ag	солидус	ликвидус
95	—	—	5	337	393
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 обладает хорошей смачивающей способностью по отно-

шению к металлам, стеклу, керамике, полупроводникам. При добавлении, например, 1—2% In к стандартному свинцово-серебряному припою ПСр 2,5 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, применяются во многих областях техники, особенно при соединении металлов с неметаллическими материалами. Составы и область применения некоторых припоев, содержащих индий, приведены в табл. 29.

Таблица 29

Химический состав в % по весу				Температура плавления в °С		Назначение
In	Sn	Pb	Ag	соли-дус	лик-видус	
80	—	15	5	—	156,4	Для покрытий на керамике
50	50	—	—	117	120	Для пайки металлов в вакууме и для пайки стекла
25	—	75	—	—	231	Припой обладает высокой стойкостью в щелочах

Висмутовые припои. Сплавы на основе висмута, несмотря на их низкие температуры плавления, не получили распространения в качестве припоев, так как

плохо смачивают поверхность большинства металлов, хрупки и имеют низкую прочность. Кроме того, висмут является дефицитным металлом. Особенностью припоев на основе висмута, наряду с легкоплавкостью, является увеличение объема при кристаллизации. Некоторое применение висмутовые припои находят для пайки плавких предохранителей.

§ 2. Процессы смачивания и капиллярного течения припоев

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

Смачиваемостью называется первая стадия физико-химического взаимодействия жидкости с поверхностью твердого тела, результатом которого является растекание ее тонким слоем.

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 изучении явлений смачивания в системе расплавленный припой — твердый основной металл пользуются, с одной стороны, статической теорией, рассматривающей форму жидкостей, находящихся на поверхности твердого тела в условиях наименьшей свободной поверхностной энергии, и, с другой — динамической теорией, рассматривающей течение жидкостей. На основе первой теории можно оценить силы, под действием которых происходит течение припоев в процессе пайки, вторая теория применяется

для установления причин, от которых зависит заполнение шва припоем.

Теория капиллярности. Согласно статической теории, растекание жидкостей и смачивание ими поверхности твердого тела сопровождается увеличением поверхности и происходит в результате работы преодоления сил поверхностного натяжения. Эта работа совершается разностью давлений между вогнутой и выпуклой стороной 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. 42 [1].

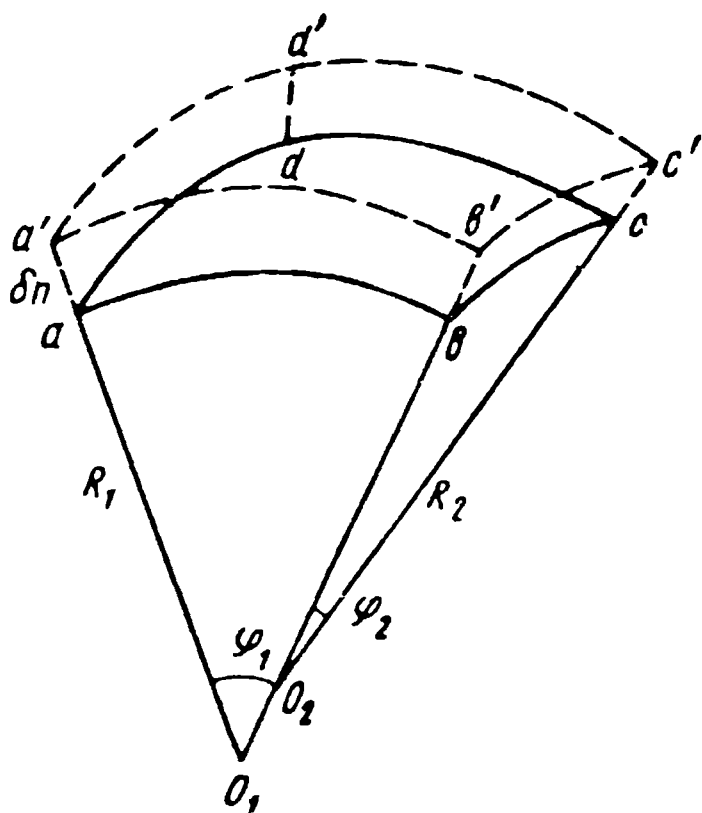


Рис. 42. Элемент криволинейной поверхности жидкости

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 стороной поверхности элемента точки a , b , c и d переместятся по нормальям на расстояние δn соответственно в положение a' , b' , c' , d' , образуя элемент с площадью S_1 . Площадь нового элемента через углы φ_1 и φ_2 будет равна:

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

$$\varphi_1 = \frac{ab}{R_1} \text{ радиан};$$

$$\varphi_2 = \frac{bc}{R_2} \text{ радиан}.$$

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 равна

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

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 стороной 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:

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

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 сравнению с тем, которое он испытывает при наличии плоской поверхности. Этим добавочным давлением главным образом обусловлены все капиллярные явления.

Избыточное давление $p_1 - p_2$ может быть выражено через высоту столба жидкости над заданным уровнем и его плотность. Например, если жидкость течет по капилляру диаметром d (рис. 43) то высота его поднятия над заданным уровнем поверхности ванны, согласно первому уравнению капиллярности, будет определяться разностью давлений $p_1 - p_2$ между вогнутой и выпуклой стороной 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 уравниваться 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.

Следовательно, высота поднятия жидкости в капилляре прямо пропорциональна ее поверхностному натяжению и смачивающей

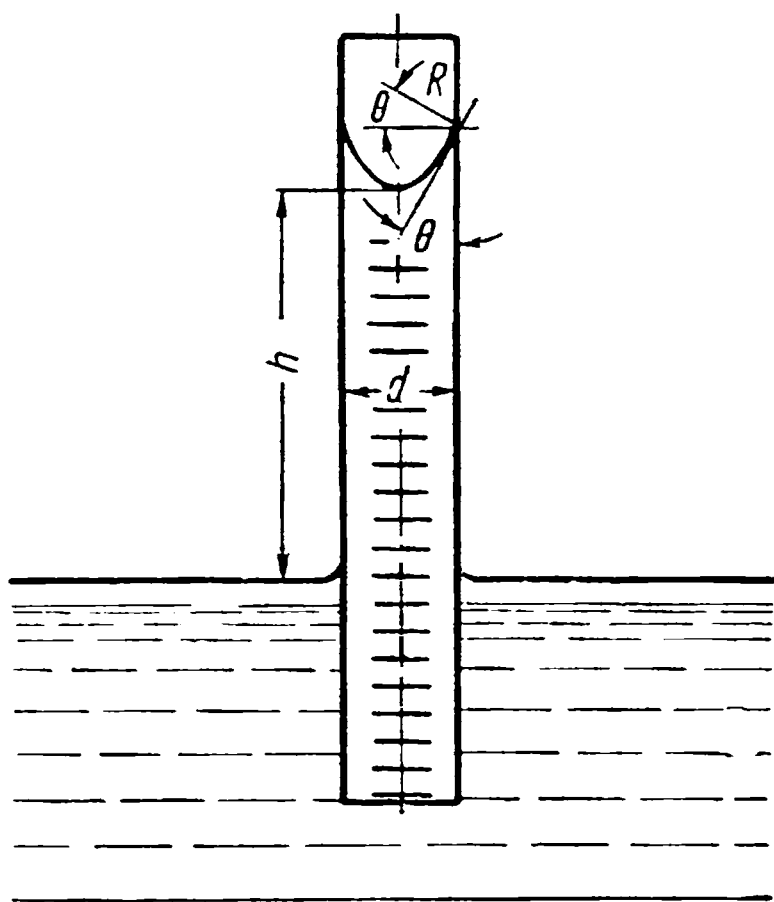


Рис. 43. Схема поднятия жидкости по капилляру

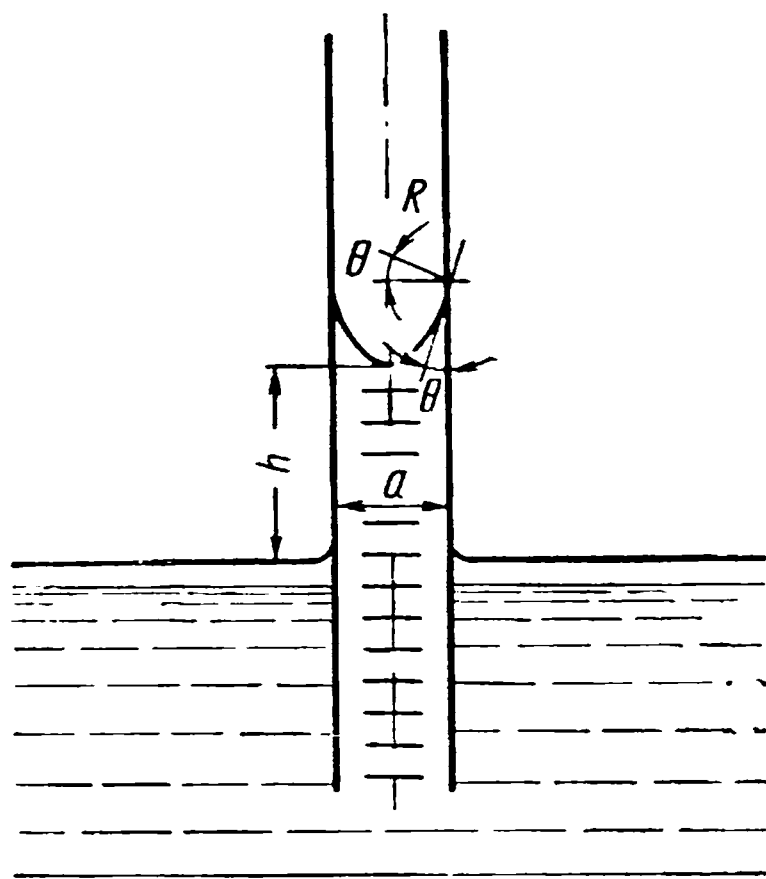


Рис. 44. Схема поднятия жидкости между параллельными пластинками

способности и обратно пропорциональна диаметру капилляра и плотности.

В случае капиллярного течения жидкости между двумя параллельными пластинками высота подъема определится из тех же соотношений (рис. 44). Если расстояние между пластинами a мало, а ширина достаточно велика, то поверхность жидкости в зазоре примет форму цилиндра, для которого

$$R_1 = \frac{a}{2}, \text{ а } R_2 = \infty,$$

тогда высота подъема жидкости согласно первому уравнению капиллярности определится из соотношения

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

или после преобразования получим

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

Разность давлений $p_1 - p_2$, как и в случае капилляра круглого сечения, будет уравниваться 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.

При растекании капли жидкости на плоской поверхности твердого тела условия ее равновесия могут быть выражены в виде равновесия векторов сил поверхностного натяжения в точке на границе трех фаз. Этой границей является периметр смачивания (рис. 45):

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

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.

Это выражение является вторым уравнением капиллярности, из которого следует, что

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

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

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.

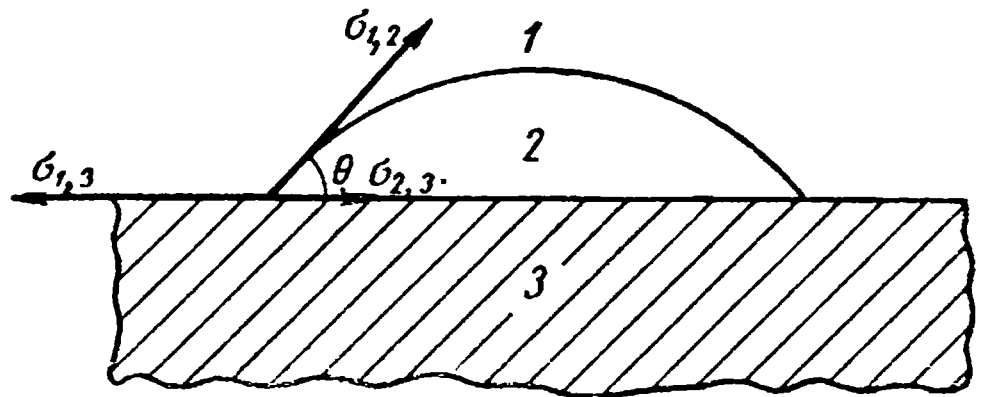


Рис. 45. Схема равновесия векторов сил поверхностного натяжения капли жидкости на поверхности твердого тела:

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

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

Поскольку в процессе пайки припой находится в жидком состоянии, то на них можно распространить рассмотренные уравнения капиллярности. Однако при этом необходимо иметь в виду, что уравнения выведены для случая невзаимодействующих с твердым телом жидкостей. В процессе же пайки происходит активное взаимодействие в контакте расплавленный припой — основной металл, поэтому капиллярные явления, протекающие в условиях пайки, более сложные и, следовательно, не вполне точно описываются выведенными уравнениями.

Таблица 30

Наименование металла	Поверхностное натяжение в н/м (эрг/см ²)
Алюминий	0,860±0,02 (860±20)
Висмут	0,380±0,01 (380±10)
Железо	1,210±0,01 (1210±10)
Кадмий	0,550±0,01 (550±10)
Медь	1,180±0,04 (1180±40)
Олово	0,525±0,01 (525±10)
Свинец	0,410±0,005 (410±5)
Сурьма	0,395±0,02 (395±20)
Цинк	0,750±0,02 (750±20)

Показывает, что основными силами, под действием которых припой затекает в капиллярные зазоры, являются силы смачивания, и, следовательно, выводы динамической теории течения жидкостей, применительно к условиям пайки оказываются в противоречии с экспериментальными данными. Таким образом, если уравнения капиллярности, выведенные на основе статической теории жидкостей, с известным приближением могут быть распространены на процессы смачивания и капиллярного течения расплавленных припоев, то динамическая теория, ввиду наличия активного взаимодействия между расплавленным припоем и основным металлом, протекающего в капиллярном зазоре, для анализа явлений, происходящих при пайке, не может быть применена.

Смачивание и капиллярное течение при пайке. Согласно статической теории жидкостей смачивание поверхности основного металла расплавленным припоем и затекание в капиллярный зазор зависят от поверхностного натяжения припоя в расплавленном состоянии. Как можно видеть из табл. 30, в которой приведены значения поверхностного натяжения металлических расплавов вблизи точки плавления, металлы, входящие в состав припоев, обладают высоким поверхностным натяжением.

По первому уравнению капиллярности, чем больше значение поверхностного натяжения жидкостей, тем выше подни-

маются они в капиллярном зазоре. Однако поверхностное натяжение металлов не характеризует однозначно способность их в расплавленном состоянии течь по поверхности твердого металла. Процесс смачивания расплавленным припоем основного металла в значительной мере 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. 31.

Таблица 31

Наименование металла	Температура в °C	Свободная поверхностная энергия в н/м (эрг/см ²)	Наименование металла	Температура в °C	Свободная поверхностная энергия в н/м (эрг/см ²)
Железо	20	3,959 (3959)	Алюминий	20	1,909 (1909)
»	1400	2,070 (2070)	Магний	20	0,704 (704)
Медь	1050	1,430 (1430)	Цинк	20	0,859 (859)
Вольфрам	20	6,814 (6814)			

Согласно современным взглядам, природа сил смачивания и капиллярного течения — электромагнитная [38], поэтому характер взаимодействия в контакте основной металл — расплавленный припой, в конечном счете, определяется величиной и знаком электромагнитных сил поверхностей 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 их на смачивание и капиллярное течение не представляется возможным. Поэтому при анализе явлений смачивания и капиллярного течения 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. 46 приведены значения угла смачивания расплавленными припоями системы олово—свинец стали ШХ15 и поверхностного натяжения сплавов этой системы [47], из которых можно видеть, что наименьшему значению поверхностного натяжения не отвечает 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.

В зависимости от смачивающей способности припоев находится способность их растекаться по поверхности паяемого металла.

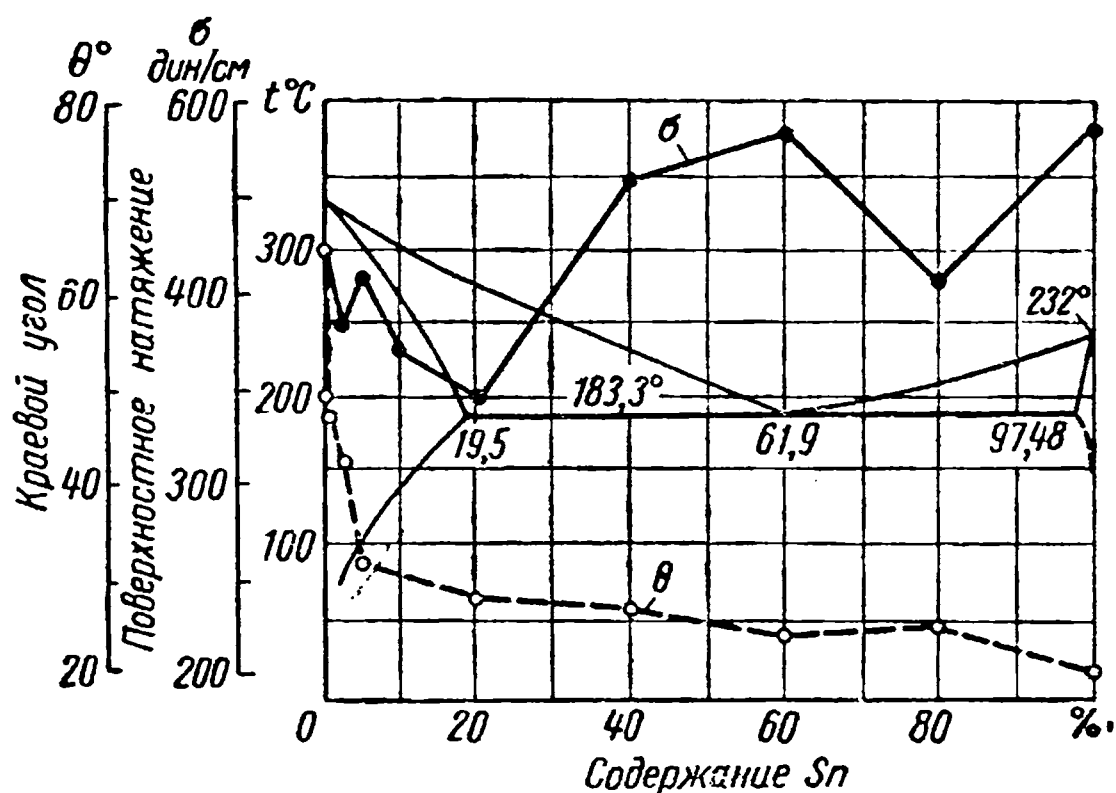


Рис. 46. Значения угла смачивания сплавов системы олово—свинец на стали ШХ15 в сопоставлении с поверхностным натяжением этих сплавов

Эта характеристика припоев оценивается коэффициентом растекания, равным разности работ адгезии припоя к паяемому металлу и когезии частиц припоя:

$$k = A_a - A_k,$$

но $A_a = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}$; $A_k = 2\sigma_{1,2}$, тогда

$$k = \sigma_{1,3} - \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3} = \sigma_{1,2} (\cos \theta - 1),$$

где k — коэффициент растекания;

A_a — работа адгезии;

A_k — работа когезии.

Из последнего выражения следует, что коэффициент растекания находится в непосредственной зависимости от краевого угла смачивания и полное растекание будет иметь место только при полном смачивании, т. е. при $\cos \theta = 1$. 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 лежит в интервале между их солидусом и ликвидусом. Эта закономерность хорошо иллюстрируется рис. 47, 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. Приблизленно ее можно принять равной 0,8 от температуры начала плавления припоя [28].

Рассматривая смачивание паяемой поверхности припоем как процесс, предшествующий взаимной диффузии твердого основного металла и расплавленного припоя, необходимо отметить, что отсутствие общих фаз между ними почти всегда ведет к отсутствию смачивания. Так, в системах Fe — Ag, Fe — Pb, Cu — Pb и других, в которых нет общих фаз, угол смачивания $\theta > 90^\circ$, что указывает на отсутствие или крайнюю ограниченность смачивания. При наличии общих фаз между взаимодействующими металлами обычно имеют место малые углы смачивания и хорошее растекание расплавленного припоя по поверхности твердого металла. Однако прямой зависимости между способностью взаимодействующих металлов образовывать общие фазы и смачиваемостью нет. При интенсивном характере образования совместных фаз растекание припоя ухудшается. Это особенно заметно при значительном перегреве припоя выше температуры ликвидуса.

На процесс смачивания и затекания припоя в соединительный зазор существенно влияет способ удаления окисной пленки в процессе пайки. Так, в случае флюсовой пайки, наряду с удалением окисной пленки с паяемого металла и припоя, флюсы действуют как поверхностно-активные вещества, снижая поверхностное натяжение расплавленных припоев, что способствует улучшению смачивания паяемой поверхности. При применении активных или нейтральных газовых сред наряду с удалением окисной пленки может происходить взаимодействие примесей, содержащихся в газовой среде, с основным металлом и припоем. 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.

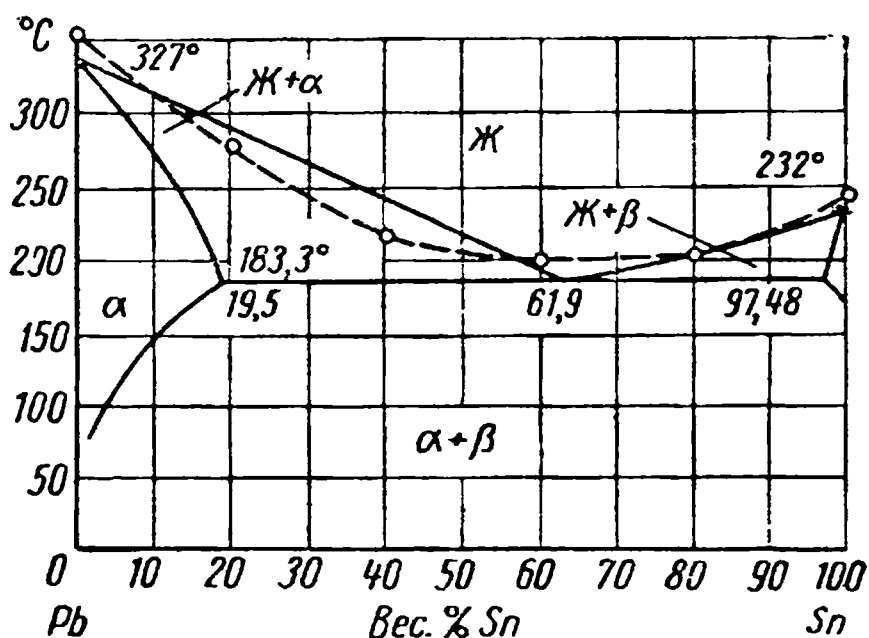


Рис. 47. Зависимость минимальной температуры растекания припоев системы свинец—олово от состава

В практике пайки способность расплавленного припоя смачивать паяемый металл оценивается не только по углу смачивания, но также и по площади растекания дозированного количества припоя при неизменных условиях пайки. На рис. 48 изображены образцы, на которых проводилось определение влияния состава флюсов, приведенных в табл. 32, на площадь и характер растекания припоя 34А по алюминию в зависимости от содержания во флюсе хлористого цинка.

Увеличение во флюсе более 8% $ZnCl_2$ нецелесообразно, так как площадь растекания от дальнейшего увеличения содержания его во флюсе не увеличивается.

Таблица 32

Наименование компонентов флюса	Содержание компонентов флюса в % по весу (по образцам сверху вниз) (рис. 48)					
	1	2	3	4	5	6
KCl	50	48	46	44	42	40
LiCl	40	40	40	40	40	40
NaF	10	10	10	10	10	10
$ZnCl_2$	0	2	4	6	8	10

На характер смачивания поверхности основного металла расплавленным припоем можно влиять путем изменения не только состава флюса, но и состава припоя. Так, на рис. 49 приведены зависимости краевого угла смачивания хромоникелевого сплава от содержания в серебряном припое палладия. Как можно видеть из кривых, с увеличением до определенного предела содержания палладия в припое краевой угол смачивания уменьшается и, следовательно, смачивающая способность его улучшается. Решающее влияние на капиллярное течение расплавленного припоя имеет величина

зазора между соединяемыми деталями. При одном и том же зазоре горизонтальное расположение шва обеспечивает 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 [60]. Горизонтальный шов заполняется припоем за меньший отрезок времени и на значительно большую глубину.

На процессы смачивания и капиллярного течения припоя в зазоре значительно влияют такие технологические факторы, как вид механической обработки основного металла, способ очистки перед пайкой, режим пайки и др. Так, полированные с применением паст поверхности плохо смачиваются расплавленными припоями, что объясняется загрязнением поверхности остатками пасты. После электрохимической полировки смачивание поверхности металлов припоями протекает легко. Детали, обдутые песком, смачиваются припоями удовлетворительно, но оставшиеся на поверхности частицы кремнезема могут привести к некоторому

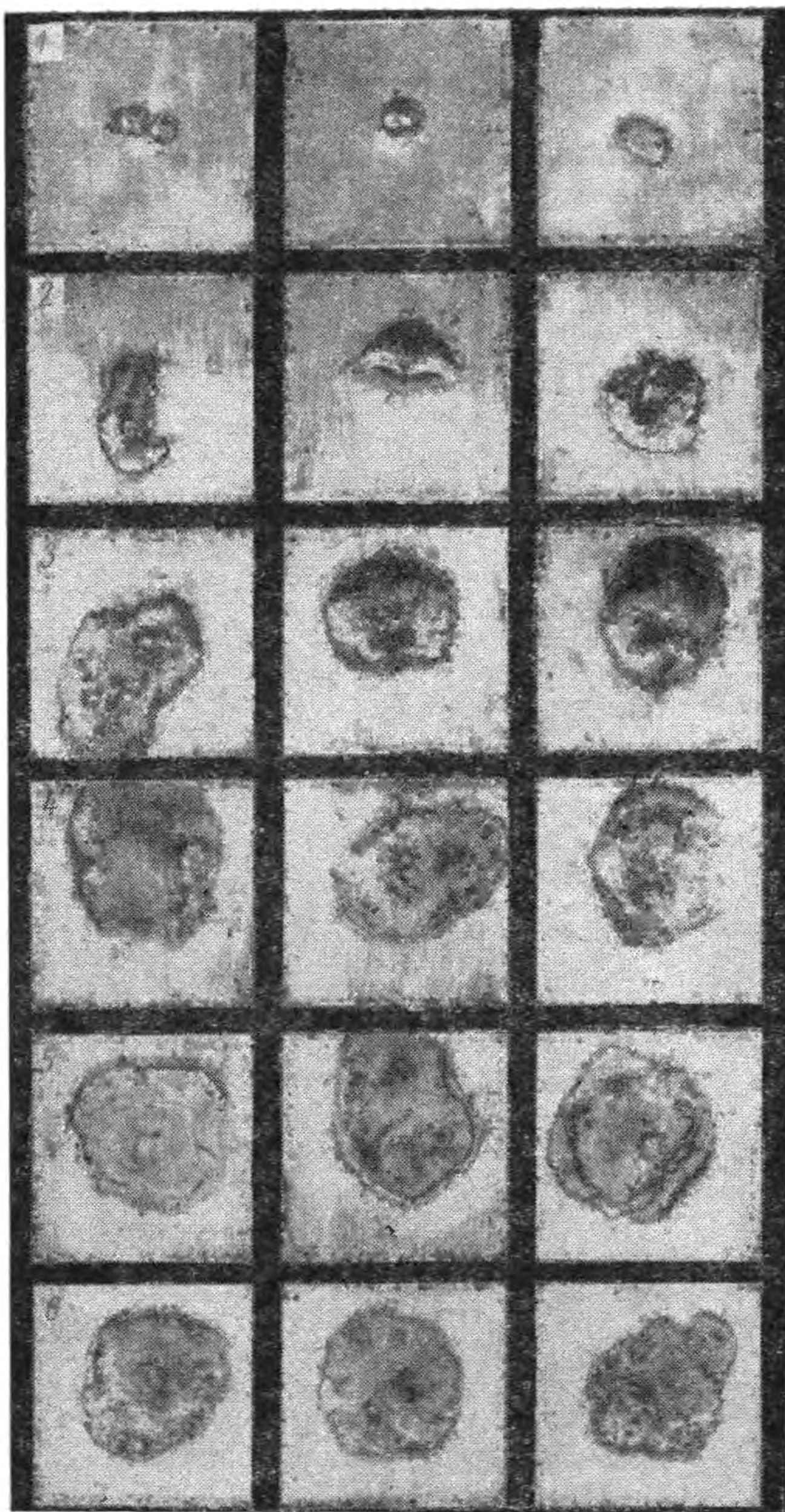


Рис. 48. Зависимость площади растекания припоя марки 34А по алюминию от состава флюса

снижению прочности паяных соединений. Дробеструйная обработка не ухудшает условий смачивания и растекания припоев. Шлифованные поверхности хорошо смачиваются расплавлен-

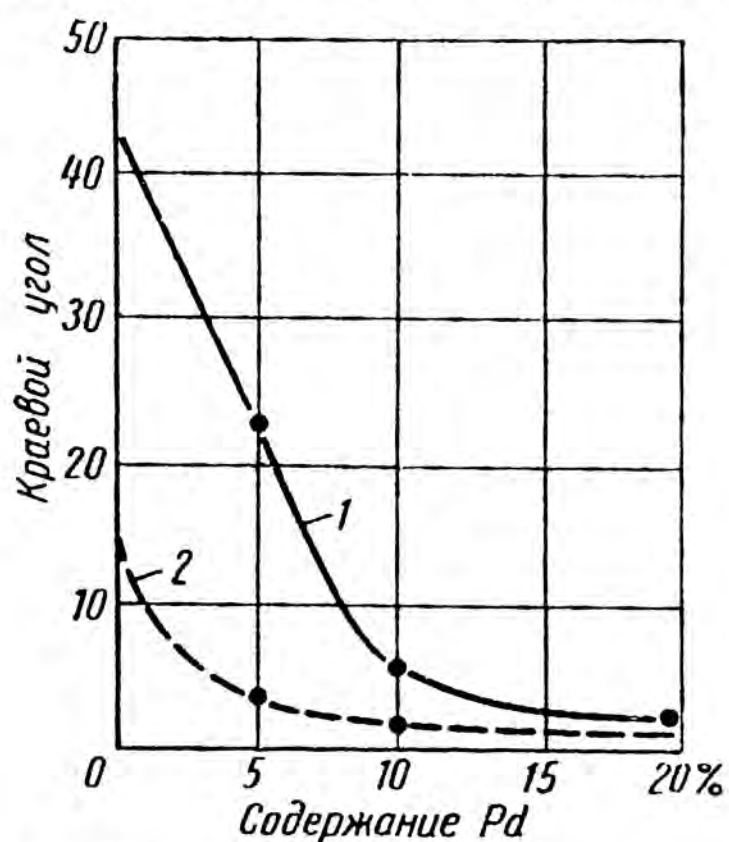


Рис. 49. Зависимость краевого угла смачивания от содержания палладия в припое:

1 — в водороде; 2 — в аргоне

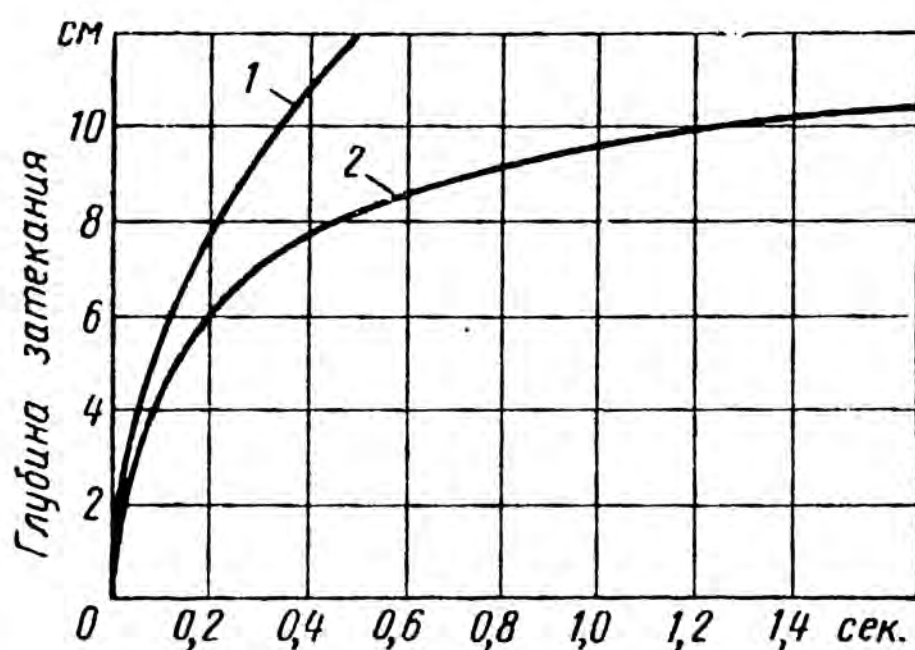


Рис. 50. Кривые зависимости глубины затекания припоя при горизонтальном 1 и вертикальном 2 положении шва

ным припоем. На рис. 51 представлен образец стали 20, обработанный по секторам а, б, в и г различными способами: полированием с применением паст (а), травлением (б), шлифованием (в) и на пескоструйной установке (г). Навеска латуни Л62, внесенная по центру образца при нагреве до 950°, смочила главным образом шлифованную поверхность, наиболее свободную от окислов и загрязнений [13]. 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.

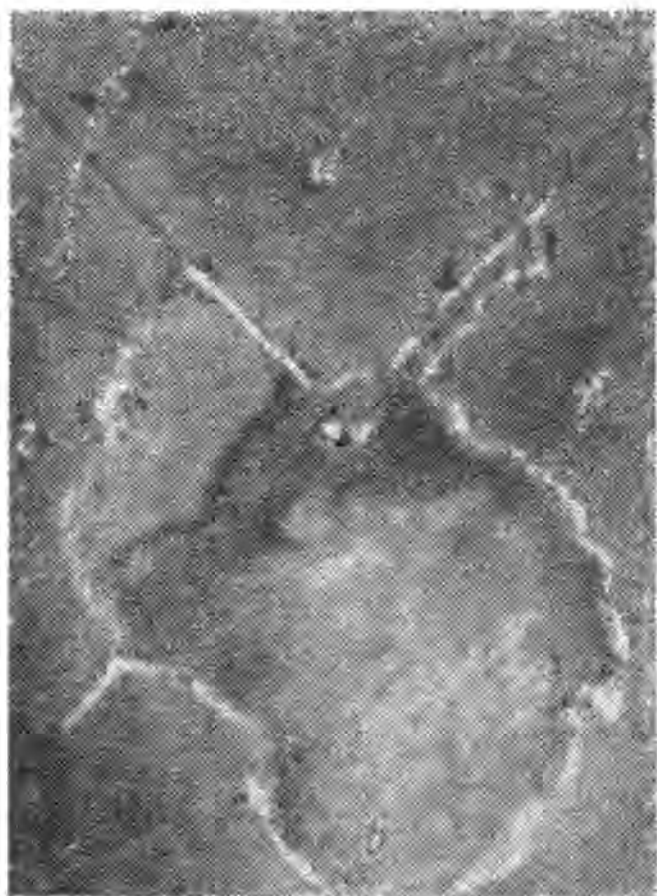


Рис. 51. Характер растекания припоя в зависимости от способа обработки поверхности металла перед пайкой

При пайке необходим равномерный нагрев соединяемых металлов до определенной температуры. Если отдельные участки соединяемых поверхностей металла окажутся нагретыми ниже температуры пайки, то условия равномерного смачивания паяемой поверхности расплавленным припоем не будут обеспечены.

При пайке необходим равномерный нагрев соединяемых металлов до определенной температуры. Если отдельные участки соединяемых поверхностей металла окажутся нагретыми ниже температуры пайки, то условия равномерного смачивания паяемой поверхности расплавленным припоем не будут обеспечены.

§ 3. 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 всем веществам: газообразным, жидким и твердым. Диффундировать могут как разнородные вещества, так и частицы однородного вещества в пределах своего объема. Перемещение частиц однородного вещества в своем собственном объеме называется самодиффузией. Такой вид диффузии не связан с изменением концентрации вещества и наблюдается в чистых металлах и твердых растворах. Исследование его стало возможным благодаря применению «меченых» атомов.

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 находится в контакте с основным металлом от нескольких секунд до десятков минут. За это время протекает диффузия компонентов припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя. Так, при пайке меди серебряным припоем ПСр45 при выдержке 10—20 сек диффузионный слой со стороны основного металла составляет 1,5—2 мкм и со стороны припоя — 7—16 мкм.

Существование диффузии в металлах показывает, что при определенных условиях атомы или ионы смещаются из своих положений в узлах кристаллической решетки и могут перемещаться по всему объему. В этом разупорядоченном состоянии они приобретают избыточный пространственный заряд по сравнению с упорядоченной системой. В результате этого 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 мест. 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 [49].

В твердых металлах диффузия может происходить по поверхности (поверхностная диффузия), по границам зерен (граничная диффузия) и в объеме отдельных зерен (объемная диффузия). Ввиду разного энергетического состояния металла, в этих неодинаковых условиях диффузия будет иметь также различное значение. Пре-

обладающая роль диффузии по поверхности и границам зерен имеет место в тех случаях, когда растворимость припоя в основном металле мала. При наличии значительной растворимости припоя в основном металле роль повышенной диффузии по границам зерен становится малозаметной. Схема диффузии по поверхности, по границам зерен и в объеме зерен представлена на рис. 52. Диффузия по границам зерен в некоторых случаях протекает очень интенсивно, приобретая характер растворения основного металла в расплавленном припое, в результате чего целые зерна отрываются и переходят в расплав припоя. Такую картину можно наблюдать, например, при пайке меди припоем ПСр72 с добавкой никеля (рис. 53). Значительное проникновение припоя по границам зерен отрицательно сказывается на прочности паяных соединений.

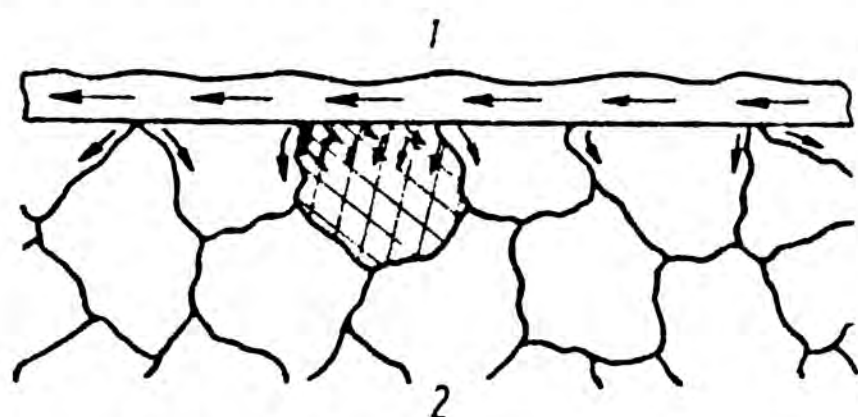


Рис. 52. Схема диффузии припоя в основном металле:

1 — припой; 2 — основной металл

можно наблюдать, например, при пайке меди припоем ПСр72 с добавкой никеля (рис. 53). Значительное проникновение припоя по границам зерен отрицательно сказывается на прочности паяных соединений.

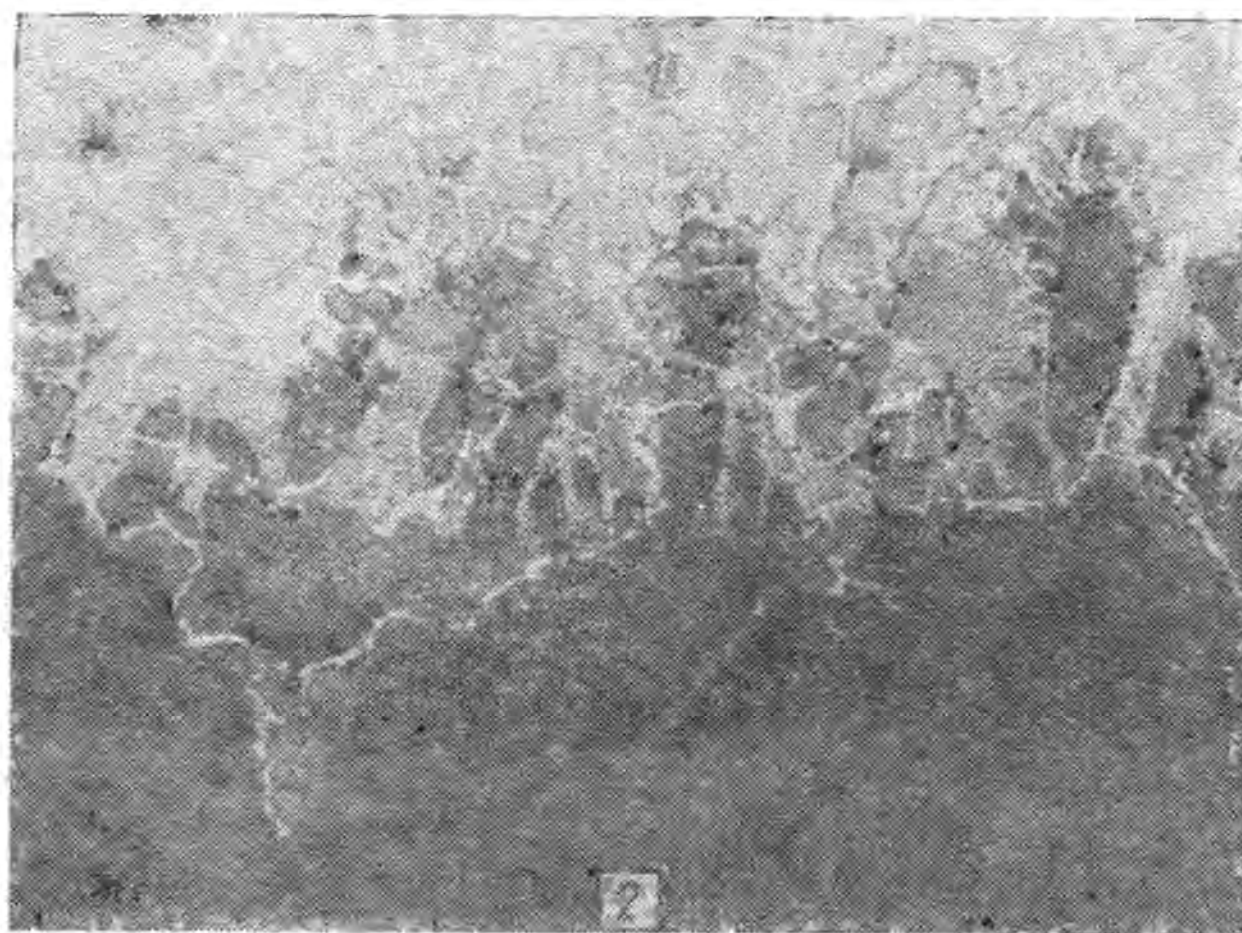


Рис. 53. Микроструктура шва при пайке меди припоем ПСр72 с содержанием никеля (по А. С. Екатовой) $\times 200$:

1 — припой; 2 — медь

При рассмотрении диффузии в металлах различают атомную диффузию, под которой понимают процесс перемещения диффундирующего вещества в пределах одной фазы и реактивную диффузию, при которой, в результате химических реакций, между взаимо-

действующими металлами происходит образование новых фаз с отличной от исходных металлов кристаллической решеткой. Процесс атомной диффузии приводит лишь к такой концентрации вещества в металле-растворителе, которая не превышает предельной при данной температуре концентрации образующегося твердого раствора. Однако возможны случаи, когда в результате диффузии при высоких температурах происходит увеличение концентрации твердого раствора, но последующее охлаждение вызывает фазовые превращения в диффузионном слое. Поэтому атомную диффузию определяют как процесс, при котором не происходит образования новых фаз непосредственно при протекании самой диффузии. С этим видом диффузии связано главным образом растворение основного металла в расплавленном припое в процессе пайки. В результате растворения на границе основной металл — припой могут образовываться промежуточные слои сплавов в соответствии с диаграммой состояния. Интерметаллические фазы в этом случае могут возникать вследствие одного только процесса растворения, независимо от возможности непосредственных химических реакций в контакте основной металл — расплавленный припой, что указывает на условность терминов атомная и реактивная диффузия.

Атомная диффузия *. Наиболее просто протекают процессы диффузии и растворения, когда взаимодействующие металлы (припой и основной металл) не образуют между собой интерметаллических соединений. В этом случае процесс переноса атомов твердого основного металла в жидкий припой протекает активно и определяется скоростью диффузии. Отрыв атомов основного металла вызывается как колебательным движением самих атомов, так и взаимодействием атомов твердого и расплавленного металлов. Изменение концентрации расплавленного припоя происходит в некотором прилегающем к основному металлу слое, в котором концентрация через определенное время выдержки достигает предела насыщения. При постоянной температуре пайки концентрация основного металла в расплаве припоя, достигнув определенной в соответствии с диаграммой состояния величины, перестает возрастать и из жидкого сплава начинают выделяться пересыщающие его кристаллы, которые частично находятся в расплавленном припое, а частично кристаллизуются на поверхности основного металла [8, 11]. Сущность этой неоднородности можно видеть из рассмотрения приведенной на рис. 54 схематичной диаграммы состояния пары металлов, не образующих между собой интерметаллических соединений и не растворяющихся в твердом состоянии.

При температуре t , до которой нагрет расплав припоя, на поверхности твердого основного металла образуется жидкость, кото-

* При рассмотрении механизма атомной и реактивной диффузии имеется в виду, что взаимодействуют чистые металлы.

рая при затвердевании образует сплав, состоящий из первичных кристаллов A и эвтектики $A + B$. Кристаллы A выпадают главным образом на поверхности основного металла, а эвтектика оттесняется к центру шва. Эта неравномерность в структуре

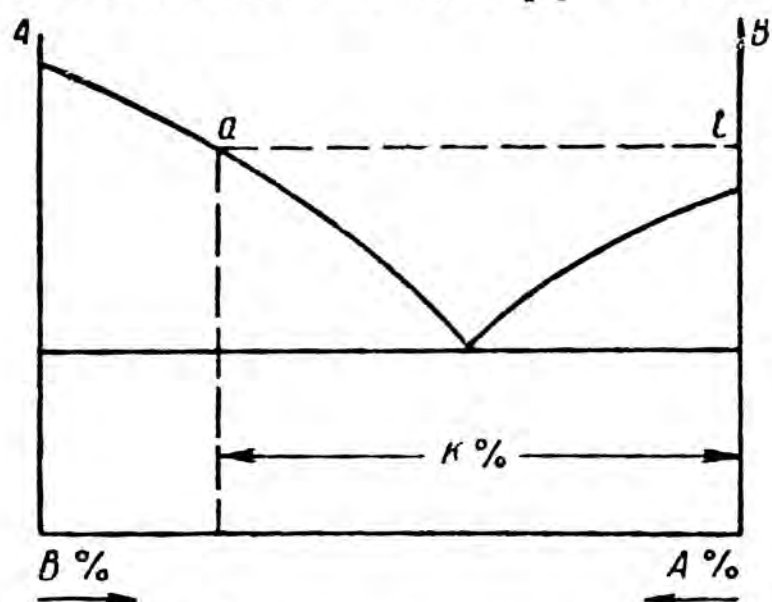


Рис. 54. Схема диаграммы состояния металлов, не образующих интерметаллических соединений и не растворяющихся в твердом состоянии

шва — следствие не столько неоднородного состава жидкой фазы, сколько результат разделительной диффузии при кристаллизации.

Наблюдаемое обогащение границах с основным металлом зон тугоплавким компонентом и обеднение им центра шва имеет место почти во всех случаях пайки, если основной металл хоть в какой-то мере растворяется в расплавленном припое. Рассмотрим в качестве примера пайку железа медью. По данным микрорентгеноспектрального анализа, проведенного А. С. Екатовой и Ю. Ф. Сидохи-

ным, при температуре пайки 1100°C медь растворяет в себе $\sim 3\%$ Fe, что соответствует диаграмме состояния Fe — Cu. При этом у границы раздела с основным металлом медь содержит 4% Fe, а к центру шва содержание железа снижается до 2% , что является следствием разделительной диффузии при кристаллизации сплава в шве. Микроструктура паяного шва при пайке армко-железа медью приведена на рис. 55.

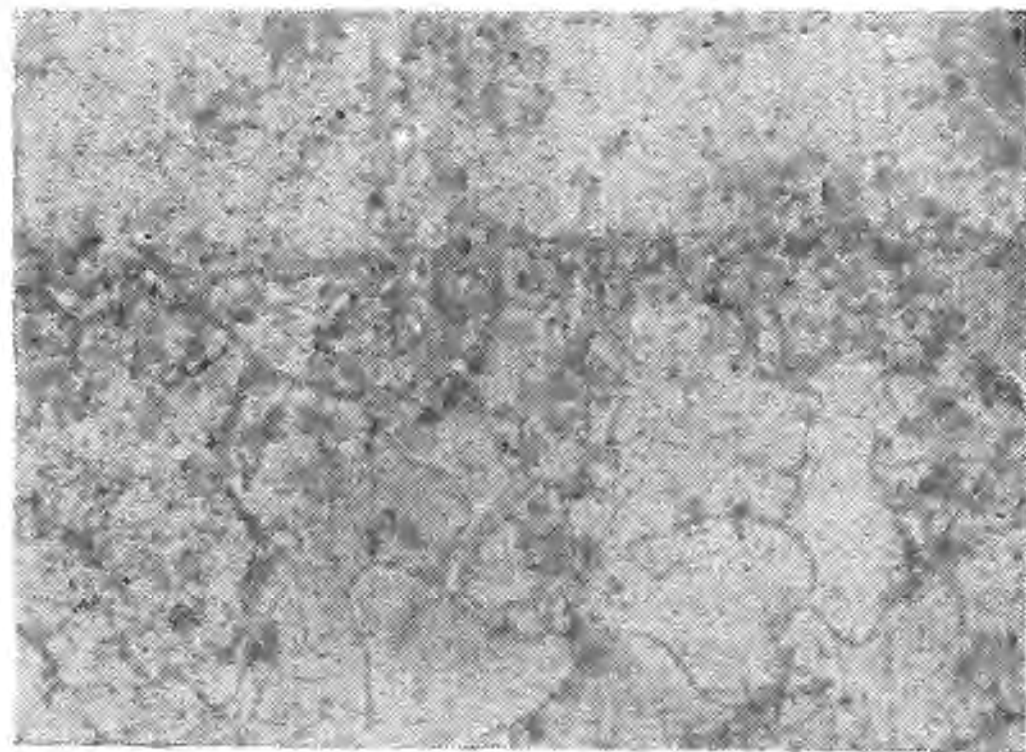


Рис. 55. Микроструктура шва при пайке армко-железа медью; $\times 450$

Реактивная диффузия. Если паяемый металл и расплавленный припой образуют между собой химические соеди-

нения, то в процессе пайки на границе раздела основной металл — припой в результате реакции на твердой поверхности может возникнуть слой интерметаллического соединения.

Если основной металл и расплавленный припой могут образовывать между собой несколько интерметаллических фаз, то на границе с твердым металлом возникает несколько слоев. Последовательность их возникновения будет зависеть от условий равнове-

сия 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 реактивных фаз, образующихся на границе основной металл — припой зависят от внешних условий процесса и, в первую очередь, от температуры. Если первично образовавшаяся фаза не является самой богатой легкоплавким компонентом, то она взаимодействует не только с твердым основным, но и с расплавленным припоем. Такой случай взаимодействия имеет место, 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 уже не определяется условиями равновесия. Примером образования 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 образуются 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. В то же время скорость образования диффузионного слоя при наличии химического взаимодействия значительно возрастает по сравнению с атомной диффузией.

Возможны случаи реактивной диффузии, когда интерметаллид распределен в виде отдельных изолированных кристаллов по всему объему паяного шва. Это 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 по всему объему паяного шва паяные соединения получают 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 приведена микроструктура паяного шва в случае пайки титана чистым серебром. По размеру отпечатков прибора микротвердости можно видеть, что слои интерметаллида $TiAg$, прилегающие к основному металлу, имеют большую по сравнению с титаном твердость.

Количественная оценка диффузии может быть произведена на основе законов диффузии. Согласно первому закону диффузии

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

где dm — количество диффундирующего вещества;
 D — коэффициент диффузии, численно измеряемый количеством вещества в молях или граммах, продиффундировавшего за единицу времени через единичную площадь (см^2) при градиенте концентрации, равном единице;
 S — площадка, в перпендикулярном направлении к которой происходит диффузия;
 $\frac{dC}{dx}$ — градиент концентрации C в направлении диффузии;
 dt — время диффузии.



Рис. 56. Микроструктура шва при пайке титана чистым серебром; $\times 500$

Знак минус в формуле указывает на то, что диффузия протекает в сторону уменьшающейся концентрации вещества. Коэффициент диффузии определяет скорость процесса и зависит от природы диффундирующих веществ, их состояния и температуры.

В процессе диффузии скорость накопления диффундирующего металла в данном элементе объема определяется разностью между приходящим и выходящим потоком за единицу времени. Если возьмем две параллельные плоскости площадью, равной единице,

на расстоянии dx , то поток через первую плоскость выразится первым законом диффузии в следующей форме:

$$m = -D \frac{dC}{dx}.$$

Поток через вторую плоскость будет равен

$$m + \frac{dm}{dx} = -D \frac{dC}{dx} + \left[-\frac{d}{dx} \left(D \frac{dC}{dx} \right) \right];$$

но согласно предыдущему $m = -D \frac{dC}{dx}$,
тогда

$$\frac{dm}{dx} = -\frac{d}{dx} \left(D \frac{dC}{dx} \right).$$

Так как $\frac{dm}{dx}$ равно взятой с обратным знаком скорости изменения концентрации, т. е. $-\frac{dC}{dt}$,
то

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dC}{dx} \right).$$

Принимая, что D является постоянной величиной, получим уравнение второго закона диффузии:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}.$$

Этот закон выражает изменение концентрации диффундирующего вещества 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

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

где A — коэффициент, определяемый главным образом типом кристаллической решетки;

R — газовая постоянная, равная $1,987 \text{ кал/г} \cdot \text{атом}$;

T — абсолютная температура в $^{\circ}\text{К}$;

Q — теплота 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 теплота диффузии и выше коэффициент диффузии, а следовательно, больше скорость диффузии и растворение основного металла в расплавленном припое.

Об интенсивности диффузии отдельных компонентов при пайке можно судить по приведенным в табл. 1 атомным и ионным радиусам элементов, входящих в состав основного металла и припоя.

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

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

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

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

$$dm = aS dx,$$

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

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

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

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 реактивной диффузии толщина слоя интерметаллического соединения в зависимости от времени пайки увеличивается по параболическому закону. Параметр параболы p характеризует скорость роста и является величиной, пропорциональной коэффициенту диффузии, с которым он совпадает и по размерности.

В условиях растворения твердого 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 имеет место отклонение от параболического закона роста диффузионного слоя. Экспериментальной проверкой установлено, что и скорость процесса взаимодействия при реактивной диффузии непостоянна. В начале образования интерметаллических фаз скорость реактивной диффузии больше, чем это следует из параболического закона, вследствие реакции на поверхности взаимодействующих металлов. В дальнейшем скорость процесса снижается и характеризуется обычным коэффициентом диффузии. 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. 33 [22].

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

Основной металл	Диффундирующий металл	Температура в °C	Коэффициент диффузии в см ² /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	$2,0 \cdot 10^{-9}$
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	$2,04 \cdot 10^{-9}$

ных 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 получил большое распространение при исследовании паяных швов. Кривая распределения твердости отдельных фаз в шве (основной металл — титан марки ВТ1Д, припой системы серебро — марганец), полученная путем замера микротвердости, приведена на рис. 57.

В некоторых случаях диффузионный слой четко выделяется на травленном микрошлифе по цвету и ширина его может быть измерена на микроскопе. На рис. 58 приведена микроструктура шва при пайке титана тем же припоем серебро — марганец, из которой можно видеть, что диффузионный слой резко очерчен и хорошо виден. Отпечатки алмазной пирамиды прибора микротвердости позволяют оценить твердость отдельных фаз.

Примеры диффузии в паяных швах. В зависимости от состава основного металла и припоя, между ними в процессе диффузии при температуре пайки могут образовываться твердые растворы, эвтектики и интерметаллические соединения. Структуры твердых растворов возникают в паяных швах в тех случаях, когда применяемый припой может образовать с основным металлом сплавы типа твердых растворов. В качестве примера можно привести слу-

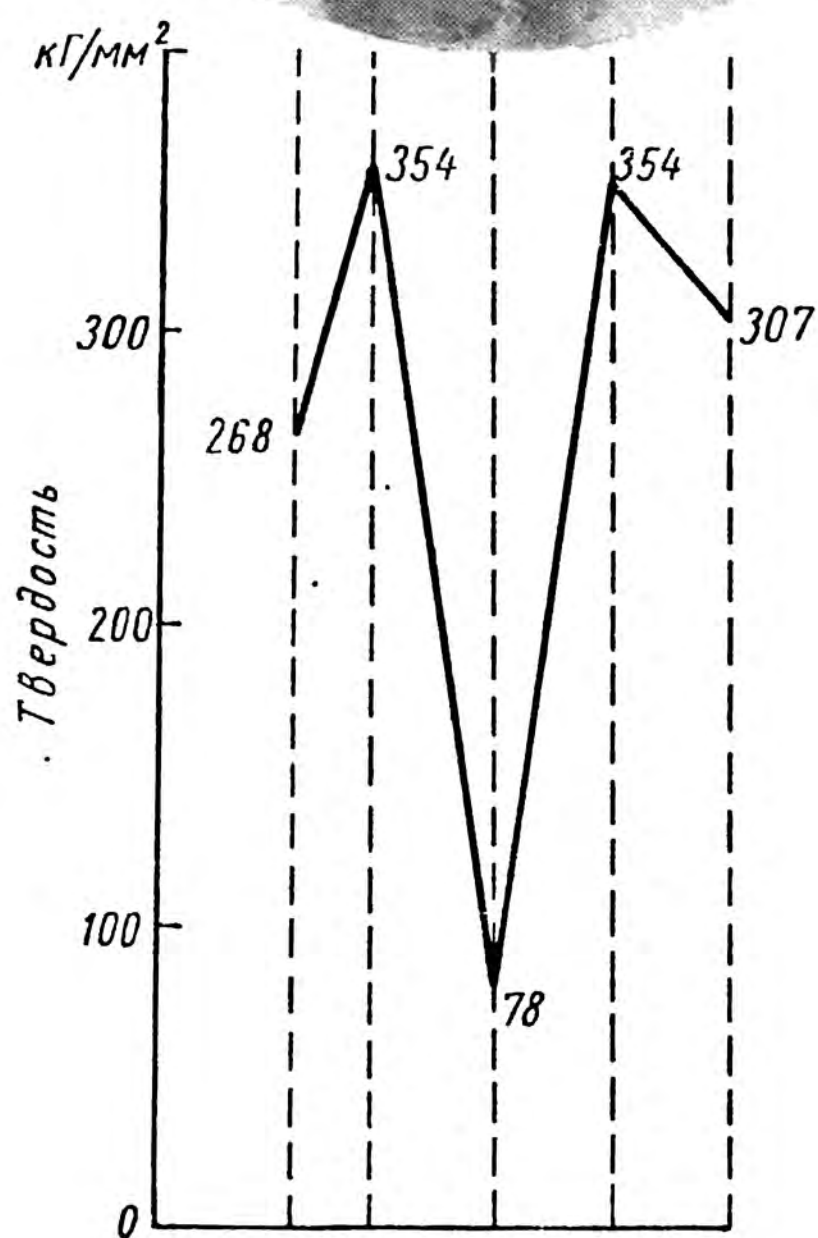
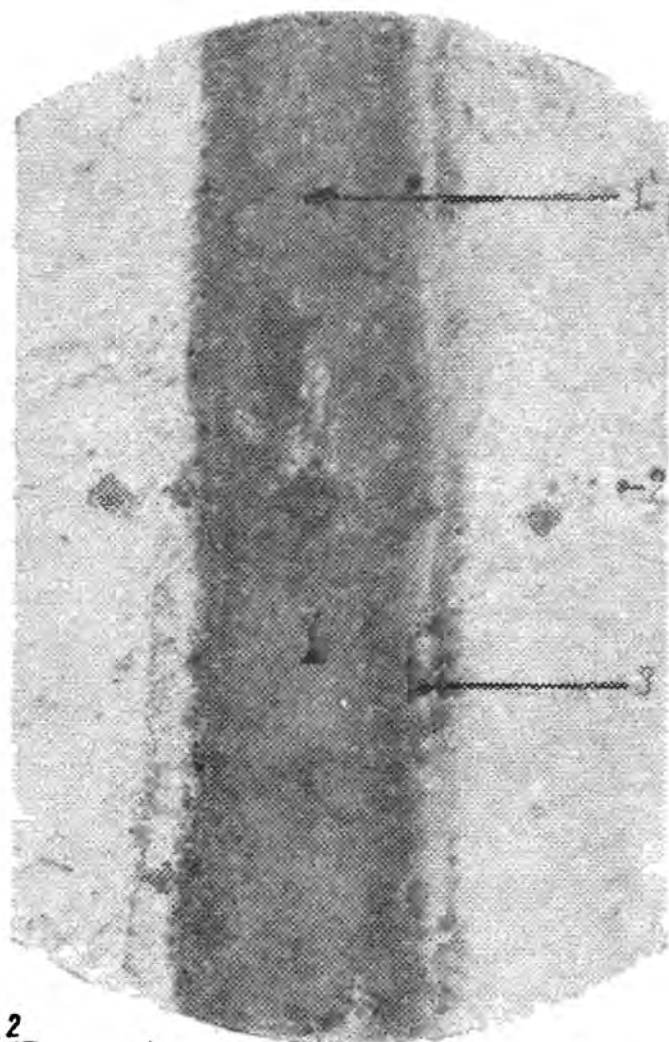


Рис. 57. Пример определения твердости отдельных фаз в паяном шве: 1—припой; 2 — основной металл; 3—слой интерметаллического соединения (по В. М. Гостениной); $\times 200$

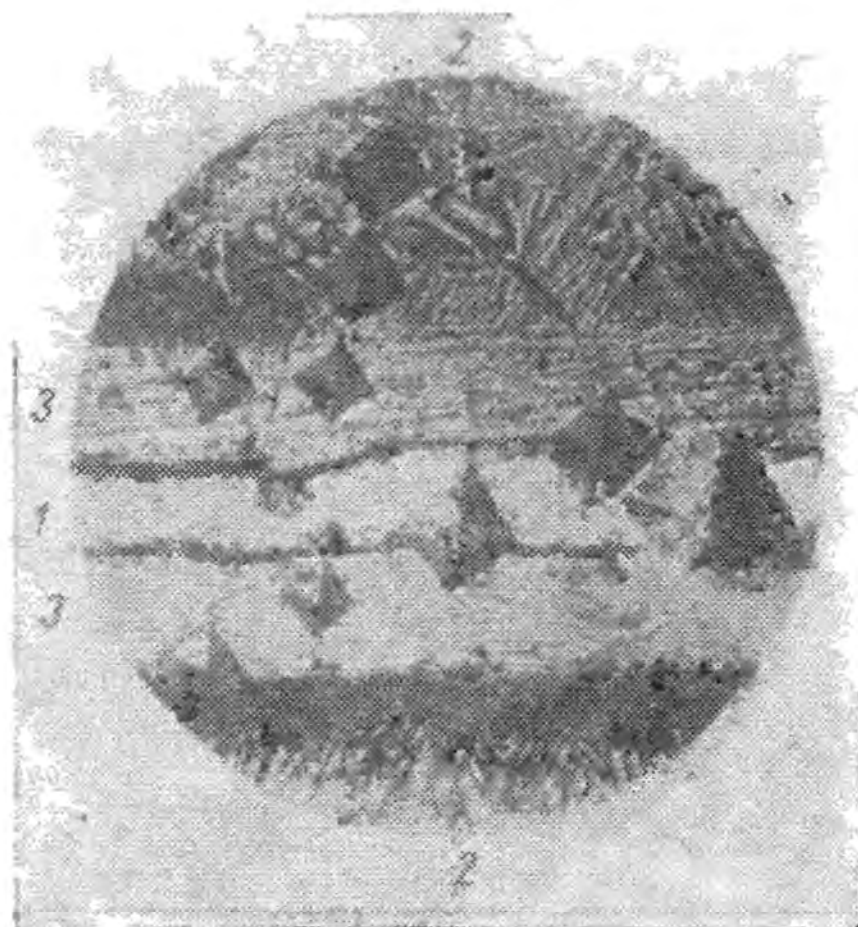


Рис. 58. Микроструктура шва при пайке титана ВТ1 припоем системы серебро—марганец; $\times 400$:

1—припой; 2 — основной металл; 3—диффузионный слой.



Рис. 59. Микроструктура шва при пайке никеля медью в вакууме (по А. С. Ека-товой); $\times 200$

чай пайки никеля медью. Эти металлы в процессе взаимодействия образуют между собой твердые растворы при любых соотношениях. Микроструктура шва, полученная при пайке никеля медью, приведена на рис. 59.

Эвтектические структуры в паяных швах получают или при пайке припоями, содержащими эвтектику, например серебряными припоями ПСр72 и ПСр40, оловянно-свинцовыми припоями ПОС61, алюминиевыми 34А, или в результате образования эвтектики в процессе взаимодействия основного металла с припоем. На рис. 60 приведена микроструктура шва, полученного при пайке



Рис. 60. Микроструктура шва при пайке алюминия припоем 34А; $\times 150$

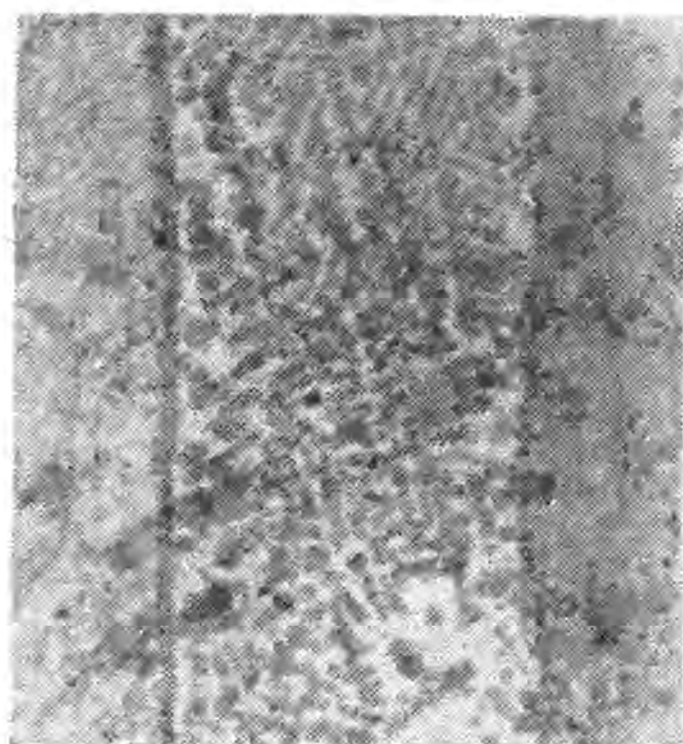


Рис. 61. Микроструктура шва при пайке вольфрама и молибдена родием (по Л. Л. Гржимальскому); $\times 200$

алюминия припоем эвтектического состава системы алюминий — медь — кремний. В структуре шва можно видеть тройную эвтектику (темное поле) и зерна твердого раствора кремния и меди в алюминии (светлого цвета). Твердый раствор алюминия с компонентами припоя можно наблюдать также по границам основной металл — припой (светлые полосы).

Микроструктура эвтектического типа, образовавшаяся непосредственно в процессе пайки вольфрама и молибдена родием при температуре 2000°C приведена на рис. 61.

Образование интерметаллических соединений при пайке между припоем и основным металлом происходит в соответствии с диаграммой состояния взаимодействующих металлов. Так, например, на рис. 62, а приведена микроструктура шва, образовавшегося при пайке меди оловом при температуре 250°C и выдержке 5 сек. При этих условиях на границе медь — олово образуется слой интерметаллического соединения Cu_6Sn_5 , содержащего 60,89% Sn (светлая полоса). С повышением температуры пайки до 350°C

и увеличением выдержки до 5 мин наряду с интерметаллидом Cu_6Sn_5 в структуре шва возникает второй слой интерметаллического соединения Cu_3Sn , содержащего 38,37% Sn, расположенный со стороны меди (рис. 62, б). Неровный (пилообразный) вид диффузионного слоя объясняется тем, что паяемая поверхность была неровной до пайки. При получении косого среза имевшиеся неровности выявились в увеличенном масштабе.

В отдельных случаях при пайке в процессе диффузии в шве образуются четко выраженные зоны. Это можно наблюдать при пайке таких легко растворяющихся в припое металлов, как титан, цирконий и др. В этом случае в центре паяного шва находится зона сплавления 1 (рис. 63), к которой примыкают диффузионные зоны 2 переменного состава. Если применяются чистые металлы, то состав зоны сплавления и диффузионных зон можно определить по двойным диаграммам состояния. Так, например, И. К. Скляр показав, что при контактно-реактивной пайке титана никелем при температуре 1100°C через 2 мин состав зоны сплавления соответствует равновесному ликвидусу системы. Он практически не зависит от времени выдержки и определяется по диаграмме состояния титан — никель точкой пересечения линии ликвидуса с горизонталью, соответствующей температуре пайки. На границе с диффузионной зоной состав сплава изменяется скачкообразно и определяется точкой пересечения линии солидуса с горизонталью температуры пайки. Диффузионная зона имеет переменный состав. Светлые полосы на границе диффузионных зон с титаном представляют твердый раствор никеля в титане.

Этот пример наглядно показывает, что скорости диффузии основного металла в припой очень большие. Согласно результатам, полученным с помощью микрорентгеновского анализатора в зоне сплавления через 2 мин вместо чистого никелевого покрытия образовался сплав титан — никель, содержащий 78% Ti и только 22% Ni.

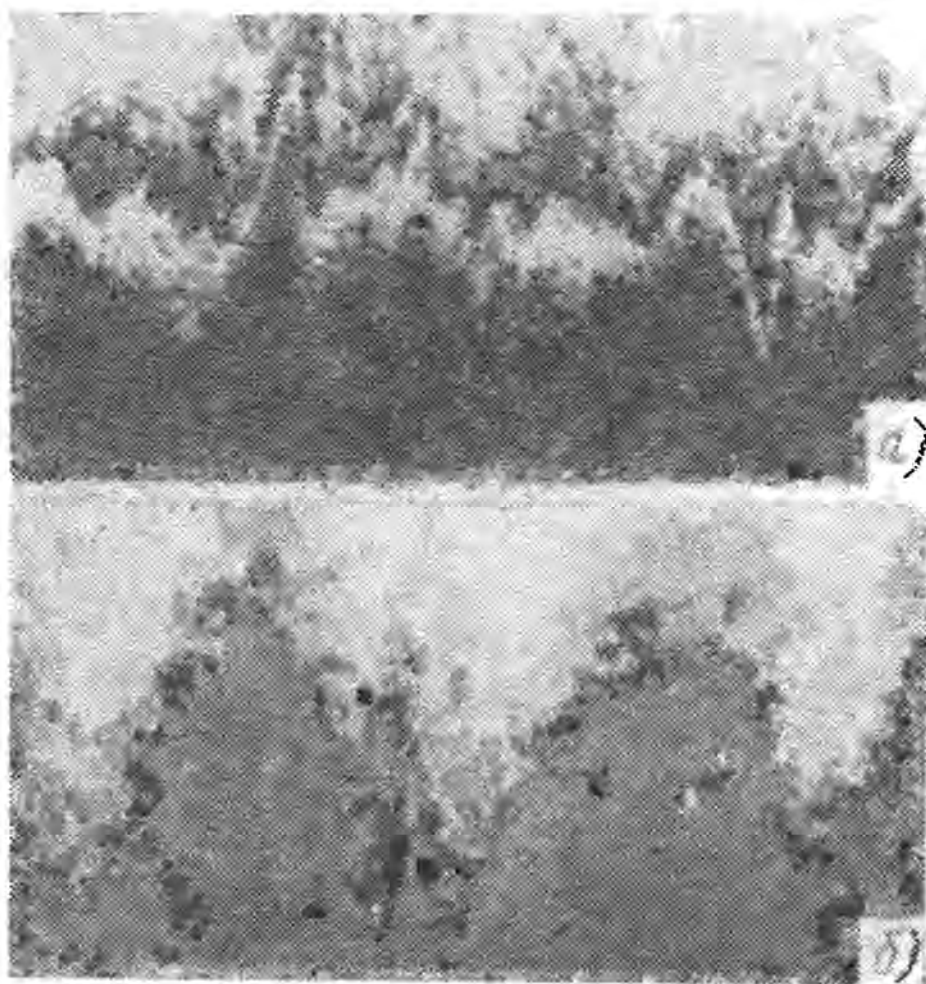


Рис. 62. Микроструктура шва при пайке меди оловом. Косой срез под углом 2° (по И. И. Ильевскому):

а — температура пайки 250°C , выдержка 5 сек; $\times 400$; б — температура пайки 350°C , выдержка 5 мин; $\times 500$

Аналогичное соответствие состава диффузионных зон диаграмме состояния взаимодействующих металлов наблюдается и при пайке титана медью.

Значение больших скоростей диффузии основного металла в расплавленный припой (растворение) можно наглядно иллюстрировать на примере пайки серебром палладия с нержавеющей

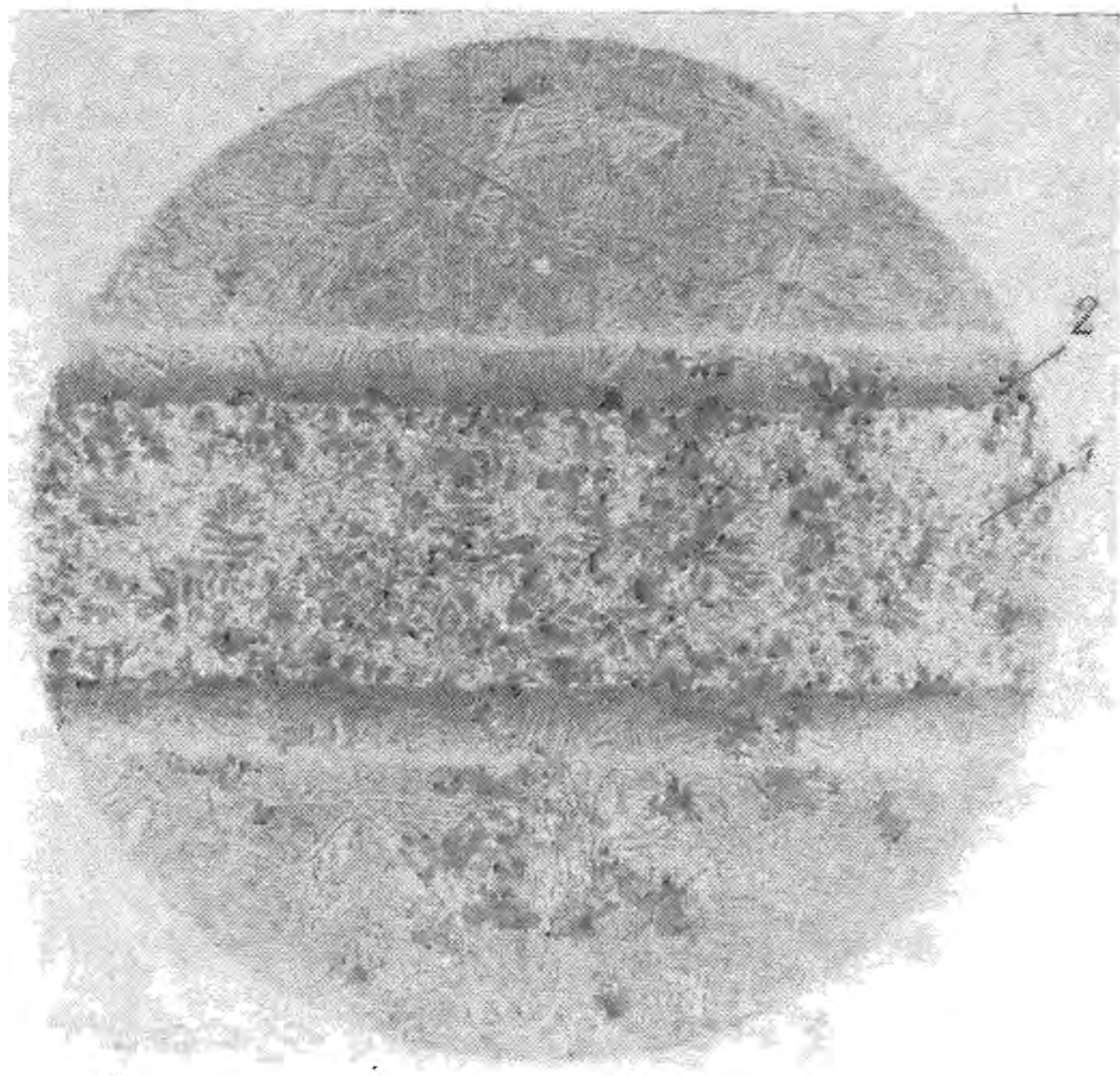


Рис. 63. Микроструктура шва при пайке титана никелем;
× 200

сталью, покрытой никелем (рис. 64). Согласно диаграмме состояния системы серебро — никель известно, что эти металлы не смешиваются между собой даже в жидком состоянии, следовательно, пайку никеля серебром практически осуществить невозможно.

Однако в рассматриваемом случае получено качественное соединение, что объясняется большой скоростью диффузии палладия в жидкое серебро в процессе пайки. Наличие палладия в жидком серебре создает условия, необходимые для смачивания расплавленным припоем никелевого покрытия. Учитывая, что прочность паяного соединения определяется прочностью отдельных зон паяного шва, необходимо в процессе пайки создавать такие условия, которые исключали бы возможность образования в шве хрупких интерметаллидов или, по крайней мере, способствовали

уменьшению их количества до допустимого предела. Так, например, при контактно-реактивной пайке титана никелем или медью в шве первоначально образуются хрупкие эвтектические сплавы, обладающие прочностью не выше $98,1 \text{ Мн/м}^2$ (10 кг/мм^2). За счет

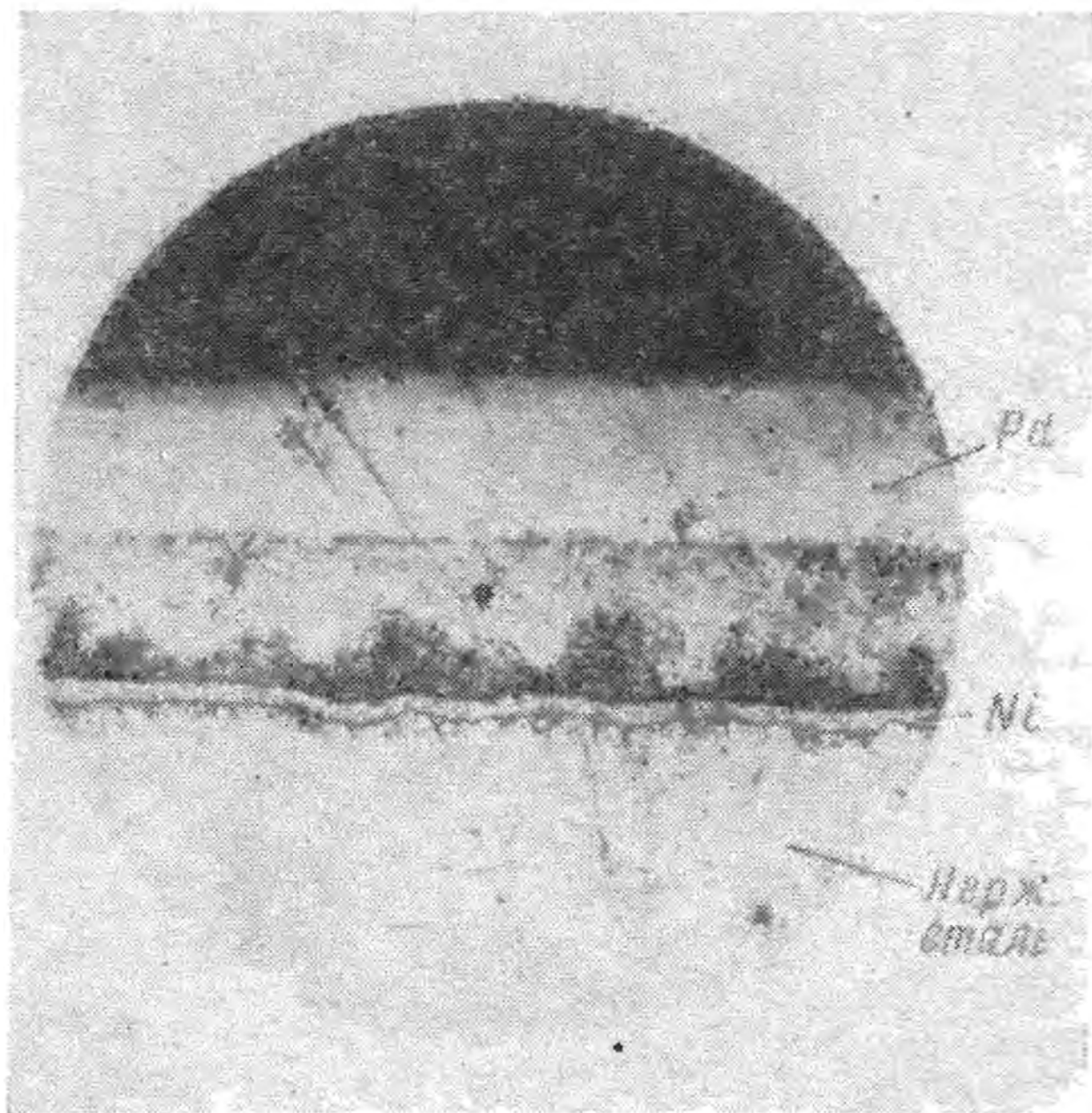


Рис. 64. Микроструктура шва при пайке серебром нержавеющей стали X18H9T с палладием (по Л. Л. Гржимальскому); $\times 100$

длительной выдержки при температуре пайки состав и структуру паяного шва можно существенно изменить, в результате чего содержание в шве никеля или меди снижается до 2—4%, а прочность паяного соединения возрастает до 686 Мн/м^2 (70 кг/мм^2).

§ 4. Процессы кристаллизации при пайке

Кристаллизация при пайке является сложным процессом и имеет ряд особенностей:

1. Кристаллизация протекает в узком соединительном зазоре при незначительной толщине прослойки жидкого металла.
2. При кристаллизации происходит взаимодействие между расплавленным припоем и твердым основным металлом, поверхности которых освобождены от окисных пленок.

3. При кристаллизации в капиллярном зазоре разделительная диффузия приводит к сильно выраженной зональной ликвации сплава в шве.

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

При температуре пайки в результате взаимодействия основного металла и расплавленного припоя в шве образуется сплав, отличающийся по составу и свойствам и от основного металла, и от припоя. Обычно он кристаллизуется в виде отдельных зон. При этом ближе к основному металлу образуются зоны, обогащенные компонентами основного металла, к центру шва — компонентами припоя. Это объясняется тем, что более тугоплавкая часть расплава в шве кристаллизуется в первую очередь на поверхности основного металла, оттесняя более легкоплавкую часть к центру шва.

В результате взаимодействия между основным металлом и припоем могут образоваться твердые растворы, эвтектики и интерметаллические соединения. Твердые растворы образуют металлы, имеющие общий тип кристаллической решетки и очень близкие значения межатомных расстояний. Если металлы, образующие сплав, сильно отличаются по строению атома или далеко отстоят друг от друга в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева, то они не образуют друг с другом твердых растворов. Твердый раствор является желательной структурой, так как при этом обеспечивается высокая прочность и пластичность паяного соединения. Скорость диффузии между припоем и паяемым металлом в процессе формирования шва определяется температурой, структурой основного металла, коэффициентами диффузии и другими факторами, а тип структуры образующейся при кристаллизации в паяном шве зависит от природы взаимодействующих металлов и определяется диаграммой состояния соответствующей системы.

Эвтектические структуры в паяных швах возникают при пайке припоями эвтектического состава или образуются в результате взаимодействия припоя с паяемым металлом. Эвтектические сплавы не имеют интервала кристаллизации, плавление и затвердевание их происходит при одной и той же температуре. Такие сплавы возникают, если сходство металлов недостаточно для образования твердого раствора с общей кристаллической решеткой, а разница в свойствах и строении невелика, чтобы образовать интерметаллиды. От интерметаллического соединения эвтектика отличается многофазностью и отсутствием стехиометрического состава. Припои эвтектического состава обладают высокой жидкотекучестью, и пайка с применением их протекает наиболее легко, однако прочность паяных швов при этом ниже, чем в случае твер-

дых растворов. В паяном шве в результате взаимодействия припоя эвтектического состава с основным металлом возможно образование промежуточных сплавов, имеющих прочность, среднюю между прочностью припоя и соединяемого металла.

Если в паяном шве образуются интерметаллические соединения между взаимодействующими металлами, то прочность шва при этом, как правило, будет ниже, так как интерметаллические соединения обычно имеют высокую хрупкость. Иногда они могут способствовать развитию в шве межкристаллитной коррозии. Интерметаллические соединения образуют металлы преимущественно в том случае, если они расположены в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева далеко друг от друга, а в параметрах их решеток и химических свойствах имеется большая разница. Интерметаллиды имеют свою особую пространственную решетку, на базе которой возможно создание ограниченных твердых растворов и эвтектик.

Согласно существующим взглядам расплавленный металл, находящийся при температурах, незначительно превышающих температуру плавления, имеет упорядоченную структуру, сохраняя в большей или меньшей степени расположение атомов, свойственное кристаллической решетке. Так как температура нагрева при пайке принимается на $30\text{—}50^\circ$ выше температуры плавления припоя, то структура паяного шва начинает формироваться уже при жидком состоянии сплава, образовавшегося при взаимодействии основного металла и припоя.

При прекращении нагрева начинается охлаждение паяемого изделия и кристаллизация металла шва. На размер первичного зерна влияют физико-химические свойства образовавшегося в шве сплава, а также температура пайки, скорость охлаждения, активность процессов диффузии, растворения и другие факторы.

Исследуя процессы кристаллизации, А. А. Бочвар нашел, что область между ликвидусом и солидусом сплава может быть разделена на две принципиально различные части: верхнюю часть, где образующиеся кристаллы отделены друг от друга жидкой прослойкой и, таким образом, сплав находится в жидко-твердом состоянии, и нижнюю часть, внутри которой первичные кристаллы образовали между собой жесткий каркас, в котором находится жидкая фаза. В этом твердо-жидком состоянии сплавы уже обладают способностью сохранять свою форму и имеют некоторую прочность. С момента появления связей между кристаллами сплав испытывает усадку, в нем могут возникать собственные (внутренние) напряжения.

С величиной интервала жидко-твердого состояния сплавов связаны такие свойства, как склонность к ликвации по плотности и способность течь в зазоре в начале кристаллизации.

Наиболее же важные свойства сплавов связаны с наличием температурного интервала твердо-жидкого состояния, поэтому

этот интервал назван эффективным интервалом кристаллизации. Коэффициент линейной усадки, величина усадочных напряжений, горячеломкость, склонность к прямой и обратной ликвации и другие свойства сплавов в значительной мере определяются величиной этого интервала.

Кристаллизация металла шва начинается в первую очередь на поверхности основного металла, кристаллиты которого являются готовыми центрами кристаллизации. Помимо этого, центры кристаллизации могут возникать в жидком металле шва. При протекании обоих этих процессов большую роль играет диффузия, которая обеспечивает перемещение частиц сплава, необходимых при формировании кристаллов.

В связи с ничтожным объемом находящегося в шве расплавленного припоя и контактом его с твердыми зернами основного металла, освобожденными от окисной пленки, при кристаллизации металла шва наиболее вероятно образование кристаллов на твердой поверхности основного металла или на твердых кристаллах основного металла, перешедших в расплав припоя в процессе пайки. При этом поверхность основного металла и твердые кристаллы основного металла, перешедшие в расплав припоя, являются затравкой, ускоряющей начало процесса кристаллизации в шве.

Кристаллизация на твердой поверхности происходит легче, если даже она не изоморфна с расплавленным

веществом [27]. В условиях же кристаллизации при пайке, когда компоненты твердого основного металла образуют с отдельными компонентами припоя общие фазы, ориентирующее действие твердых кристаллов основного металла на процесс кристаллизации металла шва будет определяющим. Имеющиеся экспериментальные данные подтверждают это положение. На рис. 65 приведена микроструктура паяного шва по границе основной металл—припой в случае пайки алюминия припоем системы алюминий—медь—кремний (34А), из которой можно видеть, что первичные зерна избыточного твердого раствора меди и кремния в алюминии кристаллизуются на зернах основного металла, достраивая и продолжая их.

В том случае, когда паяемый металл и припой взаимодействуют с образованием непрерывного ряда твердых растворов,



Рис. 65. Микроструктура шва по границе основной металл — припой при пайке алюминия припоем марки 34А; $\times 200$

кристаллизующийся в шве сплав настолько полно повторяет структуру основного металла, что кристаллиты припоя образуют как бы общие зерна с кристаллитами основного металла. Из рассмотрения рис. 59 видно, что границы зерен в шве представляют собой продолжение границ зерен основного металла.

В литературе по пайке металлов это явление обычно называют «совместной кристаллизацией». Однако этот термин не отражает существа процесса. Правильнее называть этот процесс ориентированной кристаллизацией. Рентгеноструктурными

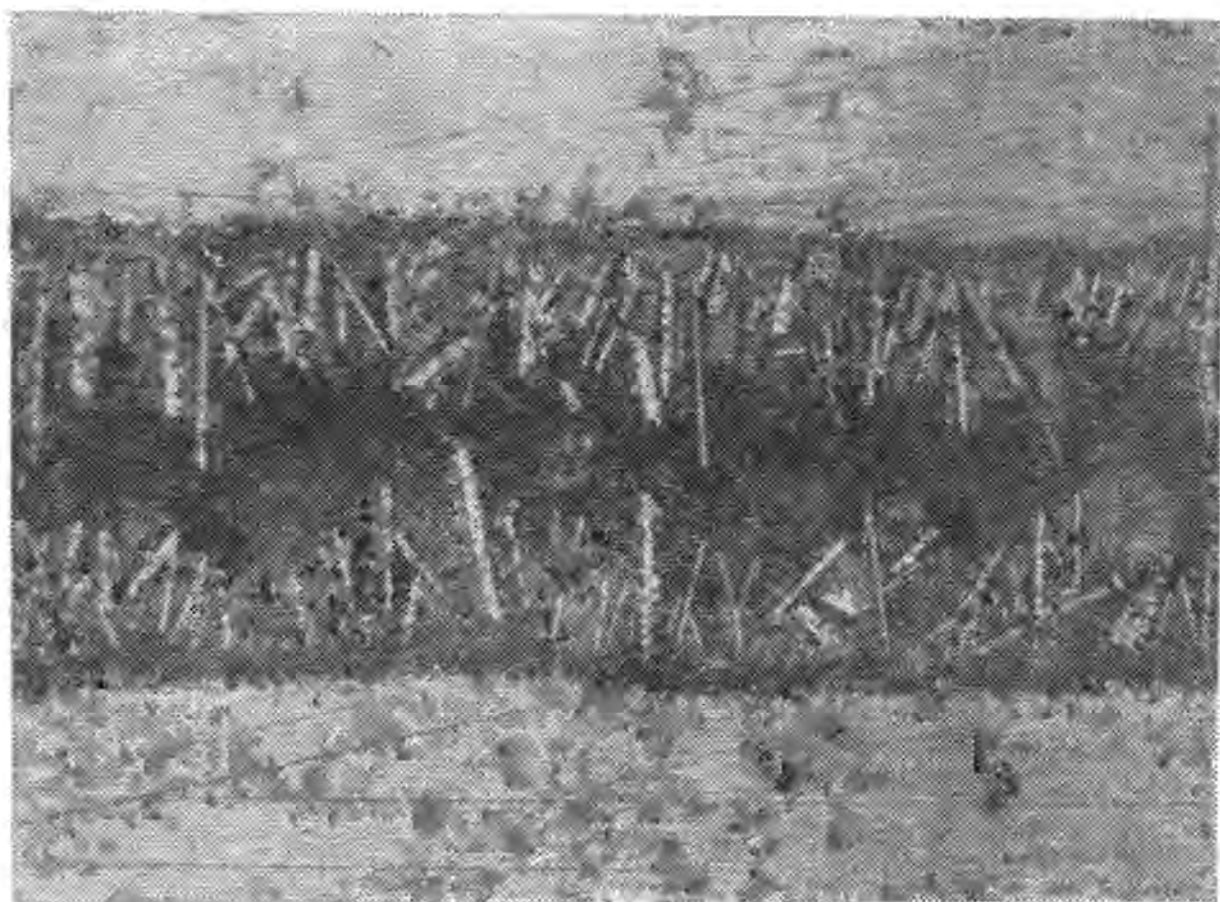


Рис. 66. Микроструктура шва при пайке никеля медью с добавкой 5% Ti (по А. С. Екатовой); $\times 400$

исследованиями, проведенными на кафедре металловедения им. А. М. Бочвара Московского института стали и сплавов показано, что кристаллическая решетка в зернах паяного шва полностью сохраняет ориентировку зерен основного металла не только в случае образования непрерывного ряда твердых растворов (пайка никеля медью), но и в случае сравнительно небольшой растворимости в твердом состоянии компонентов припоя и основного металла (пайка железа медью).

В процессе диффузионного взаимодействия и последующей кристаллизации в паяном шве могут также образоваться эвтектические структуры и интерметаллические соединения. Последние могут быть в виде одного или нескольких слоев по границе основной металл — припой или быть распределенными в шве в виде включений. Когда интерметаллиды распределены в шве, отрицательное влияние их на прочность паяного соединения сказывается меньше. На рис. 66 приведена микроструктура паяного шва при пайке никеля медью с добавкой 5% Ti, из которой можно

видеть, что интерметаллиды $NiTi$ и $CuTi$ в виде отдельных игл сравнительно равномерно распределены в зонах паяного шва, прилегающих к основному металлу.

В практике пайки известны случаи, когда припой и основной металл не дают заметных растворов ни в жидком, ни в твердом состоянии и не образуют интерметаллических соединений. Например, это наблюдается при пайке железа свинцом, серебром или кадмием, т. е. металлами, которые согласно диаграммам состояний не дают с железом растворов ни в жидком, ни в твердом состоянии и не вступают с ним в химическое взаимодействие. Однако несмотря на это, паяные швы обладают достаточной прочностью, что объясняется наличием адгезионных сил связи.

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

Таким образом, изменяя режим и условия пайки, можно существенно влиять на структуру и свойства паяных швов, а следовательно, и на качество паяных изделий [2, 3].

Г л а в а II

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ

§ 1. Соединения, применяемые в паяных изделиях

Паяным соединением называется элемент паяного изделия, включающий паяный шов и прилегающие к нему участки соединяемых металлов. Паяным швом называется прослойка металла между соединяемыми деталями, состоящая из зоны сплавления и диффузионных зон, величина которых зависит от состава припоя и паяемых материалов, а также от режимов пайки.

Прочность паяного соединения обычно определяется прочностью сплава, образующегося в шве в результате взаимодействия припоя с основным металлом, точнее — прочностью наиболее слабой зоны паяного шва, а также силами связи в контакте припой — основной металл. Так как прочность припоя и металла шва обычно ниже прочности основного металла, то для обеспечения равнопрочности паяного изделия увеличивается площадь шва. По этой причине основным соединением при пайке является нахлесточное, в противоположность сварке, где основным соединением является стыковое. При конструировании паяных изделий необходимо стремиться к тому, чтобы паяные соединения в конструкции были равнопрочны с наиболее слабым ее звеном.

В зависимости от вида конструкции и ее назначения пайка может применяться при соединении плоских элементов деталей; стержневых и трубчатых элементов деталей; криволинейных поверхностей элементов деталей между собой и с плоскими.

Конструкции паяных соединений в плоских элементах деталей являются наиболее простыми. Они включают в себя соединения внахлестку, ступенчатое, гребенчатое, косостыковое, стыковое и тавровое. Схемы этих соединений приведены на рис. 67.

Соединения внахлестку (рис. 67, а) являются наиболее распространенными в паяных конструкциях, так как позволяют изменением величины перекрытия деталей достигать равнопрочности паяного соединения. Величина нахлестки устанавливается рас-

четным путем в зависимости от прочности основного материала и припоя. Практически применяемая величина нахлестки 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 оловянно-свинцовыми 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

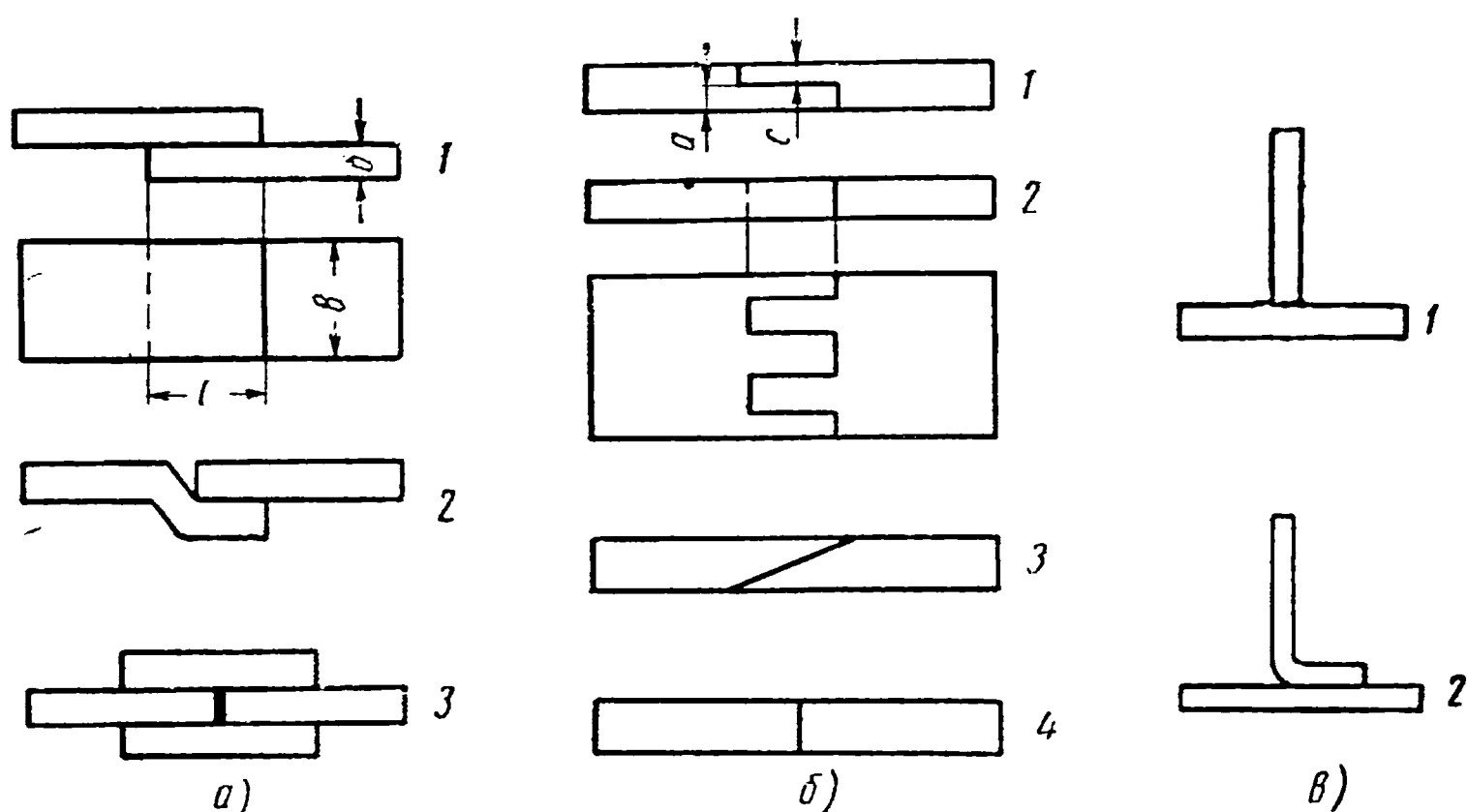


Рис. 67. Соединение плоских элементов деталей при пайке

(концевыми) участками паяного шва, а его средняя часть остается малонагруженной и может полноценно включиться в работу при большой нахлестке лишь после начала разрушения концевых участков паяного шва.

На рис. 67, а — 1 изображено простейшее нахлесточное соединение, образуемое простым перекрытием плоских элементов деталей. В тех случаях, когда с одной стороны соединение необходимо сохранить плоским, применяют нахлестку, изображенную на рис. 67, 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. 67, а — 3).

В тех изделиях, в которых необходимо сохранить толщину стенки неизменной или где применение обычного нахлесточного соединения невозможно, применяют ступенчатые, гребенчатые, косостыковые и стыковые паяные соединения (рис. 67, б).

Ступенчатые и гребенчатые соединения (рис. 67, б — 1 и 2), наряду с сохранением сечения соединяемых элементов деталей, обеспечивают высокую прочность, но требуют сложной подготовки кромок, поэтому применяются только в ответственных конструкциях.

При применении косостыковых соединений (рис. 67, б — 3) довольно трудно обеспечить плотное прилегание паяемых поверхностей, поэтому они применяются редко, обычно только при пайке ленточных пил. Косой стык следует делать под углом не более 30° , иначе площадь пайки будет мала и, следовательно, прочность соединения недостаточна.

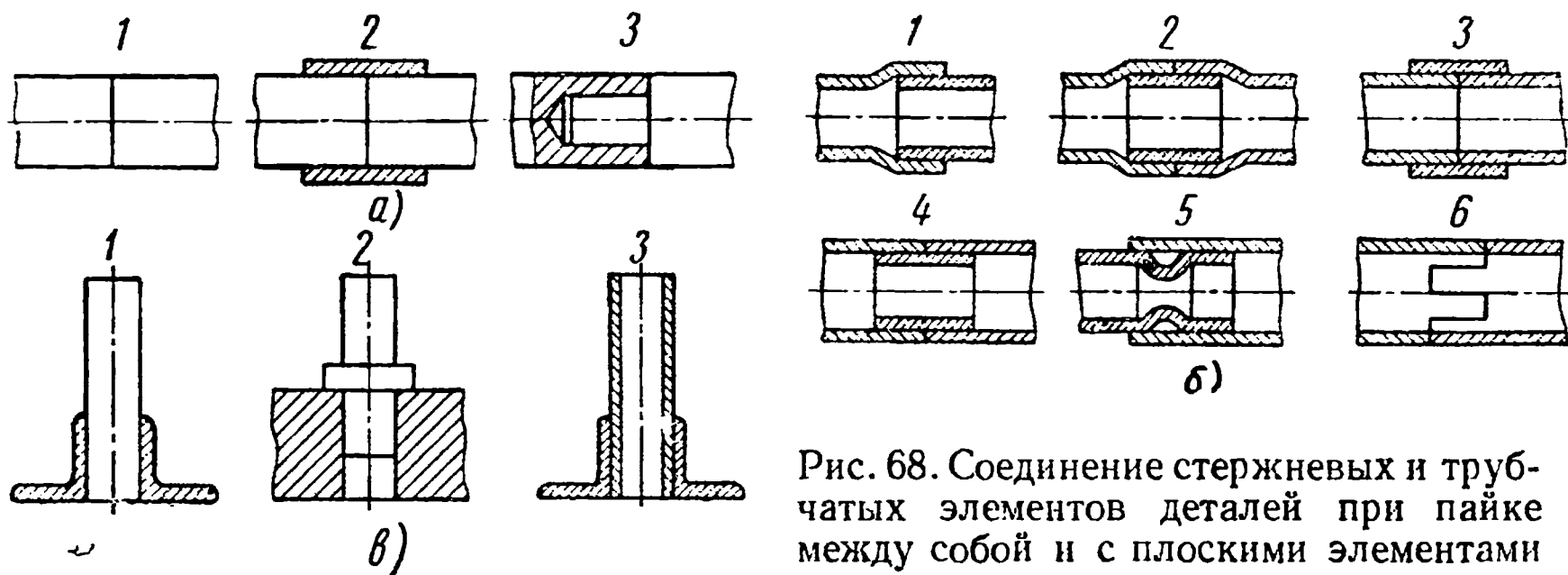


Рис. 68. Соединение стержневых и трубчатых элементов деталей при пайке между собой и с плоскими элементами

Стыковые соединения (рис. 67, б — 4) в паяных изделиях применяются мало, так как они лишь в редких случаях обеспечивают равнопрочность конструкции.

Соединения тавровые (рис. 67, в — 1) не характерны для паяных конструкций, но применение их иногда необходимо из соображений компоновки изделий. Более высокую прочность имеют тавровые соединения с подгибкой вертикального элемента, увеличивающей площадь паяного шва (рис. 67, в — 2).

Соединения стержней и труб между собой, соединения стержней и труб с фланцами, втулками, трубными досками и т. п. представлены на рис. 68.

При соединении стержней между собой (рис. 68, а) наиболее простым является применение охватывающей втулки (рис. 68, а — 2). Соединение стержней встык из-за недостаточной прочности применяется редко. Прочность стыкового соединения может быть увеличена сочетанием его со втулочным (рис. 68, а — 3).

При соединении труб (рис. 68, б) применение втулки также рационально. Для труб эта втулка может устанавливаться внутри в виде бужа, что позволяет наружное сечение трубы по шву сохранить неизменным (рис. 68, б — 4). Если нужно сохранить неизменным внутреннее сечение паяемого трубопровода, то применяют телескопическое соединение, получаемое путем развальцовки концов одной или обеих труб (рис. 68, б — 1 и 2). Во втором случае,

при соединении используется переходная втулка. Если необходимо сохранить и наружное, и внутреннее сечение трубы по месту соединения постоянным, то применяют пазовое соединение (гребенчатое; рис. 68, б — б). Однако это соединение в выполнении очень сложно, вызывает затруднения при сборке и пайке, поэтому применяется редко. Соединение, представленное на фиг. 68, 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 (рис. 68, в — 1, 2 и 3), втулками в значительной мере определяются конфигурацией изделия, но во всех случаях необходимо учитывать, что прочность паяных соеди-

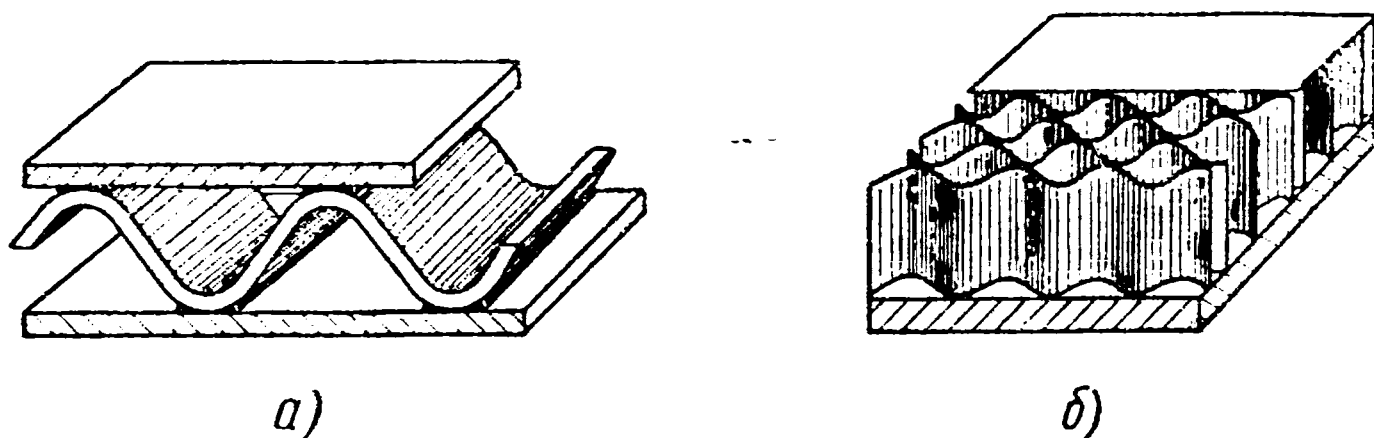


Рис. 69. Соединение криволинейных элементов при пайке между собой и с плоскими элементами

нений будет обеспечена только при наличии достаточной нахлестки. Размер площади поверхностей фланцев, втулок, трубных досок и т. п., контактирующих со стержнями и трубами, необходимо определять расчетным путем в соответствии с требуемой прочностью.

Соединения криволинейных поверхностей между собой и с плоскими нашли большое распространение в последние годы в связи с производством сотовых конструкций и паяных панелей с гофрированными проставками, которые широко используются в самолетостроении и для изготовления теплообменников. Схематичное изображение этих типов паяных соединений приведено на рис. 69. В первом примере (рис. 69, а) пайка плоских листов с гофрированной проставкой осуществляется по вершинам гофр. Во втором случае (рис. 69, б) пайка происходит в местах касания гофрированных лент, образующих сотовый заполнитель, между собой, а также в местах соединения торцов сотового заполнителя с листовой обшивкой. Встречаются также конструкции, в которых трубы соединяются между собой по образующей или припаиваются к плоским листам.

К паяным соединениям в зависимости от назначения изделия могут предъявляться, наряду с общими, специальные требования: по герметичности, электропроводности, коррозионной стойкости и т. д., которые также должны учитываться при выборе основного металла, припоя, способа пайки и при конструировании изделия.

§ 2. Особенности конструирования паяных изделий

При конструировании паяных изделий, наряду с выбором основного металла, производится выбор припоя и определяется способ пайки. Это связано с тем, что припой и способ пайки оказывают существенное влияние на выбор типа паяных соединений, величины зазоров, условий сборки и закрепления элементов изделия перед пайкой.

Как общее правило, при конструировании паяного изделия необходимо стремиться к уменьшению количества паяных соединений, если это не противоречит экономичности или другим соображениям. При этом соединения должны равномерно располагаться по изделию по возможности в менее нагруженных местах. Конструкция паяного изделия должна быть такой, чтобы предотвращать концентрацию напряжений, что достигается путем увеличения податливости отдельных ее элементов в процессе пайки. Основной металл выбирается в соответствии с условиями работы проектируемой конструкции и требованиями по прочности, герметичности, коррозионной стойкости и другим показателям. При этом первым условием выбора является паяемость основного металла припоями, обеспечивающими заданную прочность. При выборе необходимо обращать внимание также на чувствительность основного металла к нагреву и на склонность его к образованию трещин под действием расплавленных припоев.

При конструировании большое значение имеет правильный выбор припоя. Припой выбирается в зависимости от физико-химических свойств основного металла, условий прочности, технологии пайки и специальных требований по жаростойкости, коррозионной стойкости, электропроводности и т. п. Если пайка осуществляется ступенчато, то припой и температуры пайки должны быть выбраны так, чтобы при образовании последующих швов не произошло расплавление предыдущих.

При конструировании изделий из разнородных металлов необходимо прежде всего учитывать различие в коэффициентах их термического расширения, в противном случае в процессе пайки может произойти такое значительное изменение соединительных зазоров, что припой не заполнит их. Второй фактор, который следует учитывать при пайке разнородных металлов, состоит в том, что при некоторых сочетаниях 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 через молибденовое покрытие, нанесенное на титан, используют медные или серебряные припои. При пайке стали или меди с алюминиевыми сплавами при наличии на последних слоя 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. Выбор способа пайки производят, 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, при этом необходимо учитывать особенности различных способов нагрева. Так, например, при пайке с местным нагревом стабильность качества будет ниже, возможно коробление изделия, выгорание легкоплавких составляющих припоя и пережог основного металла.

При применении общего нагрева в печах, соляных ваннах, в расплавах припоев и другими способами 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 применении индукционного нагрева основное требование к конструкции деталей состоит в том, чтобы обеспечить возможность установки индуктора 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 применяемого нагрева очень часто связан способ удаления окисной пленки в процессе пайки. Местному нагреву обычно сопутствует применение флюсов. Общий нагрев в печах чаще осуществляется с применением нейтральных или активных газовых сред. Если к изделию предъявляются высокие требования по коррозионной стойкости, пайку желательно производить без применения флюсов. Если же это выполнить невозможно, необходимо выбирать конструкционные материалы, обладающие высокой 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.

Наряду с правильным выбором основного металла, припоя и способа пайки, одним из основных условий конструирования паяных изделий является обеспечение в соединении капиллярного зазора и создание условий течения припоя в нем. Это требует по сравнению со сваркой более точной механической обработки и сборки под пайку. Зазор под пайку назначается в зависимости 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 можно назначать зазор. Если в процессе пайки происходит активное растворение основного металла расплавленным припоем, то зазоры должны предусматриваться большими, так как припой в этих случаях повышают температуру плавления и растекаются хуже. Например, в случае пайки 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 почти не растворяют стали при температуре пайки, и для обеспечения условий капиллярного течения и получения высокой прочности паяного шва в этом случае необходимо применять малые зазоры. На выбор величины зазора большое влияние оказывают условия удаления окисной пленки в процессе пайки. При малом зазоре флюс, насыщающийся при пайке окислами, не вытекает из зазора и его остатки препятствуют затеканию припоя. С другой стороны, при увеличении зазора ухудшаются условия течения припоев под действием капиллярных сил. Величина зазора в производственных условиях, как правило, определяется на основе экспериментальных данных. Оптимальные значения зазоров, применяемых при пайке некоторых металлов и сплавов, приведены в табл. 34.

Таблица 34

Основной металл	Припой	Величина зазора в мм
Углеродистые стали	Медь	0,02—0,15
»	Латунь	0,05—0,30
»	Серебряные припои	0,05—0,15
Нержавеющие стали	Медь	0,02—0,15
»	Латунь	0,05—0,30
»	Серебряные припои	0,05—0,15
»	Никеле-хромовые припои	0,05—0,20
Медь и медные сплавы	Медно-цинковые припои	0,10—0,30
То же	Медно-фосфористые припои	0,02—0,15
»	Серебряные припои	0,03—0,15
Титан	Серебро	0,05—0,10
»	Серебряно-марганцовые припои	0,05—0,10
Алюминий	Припой на алюминиевой основе	0,10—0,30

При конструировании следует иметь в виду, что с увеличением зазора выше определенного значения, прочность паяного соединения уменьшается, поэтому основное внимание необходимо обращать на обеспечение оптимальной величины зазора в соединениях, испытывающих большие нагрузки при работе конструкции. При назначении зазоров, наряду с соображениями прочности, выступают также вопросы экономичности. Увеличенные зазоры ведут к излишнему расходу припоя, что экономически невыгодно, с другой стороны, назначение более жестких зазоров требует более точной механической обработки и сборки под пайку. При решении этих вопросов необходимо исходить в каждом конкретном случае из требований к изделию, условий производства и экономичности.

Для сохранения зазора равномерным необходимо при конструировании так располагать элементы изделия и выбирать такие материалы, 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. Определение оптимального зазора в этом случае производится 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 делать в деталях специальные отверстия (сверления).

При конструировании паяных изделий из разнородных материалов следует иметь в виду, что различие в коэффициентах термического расширения приведет при охлаждении к возникновению в зоне паяного шва внутренних напряжений. Напряжения эти будут тем выше, чем больше отличаются друг от друга коэффициенты термического расширения соединяемых материалов. Если не учитывать это и не принимать специальных мер с целью уменьшения внутренних напряжений, то последние могут вызывать деформации в паяемом изделии и даже местные разрушения.

Ввиду более равномерного нагрева 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 имеются соединения труб с фланцами, последние должны иметь бóльшую, чем у трубы, толщину стенки. Это обеспечивает жесткость соединения. С этой же целью при пайке тонкостенных сосудов толщина стенки обечайки делается несколько большей, чем толщина днищ. Во всех случаях элементам паяного соедине-

ния конструктивно нужно придавать такую форму, которая обеспечивала бы достаточную жесткость. Для равнопрочности конструкции паяные швы не должны располагаться в местах переходов. Сечения соединяемых элементов по возможности должны быть приблизительно одинаковыми. В связи с возможностью коробления в процессе пайки при изготовлении деталей высокой точности, окончательную механическую обработку необходимо производить после пайки.

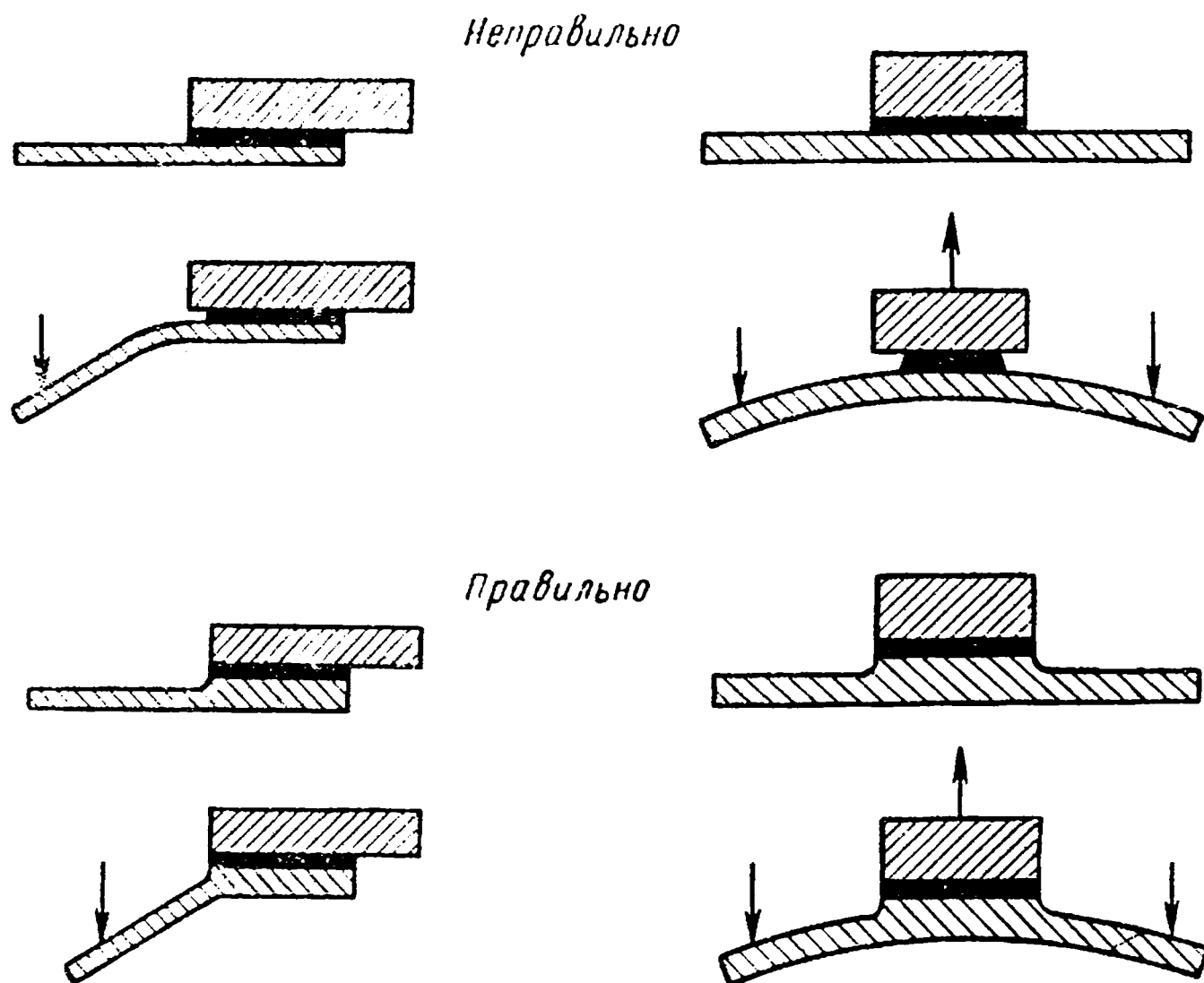


Рис. 70. Примеры неправильной и правильной конструкции паяных соединений из элементов разной толщины

При конструировании паяных соединений из элементов разной толщины необходимо учитывать возможность концентрации напряжений при работе изделия. В приведенных на рис. 70 примерах показана неправильная и правильная конструкции соединения при указанных стрелками направлениях 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 будет снижена.

При конструировании паяного изделия необходимо предусмотреть условия закрепления элементов изделия в процессе пайки. Это особенно важно при групповой пайке изделий сложной конфигурации. Отдельные части паяного изделия перед пайкой могут

закрепляться путем связывания нихромовой проволокой, при помощи зажимов, подставок, сваркой, соответствующей механической обработкой соединяемых элементов конструкции и т. д. Некоторые способы закрепления, предусматриваемые при конструировании паяных изделий, приведены на рис. 71. Наиболее 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.

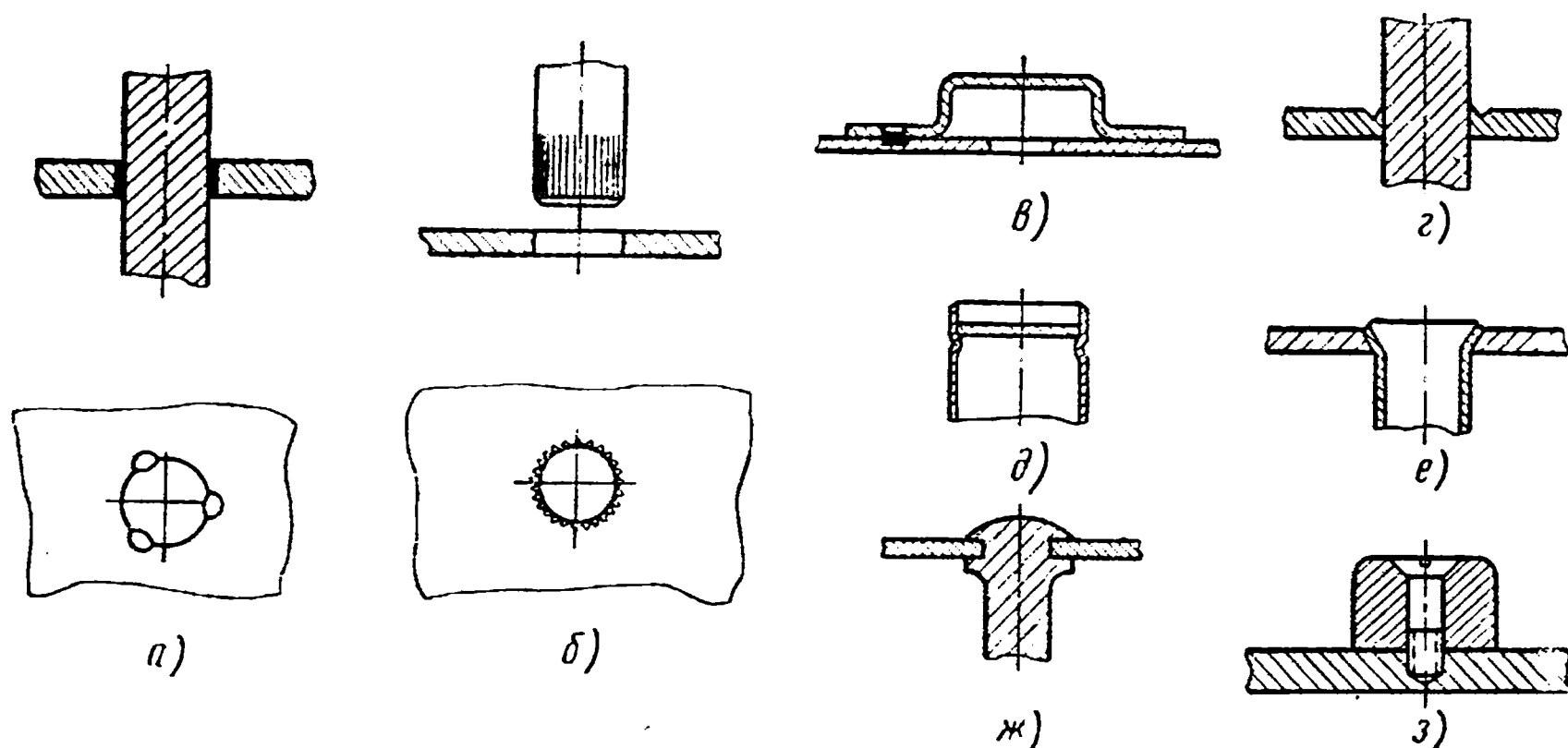


Рис. 71. Способы закрепления элементов изделия при сборке и пайке:

а — кернение тремя точками; б — накатка; в — точечная сварка; г — кернение по контуру; д — отбортовка; е — развальцовка; ж — крепление расклепыванием; з — крепление винтом

Припой применяются 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 изготавливаются кольца или шайбы, которые помещают в зазор, в специально подготовленные канавки или снаружи шва. Слой припоя может предварительно наноситься на паяемый металл плакированием, гальванически или металлизацией. Во всех случаях при размещении припоя необходимо стремиться к тому, чтобы наряду с силами капиллярного течения для заполнения зазора использовалось также действие силы тяжести. Способы рационального размещения припоев при пайке изделий, собранных из элементов, полученных токарной обработкой и штамповкой, приведены соответственно на рис. 72 и 73 [20]. Наружное размещение припоя является более простым, но оно не всегда обеспечивает хорошее заполнение зазора, так как припой может растечься по более нагретой поверхности одной из соединяемых деталей, не затекая в зазор. Во избежание этого необходимо обеспечивать равномерный нагрев соединяемых деталей. Внутреннее

расположение припоя, когда он помещается между соединяемыми деталями в специальные выточки или выштампованные каналы, не имеет указанных недостатков и гарантирует более качественное заполнение зазоров.

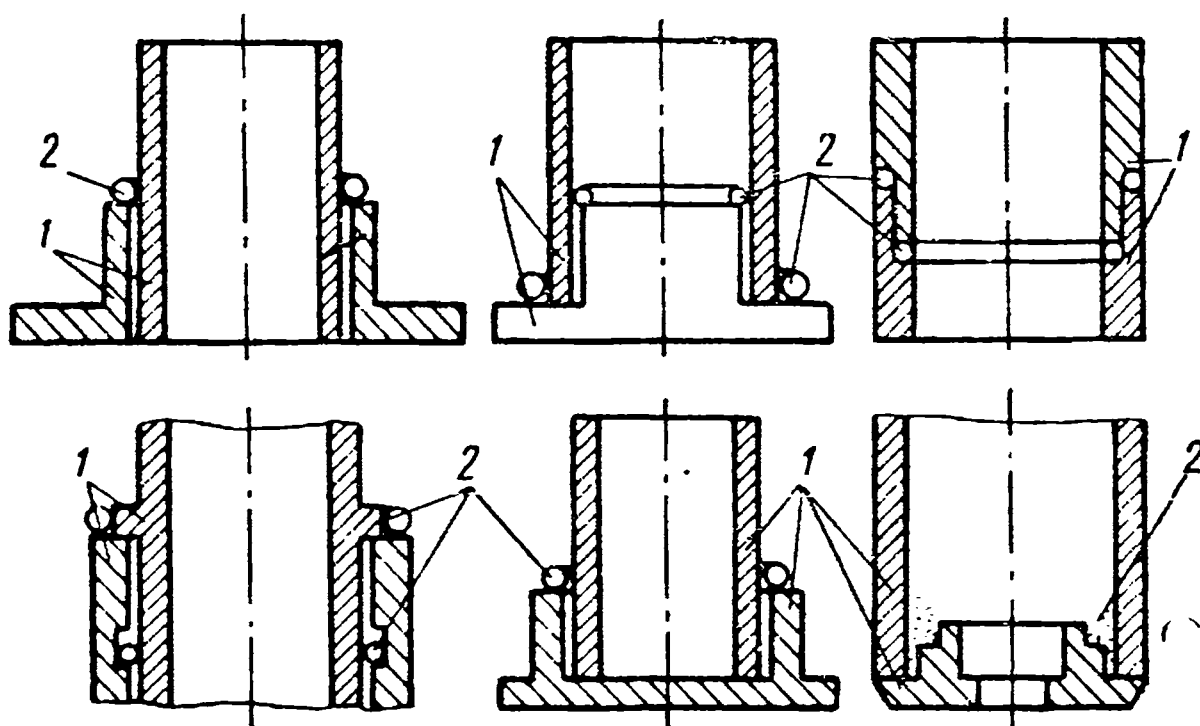


Рис. 72. Способы размещения припоя в соединениях, собранных из деталей, полученных токарной обработкой:

1 — соединяемые детали; 2 — припой

Особенности конструирования паяных изделий неразрывно связаны с технологией пайки. Как при общем, так и при местном нагреве зона шва должна равномерно нагреваться до темпера-

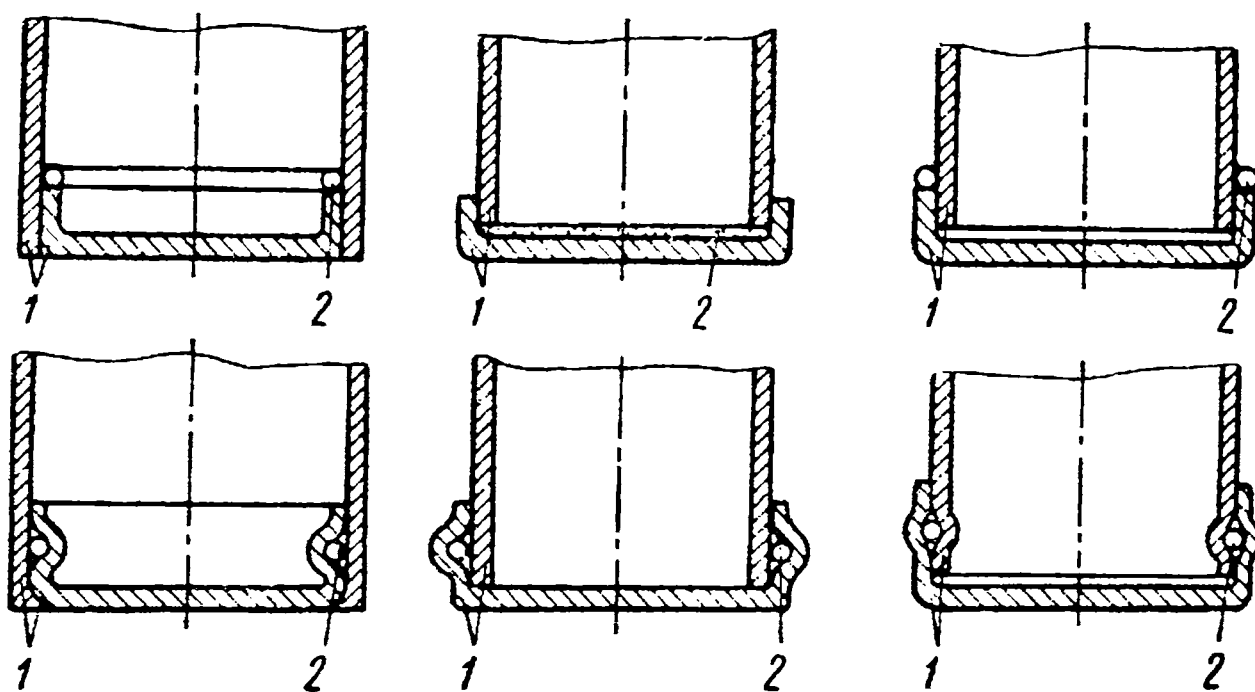


Рис. 73. Способы размещения припоя в соединениях из штампованных деталей:

1 — соединяемые детали; 2 — припой

туры пайки. Это обеспечивает сохранение заданного зазора по всему шву, что, в свою очередь, способствует равномерному течению флюса и припоя. Соблюдение 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. Общая характеристика прочности паяных изделий

Прочность паяных соединений зависит от прочности применяемых припоев, правильности выбора их в зависимости от физико-химических свойств основного металла, а также от величины зазора, способа и режимов пайки. Выбор припоя производится в первую очередь на основе показателей прочности и коррозионной стойкости, выполненных с применением его паяных швов. Основным признаком пригодности припоя является способность его взаимодействовать с паяемым металлом без образования хрупких фаз.

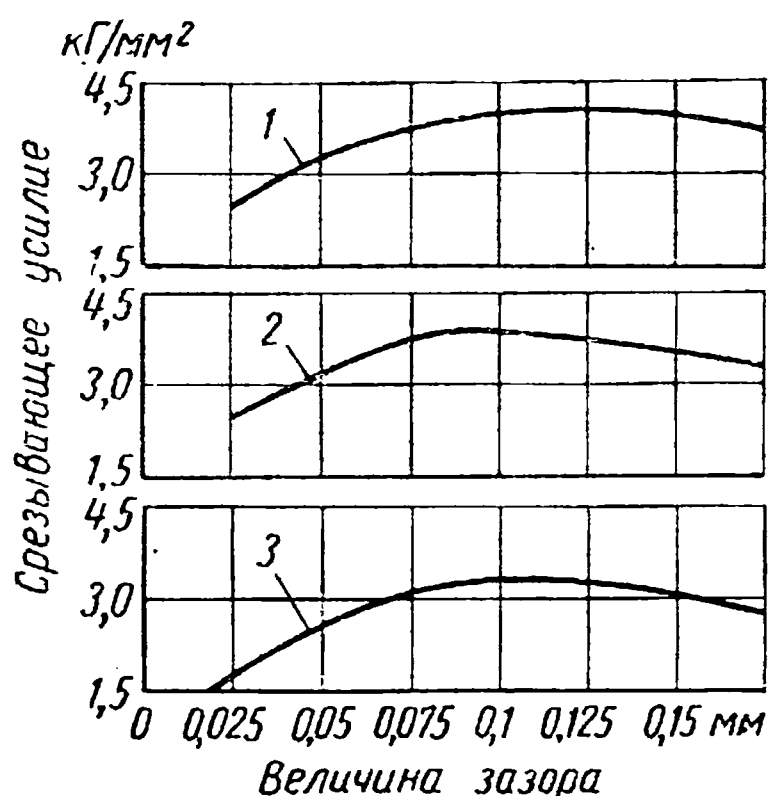


Рис. 74. Влияние величины зазора на прочность соединения, паянного припоями системы Sn—Pb:

1 — медь; 2 — латунь; 3 — низкоуглеродистая сталь

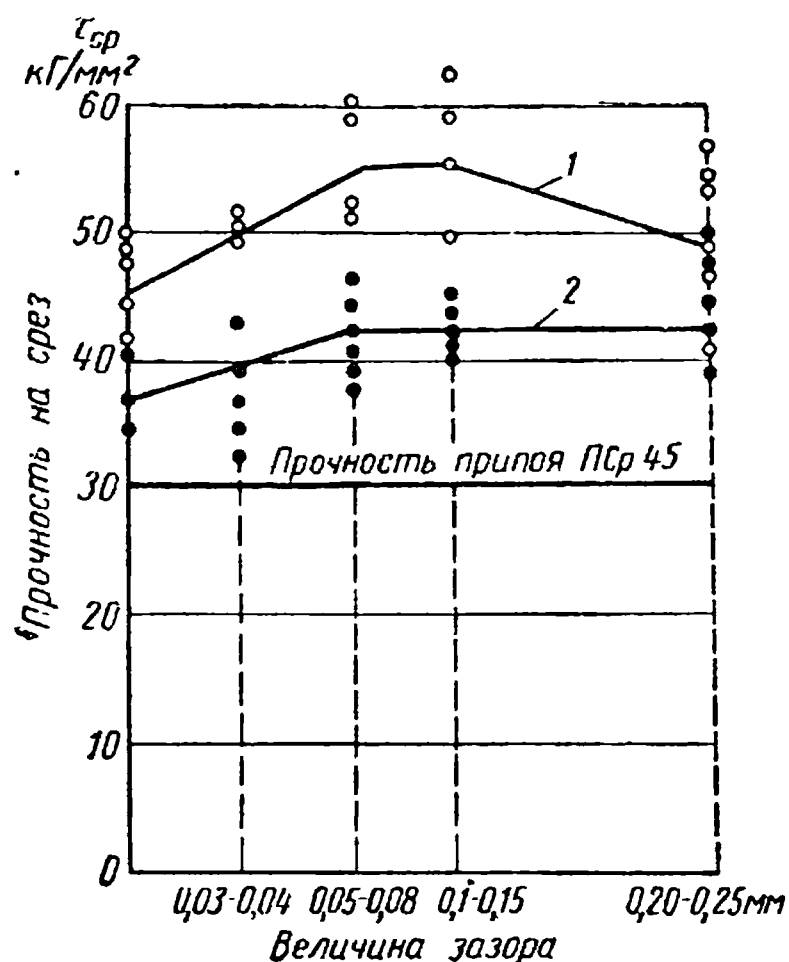


Рис. 75. Зависимость прочности паяного соединения от величины зазора:

1 — сталь 45; 2 — Ст. 3

На прочность паяных соединений большое влияние оказывает величина зазора. При увеличенных зазорах припой в шве находится в литом состоянии и, следовательно, прочность соединения будет лимитироваться прочностью литого припоя. Кроме того, капиллярное течение припоя в процессе пайки может прекратиться и заполнения шва по всей площади не произойдет. При слишком малых зазорах также может не быть затекания припоя, в результате чего нарушится сплошность шва и механические свойства паяного соединения снизятся. Сказанное подтверждается кривыми, приведенными на рис. 74, из которых видно, что максимальная прочность имеет место при зазорах порядка 0,1 мм.

На рис. 75 представлена зависимость прочности от величины зазора телескопических соединений, паянных серебряным припоем. Как можно видеть из кривых, максимальная прочность при пайке сталей имеет место при зазорах 0,05—0,15 мм, что объяс-

няется хорошим заполнением зазора и образованием в нем в процессе пайки сплава, более прочного, чем применяемый в этом случае припой ПСр 45 [6].

Из анализа приведенных кривых и по литературным данным можно сделать вывод, что прочность паяного соединения находится в прямой зависимости от прочности паяемых сталей. При одном и том же припое прочность паяных соединений, как правило, получается тем выше, чем прочнее паяемая сталь. Из рис. 75 можно также видеть, что прочность паяных швов значительно выше прочности припоя. Это объясняется тем, что в процессе пайки при-

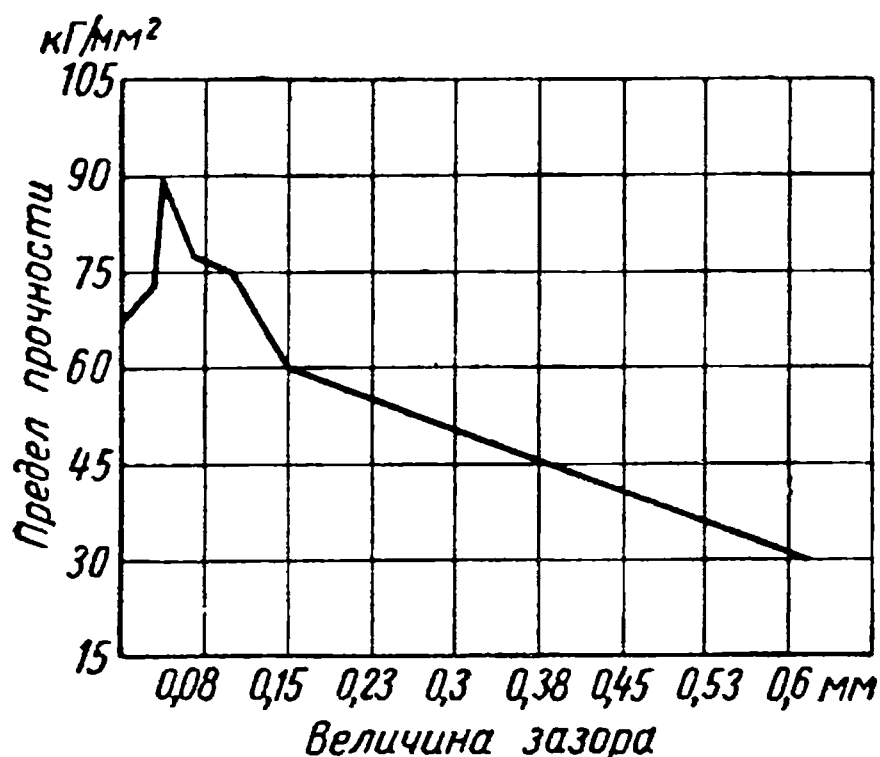


Рис. 76. Зависимость прочности от величины зазора при пайке нержавеющей сталей припоем системы серебро—медь—цинк—кадмий

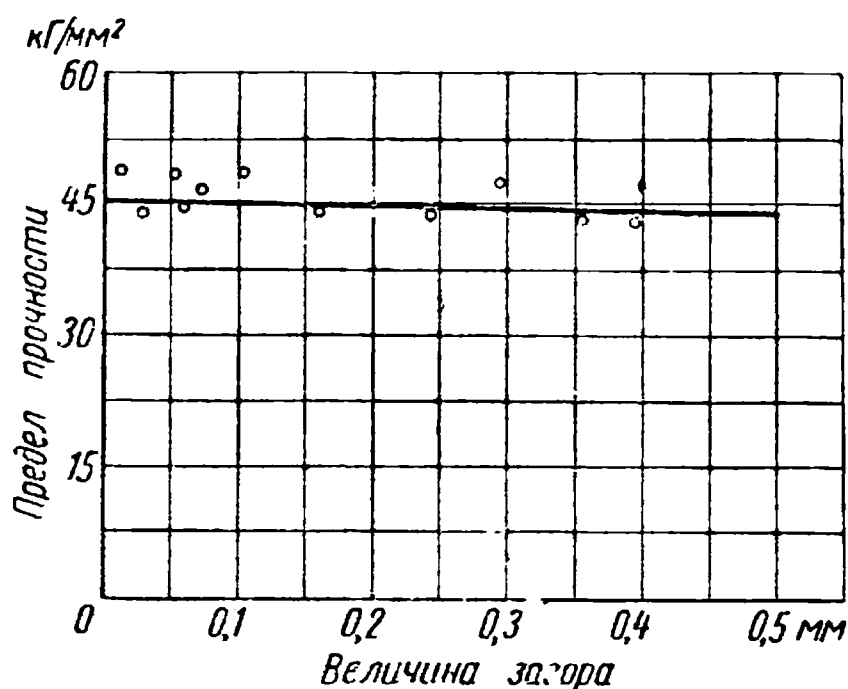


Рис. 77. Зависимость прочности от величины зазора при пайке низкоуглеродистых сталей припоем системы серебро—медь—цинк—кадмий

пой довольно быстро растворяет основной металл и, насыщаясь им, повышает свою прочность.

Иногда на кривых зависимости прочности паяных соединений от величины соединительного зазора наблюдается резкий скачок прочности (рис. 76), например при пайке нержавеющей сталей припоем системы серебро — медь — цинк — кадмий. С другой стороны, при пайке тем же припоем низкоуглеродистых сталей наблюдается совершенно иная картина, когда величина зазора практически не влияет на прочность (рис. 77) [7]. Это объясняется тем, что в случае пайки низкоуглеродистых сталей прочность основного металла и припоя имеет близкие значения и при испытании паяного соединения происходит одновременная и сравнительно равномерная деформация и основного металла, и припоя. Кроме того, диффузия между припоем и основным металлом в процессе пайки незначительна, поэтому по центру шва независимо от зазора припой остается в литом состоянии. В случае же пайки нержавеющей сталей различие в свойствах основного металла и припоя более резкое, поэтому соединительный зазор может оказывать такое решающее влияние на прочность паяного соединения.

На прочность паяных соединений большое влияние оказывает применяемая технология пайки. Так, прочность в сильной степени изменяется в зависимости от чистоты подготовки поверхностей под пайку, точности сборки и полноты удаления окисной пленки в процессе флюсования. Чем тщательнее проведена подготовка

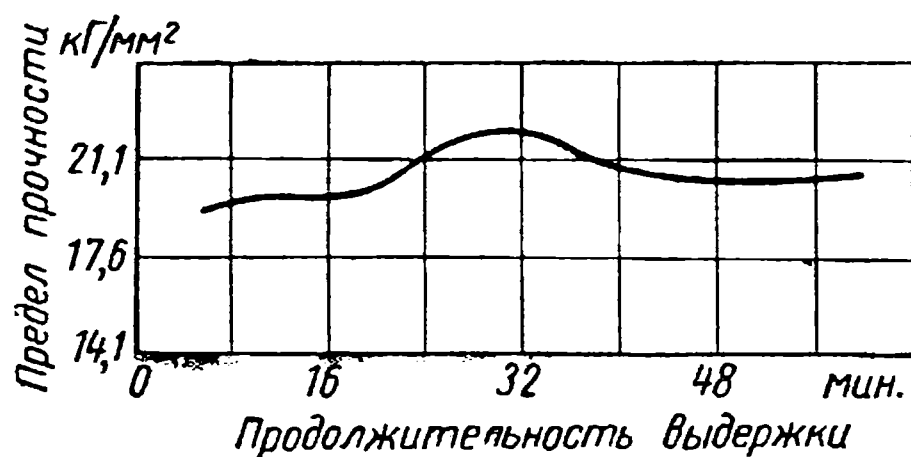


Рис. 78. Зависимость предела прочности стальных образцов, паянных медью, от выдержки при температуре пайки

под пайку, тем стабильнее и выше будет качество паяных соединений. Время выдержки при пайке также оказывает значительное влияние на прочность паяного соединения. Увеличение времени выдержки до определенного предела приводит к повышению прочности, после чего дальнейшее увеличение выдержки ведет к снижению прочности. Например, при

пайке стали X18H9T серебряным припоем ПСр 40 с применением индукционного нагрева при выдержке около 0,5 мин предел прочности на срез не превышает 167 Мн/м^2 (17 кг/мм^2). При более длительной выдержке прочность достигает 314 Мн/м^2 (32 кг/мм^2). На рис. 78 приведена кривая изменения предела прочности паяного соединения на разрыв в зависимости от времени выдержки при пайке низкоуглеродистой стали медью в печи с восстановительной атмосферой. Из кривой можно видеть, что максимальная прочность имеет место при выдержке около 30 мин.

Данные по прочности соединений, паянных серебряными припоями, приведены в табл. 35.

При повышении температуры прочность соединений, паянных серебряными припоями, заметно снижается, поэтому, если изделие работает при нагреве выше $300\text{—}400^\circ \text{C}$, то можно применять только припой, легированные марганцем и никелем, например ПСр 37,5. Значения предела прочности на срез в Мн/м^2 (кг/мм^2) при повышенных температурах, полученные при испытании соединений внахлестку, приведены в табл. 36.

Таблица 35

Основной металл	Прочность на срез в Мн/м^2 (кг/мм^2)		
	ПСр40	ПСр45	ПСр25КН
X18H9T	235—284 (24—29)	176—254 (18—26)	186—235 (19—24)
40ХНМА	324—451 (33—46)	—	—
30ХГСА	343—451 (35—46)	343—402 (35—41)	343—422 (35—43)
Медь	>245 (>25)	>245 (>25)	>245 (>25)

Марка припоя	Основной металл	Предел прочности в MH/m^2 ($кГ/мм^2$) при $^{\circ}C$			
		200	300	400	600
ПСр 45	X18H9T	—	157—235 (16—24)	142—147 (14,5—15)	29,4—39,2 (3—4)
ПСр 40	ЭИ654	216—314 (22—32)	147—167 (15—17)	49—88 (5—9)	—
ПСр 37,5	X18H9T	—	304—344 (31—35)	—	108—177 (11—18)
ПСр 25KH	ЭИ654	265—324 (27—33)	118—186 (12—19)	59—108 (6—11)	—

Значения предела прочности на срез в MH/m^2 ($кГ/мм^2$) соединений, паянных жаропрочными припоями на основе меди при различных температурах испытания, приведены в табл. 37 [14].

Таблица 37

Марка припоя	Основной металл	Предел прочности в MH/m^2 ($кГ/мм^2$) при температуре в $^{\circ}C$					
		—60	20	200	400	500	600
ВПр1	X18H9T	422—568 (43—58)	362—490 (37—50)	294—392 (30—40)	186—216 (19—22) $E_{\frac{1}{2}}$	—	88—157 (9—16)
ВПр1	CH-2	245—294 (25—30)	206—294 (21—30)	196—294 (20—30)	186—235 (19—24)	117—196 (12—20)	—
ВПр1	CH-3	186—216 (19—22)	206—245 (21—25)	186—225 (19—23)	206—245 (21—25)	88—127 (9—13)	—

Как можно видеть из табл. 37, жаропрочные припои на медной основе могут работать до температур порядка $600^{\circ}C$. Жаропрочные припои на никелевой основе сохраняют достаточную прочность до более высоких температур. Например, припой № 20 может работать в конструкциях до температуры $900^{\circ}C$. Если при $700^{\circ}C$ припой ВПр1 при пайке нержавеющей сталей обеспечивает прочность не выше $98,0 MH/m^2$ ($10 кГ/мм^2$), то припой № 20 — до $235 MH/m^2$ ($24 кГ/мм^2$). Довольно высокая прочность и пластичность припоя № 20 объясняется тем, что его состав по основным компонентам — никелю, хрому и марганцу — не выходит за пределы области твердого раствора.

Предел прочности соединений, паянных оловянно-свинцовыми припоями, составляет 49—68,5 Мн/м² (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 в Мн/м² (кг/мм²) соединений, паянных оловянно-свинцовым припоем ПОС 40, приведены в табл. 38.

Таблица 38

Основной металл	Предел прочности в Мн/м ² (кг/мм ²) при температуре испытания в °С					
	—196	—183	—96	—60	+20	+85
Медь М3	34,2 (3,5)	32,4 (3,3)	33,4 (3,4)	34,3 (3,5)	26,5 (2,7)	15,7 (1,6)
Латунь Л62	28,4 (2,9)	28,4 (2,9)	30,4 (3,1)	26,5 (2,7)	21,6 (2,2)	13,7 (1,4)
Сталь 20	59 (6,0)	54 (5,5)	54 (5,5)	50 (5,1)	27,4 (2,8)	21,6 (2,2)
Сталь Х18Н9Т	29,4 (3,0)	33,3 (3,4)	29,4 (3,0)	49 (5,0)	31,4 (3,2)	19,6 (2,0)

В процессе пайки возможно проникновение жидкого припоя между кристаллами по границам зерен основного металла, что приводит к снижению прочности и способствует хрупкому разрушению паяных соединений. В некоторых случаях, например, при пайке сталей латунию, образование межкристаллитных трещин в паяных швах заставило ограничить применение латунных припоев.

Разрушение или понижение прочности металла в контакте с расплавленными припоями происходит в результате нескольких причин. Основной из них является проникновение припоя по границам зерен и в микротрещины паяемого металла, находящегося под напряжением. Большую роль играет смачивание жидким припоем основного металла, следствием чего является уменьшение его поверхностной энергии. Образование между припоем и паяемым металлом сплавов, обладающих иногда пониженной прочностью, также служит причиной хрупкого разрушения паяных соединений. Появление трещин при наличии контакта с расплавленным припоем наиболее вероятно, когда основной металл находится в напряженном состоянии. Так, для медных сплавов межкристаллитное проникновение припоев наблюдается часто в деформированном состоянии, в отожженном же состоянии этого, как правило, не бывает.

Для сталей и никелевых сплавов межкристаллитное разрушение более вероятно в том случае, когда они образуют с расплавленным припоем легкоплавкие сплавы. При этом склонность к образованию трещин возрастает в случае наличия растягивающих напряжений, при неравномерном нагреве, при увеличении скорости и продолжительности нагрева. Основным компонентом, вызывающим охрупчивание соединений, паянных серебряными и медно-никелевыми припоями, является медь; причем охрупчивание возрастает с увеличением содержания меди в припое. Поэтому в припой на серебряной и никелевой основе, применяемые для изделий, работающих при высоких температурах, не следует вводить медь.

Склонность металлов к хрупкому разрушению при наличии контакта 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 происходит 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 наносить на соединяемые детали 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 ее наиболее слабого элемента. Таким элементом, как правило, является паяный шов, так как прочность припоя в литом состоянии обычно ниже прочности основного металла. Поэтому при конструировании необходимо выбирать такой тип соединения и так его располагать, чтобы обеспечить равнопрочность всего изделия. Это можно достигнуть только при правильном сочетании материалов, технологии пайки и соответствующем конструировании. Прочность паяного соединения при одном и том же основном металле и припое можно регулировать величиной перекрытия соединяемых элементов, т. е. изменением площади шва. Если недостаточная 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 и реактивная, которые обеспечивают более высокие свойства паяных соединений. При назначении зазоров следует иметь в виду, что различные сочетания основного материала и припоя по-разному влияют на прочность паяного соединения.

Вопросы прочности паяных соединений в настоящее время разработаны недостаточно, поэтому при проектировании паяных конструкций и расчете их на прочность часто бывает необходимо проводить экспериментальную проверку влияния на прочность того или иного сочетания основной металл — припой, величины соединительного зазора, способа и режима пайки. В отдельных случаях необходимо проводить испытания на макетных образцах, имитирующих изделие.

В сварных швах наиболее слабым участком шва является не наплавленный металл, а прилегающие к нему зоны термического влияния. При пайке, в случае общего нагрева зоны термического влияния отсутствуют. Если применяется местный нагрев, то основной материал, прилегающий к паяному шву, будет несколько ослаблен. Однако это ослабление в связи с рассредоточенным нагревом будет менее значительным, чем при сварке, и не оказывает существенного влияния на прочность паяного соединения. Так, по данным В. П. Фролова, при пайке термообработанных алюминиевых сплавов в интервале $480\text{—}520^\circ\text{C}$ прочность снижается меньше, чем при сварке. Поэтому специальная термическая обработка, с целью повышения прочности зон термического влияния паяного шва, обычно не производится. Для повышения прочности основного материала или снижения внутренних напряжений в основном металле или паяном шве иногда назначается общая термическая обработка.

Расчет прочности паяных соединений производится на основе тех же предпосылок, что и сварных [36]. Если элемент паяной конструкции работает на продольную растягивающую силу, то расчетным усилием паяного соединения является

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

где $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение для основного металла изделия при растяжении;

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

При работе элемента паяной конструкции на сжатие расчетным усилием паяного соединения будет

$$P = [\sigma]_{сж} F,$$

где $[\sigma]_{сж}$ — допускаемое напряжение для основного материала при сжатии.

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

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

где W — момент сопротивления сечения наиболее слабого из соединяемых элементов.

В паяных конструкциях, как и в сварных, в швах могут возникать напряжения рабочие и связующие. Паяные соединения, разрушение которых влечет за собой разрушение изделия, называются рабочими и напряжения в них — рабочими. Паяные соединения, разрушение которых не опасно для прочности конструкции, называются связующими и напряжения, возникающие в них, — связующими. Связующие напряжения при расчете паяных конструкций не учитываются, расчет производится только по рабочим напряжениям.

Несмотря на большое разнообразие соединений, применяемых в паяных изделиях, при расчете их можно свести к трем основным типам: нахлесточным, стыковым и тавровым. Основным и наиболее распространенным соединением при пайке является нахлесточное.

Типы соединений внахлестку приведены на рис. 67, а.

Для соединения, представленного на рис. 67, а—1, формула прочности имеет вид

$$P = [\tau']_{cp} b l,$$

где $[\tau']_{cp}$ — допускаемое напряжение в паяном шве на срез;
 b — ширина шва;
 l — длина нахлестки.

Величина нахлестки может быть определена из условия равнопрочности соединения.

Допускаемое напряжение для основного металла изделия при растяжении составит

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

где F — площадь расчетного сечения основного материала детали.

Эта нагрузка должна восприниматься паяным швом без разрушения, тогда приведенные выражения можно приравнять

$$[\sigma]_p F = [\tau']_{cp} b l,$$

откуда

$$l = \frac{[\sigma]_p F}{[\tau']_{cp} b}.$$

При применении ступенчатого паяного соединения расчет производится при одновременном учете срезающих и растягивающих напряжений (рис. 67, б—1):

$$P = [\tau']_{cp} b l + [\sigma']_p b (a + c),$$

где $[\sigma']_p$ — допускаемое напряжение в паяном шве на растяжение;

a и c — толщины ступеней соединения.

Стыковые соединения можно разделить на две группы: выполненные пайкой-сваркой и капиллярной пайкой. В первом случае расчет паяного соединения аналогичен расчету сварного. Сечение стыкового паяного шва при пайке-сварке может быть увеличено

за счет наплавки припоем, но это усиление в расчет не принимается. Вторая группа стыковых соединений представляет собой соединения, выполненные капиллярной пайкой, и прочность их лимитируется прочностью сплава, образовавшегося при взаимодействии припоя и основного металла. Если стыковое паяное соединение работает на растяжение, то допускаемое усилие в нем определяется из соотношения

$$P = [\sigma']_p \delta b.$$

где δ — толщина более тонкого из соединяемых элементов. При сжатии допускаемое усилие в шве будет

$$P = [\sigma']_{сж} \delta b,$$

где $[\sigma']_{сж}$ — допускаемое напряжение в паяном шве на сжатие.

Косостыковое соединение, если оно работает на растяжение, рассчитывается исходя из следующего соотношения (рис. 67, б—3):

$$P = [\sigma']_p \frac{b\delta}{\sin \alpha}.$$

При угле скоса $\alpha = 30^\circ$ площадь шва будет вдвое больше площади прямого стыка и формула прочности соединения примет вид

$$P = [\sigma']_p 2b\delta.$$

При работе косостыкового соединения на сжатие расчетные формулы будут иметь аналогичный вид.

При применении стыковых соединений с накладками расчет производится из условия равномерного распределения нагрузки по площади стыкового и нахлесточного шва.

Тавровые соединения применяются в элементах паяных конструкций, работающих на изгиб. Наиболее типичными конструкциями, в которых широко представлены тавровые соединения, являются сотовые панели. Расчет их на прочность производится методами сопротивления материалов в соответствии со схемой нагружения.

§ 3. Собственные напряжения и деформации в паяных конструкциях

Собственными или внутренними напряжениями называют напряжения, существующие в материале без приложения внешних сил. Существование собственных напряжений было открыто в 80-х годах прошлого столетия русским ученым Н. В. Калакуцким. В зависимости от размера объема, в котором уравниваются собственные напряжения, они подразделяются на собственные напря-

жения первого рода, уравнивающиеся в макрообъемах, соизмеримых с размерами изделия; второго рода, уравнивающиеся в микрообъемах в пределах одного или нескольких зерен металла, и третьего рода, уравнивающиеся в ультрамикрообъемах, в пределах кристаллической решетки металла. Собственные напряжения первого рода определяются теоретически с помощью методов сопротивления материалов, теории упругости, теории пластичности, а также экспериментально. Собственные напряжения второго и третьего рода находят 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 взаимно-уравновешенную 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, толщины паяного шва 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 широкое применение находит пайка пластинок из твердых сплавов с конструкционными сталями. Различие в значениях коэффициентов линейного расширения указанных материалов ведет к образованию в паяном шве внутренних температурных напряжений.

Значения коэффициентов линейного расширения металлов, применяемых в паяных конструкциях, приведены в табл. 39.

Коэффициенты линейного расширения сплавов имеют значения, близкие к коэффициентам линейного расширения основы сплава. Например, коэффициенты линейного расширения алюминиевых сплавов АМц и АМг соответственно равны $23,3 \cdot 10^{-6}$ и $23,6 \cdot 10^{-6}$ мм/мм·град. Коэффициенты линейного расширения низкоуглеродистых сталей мало отличаются от коэффициента линейного расширения железа. Наиболее распространенная нержавеющая сталь Х18Н9Т имеет коэффициент линейного расширения $14,9 \cdot 10^{-6}$ мм/мм·град.

Наименование металла	Химический знак	Коэффициент линейного расширения при 0—100° С в 10^{-6} мм/мм·град	Наименование металла	Химический знак	Коэффициент линейного расширения при 0—100° С в 10^{-6} мм/мм·град
Алюминий	Al	23,1	Молибден	Mo	5,3
Вольфрам	W	4,4	Медь	Cu	16,5
Железо	Fe	11,5	Никель	Ni	13,5
Кадмий	Cd	31,0	Олово	Sn	22,5
Кремний	Si	6,9	Свинец	Pb	28,1
Кобальт	Co	12,5	Серебро	Ag	18,7
Магний	Mg	26,1	Цинк	Zn	39,5
Марганец	Mn	22,0	Хром	Cr	8,4

Чем выше различия в коэффициентах линейного расширения соединяемых металлов, тем больше термические напряжения возникают в шве после пайки.

Рассмотрим причины возникновения и способы борьбы с собственными напряжениями при пайке твердосплавного инструмента. Этот случай, ввиду резкого различия свойств твердого сплава и стального корпуса инструмента, является наиболее характерным. Аналогичная картина может наблюдаться при пайке любых других разнородных материалов.

При пайке твердосплавного инструмента коэффициенты линейного расширения соединяемых материалов сильно различаются. Коэффициент линейного расширения углеродистой стали, применяемой для изготовления корпуса инструмента, составляет 12×10^{-6} — $14 \cdot 10^{-6}$ мм/мм·град, а твердого сплава, например ВК-8, $5 \cdot 10^{-6}$ — $6,25 \cdot 10^{-6}$ мм/мм·град, т. е. более чем в 2 раза меньше. Если длина пластинки твердого сплава и соединяемой с ней стальной пластинки, изображенной на рис. 79, составляет l , то в результате охлаждения с температуры затвердевания припоя до комнатной длина пластинки твердого сплава уменьшится на величину

$$\Delta l_T = -\alpha_T (T_z - T_{oc}) l,$$

где α_T — коэффициент линейного расширения твердого сплава;
 T_z — температура затвердевания припоя;
 T_{oc} — температура окружающей среды, до которой происходит охлаждение.

При охлаждении стальной пластинки до этой же температуры длина ее уменьшится на величину

$$\Delta l_c = -\alpha_a (T_s - T_n) l + \beta l - \alpha_n (T_n - T_{oc}) l,$$

где α_a , α_n — соответственно коэффициент линейного расширения аустенита и продуктов его распада;

T_n — температура фазового превращения аустенита стали;

β — коэффициент линейной деформации в результате фазового превращения в стали.

При определении изменения длины пластинки твердого сплава и стальной пластинки мы исходим из того, что размеры их при охлаждении изменяются независимо друг от друга. Но при наличии паяного шва при охлаждении твердый сплав и углеродистая сталь будут изменять свои размеры одновременно на разную величину, и в них будут возникать собственные напряжения. Для упрощения картины образования этих напряжений упругопластическую деформацию припоя учитывать не будем. Тогда при охлаждении паяного соединения сечение $a-a$ обеих пластинок переместится в $a'-a'$. Но такое перемещение возможно только, если твердый сплав подвергнется сжатию на величину ϵ_r , а сталь — растяжению на величину ϵ_c . Деформации твердого сплава на величину ϵ_r и стали на величину ϵ_c и являются основной причиной возникновения собственных напряжений при пайке разнородных материалов. Величина собственных напряжений зависит от разницы усадок Δl :

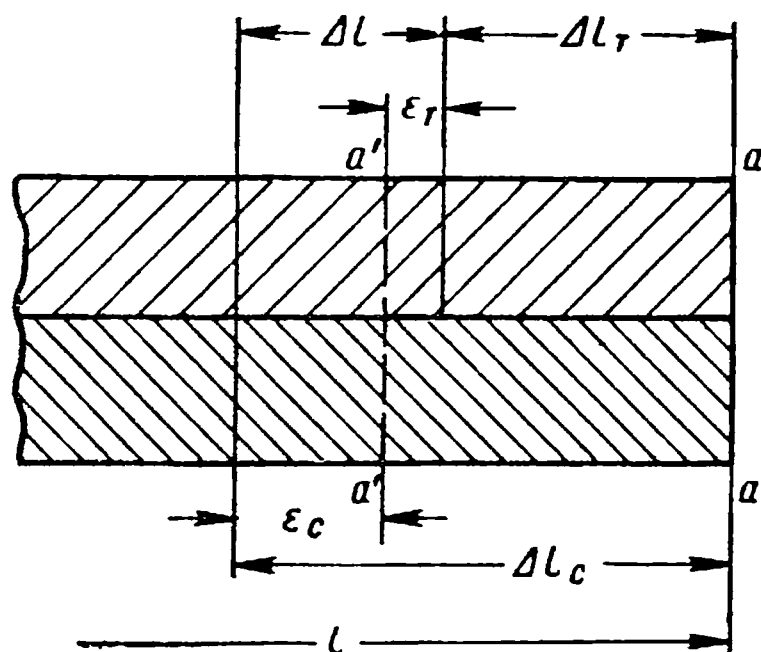


Рис. 79. Схема изменения линейных размеров паяного соединения стали с твердым сплавом при охлаждении

$$\Delta l = \Delta l_c - \Delta l_r.$$

Таким образом, собственные напряжения в паяных швах при пайке разнородных металлов с различными коэффициентами линейного расширения будут отсутствовать только при условии, когда

$$\Delta l = 0.$$

Снижение собственных напряжений в случае соединения пластинок твердого сплава со стальным корпусом 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 этого способа снижения собственных напряжений является низкая теплостойкость инструмента и повышение его стоимости.

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 делается искусственно, путем помещения в зазор между соединяемыми пайкой поверхностями деталей компенсационных прокладок из железной, медной или никелевой фольги или сетки толщиной порядка 0,4 мм. Наибольшее применение для этой цели нашел железо-никелевый сплав пермаллой, содержащий 45% Ni. Применение компенсационных прокладок в 1,5 раза повысило прочность 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 знание причин возникновения собственных напряжений в паяных швах и путей уменьшения их очень важно при конструировании и изготовлении паяных изделий [51].

Глава III

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ

Технология пайки включает комплекс последовательно выполняемых операций, основными из которых являются подготовка поверхностей соединяемых деталей к пайке, сборка, пайка и обработка деталей после пайки. Этот комплекс операции 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 поверхности соединяемых деталей перед пайкой от загрязнений и окисных пленок. Если при сварке наличие загрязнений и окисных пленок в зоне шва влечет за собой лишь снижение прочностных и других характеристик сварного соединения, то при пайке загрязнения и окисные пленки препятствуют взаимодействию между основным металлом и расплавленным припоем и, следовательно, образованию паяного шва.

2. Соблюдение при сборке деталей под пайку установленных чертежом соединительных зазоров с точностью до десятых, а иногда и до сотых долей миллиметра.

3. Удаление окисной пленки с соединяемых поверхностей основного металла и припоя в процессе пайки. Для получения паяного соединения недостаточно тщательно очистить соединяемые поверхности металлов перед пайкой. Необходимо 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) и основным металлом, а с другой — между расплавленным припоем и основным металлом. Принимая во внимание, что эти взаимодействия протекают в соединительном зазоре величиной порядка 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 поверхности деталей к пайке

Подготовка поверхности 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 должны быть очищены от консервирующей смазки, загрязнений, краски, окалина, следов коррозии.

Обезжиривание. Загрязнения жирового происхождения и смазка удаляются с поверхности деталей путем обезжиривания, т. е. погружения их в водные растворы щелочей, после чего во избежание коррозии должна следовать промывка в воде и сушка. Обезжиривание производят 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 используются горячие щелочные растворы, например 10%-ный раствор едкого натра при температуре 70—80° С. Обезжиривание деталей из меди и медных сплавов производят в ваннах более сложного состава. Например, применяется ванна состава: тринатрий фосфат — 50 г, сода кальцинированная — 50 г, жидкое стекло — 15 г, вода — 1 дм³ (л). Рабочая температура ванны 60—80° С, детали выдерживаются в ней 1—30 мин в зависимости от состояния поверхности. После этого они тщательно промываются 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 удаляются механическими или химическими средствами. В качестве механических средств применяют: обдувку песком или дробью, обработку режущим инструментом, шлифовальным кругом, металлической проволочной щеткой и т. п. Зачистка механическими средствами применяется главным образом для сталей, меди и ее сплавов, никеля и никелевых сплавов.

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: соляная кислота — $0,5 \text{ дм}^3 (\text{л})$; поваренная соль — 30 г; препарат КС — 5 г; вода — $1 \text{ дм}^3 (\text{л})$. Температура ванны не должна превышать 40°C . Продолжительность травления от нескольких минут до одного часа в зависимости от состояния поверхности деталей.

Для травления нержавеющей сталей применяют более сильные травители, состоящие из водных растворов смесей кислот: серной, соляной, азотной и фтористоводородной. Например, травитель состава: серная кислота — 23%; соляная кислота — 27%; препарат КС — 0,15%; клей сульфированный — 0,1%; остальное вода. Травление производится при температуре $40\text{—}50^\circ \text{C}$.

Детали из меди и медных сплавов рекомендуется травить в смеси водных растворов серной и соляной кислот, например, в ванне состава: серная кислота — 50 г; соляная кислота — 50 г; вода — $1 \text{ дм}^3 (\text{л})$. Температура ванны $15\text{—}25^\circ \text{C}$. Продолжительность травления до 10 мин. После травления стальные и медные детали должны тщательно промываться в проточной холодной воде, затем в горячей, после чего следует сушка.

Для травления алюминия и его сплавов применяют 10%-ные водные растворы едкого натра или едкого кали, подогретые до температуры $60\text{—}70^\circ \text{C}$. Затем детали промываются в холодной воде и осветляются в 30%-ном водном растворе азотной кислоты, после чего следует промывка в холодной воде и сушка до полного удаления влаги.

В результате травления деталей перед пайкой происходит разъедание их поверхности, что способствует растеканию припоев, увеличению площади в контакте 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 детали во избежание окисления должны немедленно поступать на сборку и пайку.

Покрытия. В ряде случаев перед пайкой на поверхность соединяемых деталей наносят покрытия технологические, барьерные и покрытия-припой.

В качестве технологических покрытий наносят такие легко паяемые металлы, как медь, никель и серебро, которые улучшают процесс смачивания труднопаяемых металлов и в процессе пайки полностью растворяются. Если технологическое покрытие растворилось не полностью, то это снижает прочность паяного соединения, поэтому их наносят тонким слоем порядка 5—10 мкм.

В качестве барьерных покрытий наносят такие металлы, которые предохраняют разнородные паяемые металлы от активного взаимодействия в процессе пайки и, следовательно, от возникновения хрупких интерметаллидов в паяном шве. 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. В качестве барьерных покрытий, наносимых, например, на титан перед пайкой его с разнородными металлами, рекомендуют молибден и ниобий, которые не образуют хрупких интерметаллидов ни с титаном, ни с медными или серебряными припоями [54].

В подобных случаях на алюминиевые сплавы в качестве барьерного покрытия наносят никель химическим или гальваническим способом.

В последние годы начинают находить промышленное применение 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 эвтектика серебро—медь, т. е. стандартный серебряный припой ПСр 72.

§ 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 и 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 иметь малый вес. 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 основной металл снижает прочность, 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.

Наиболее простые приспособления, применяемые при сборке и пайке, приведены на рис. 80 [17]. 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 фиксации, такие, как кернение, точечная сварка, клепка и т. п. В случае сложной конфигурации деталей при наличии тонкостенных элементов, для которых нагрев при пайке может

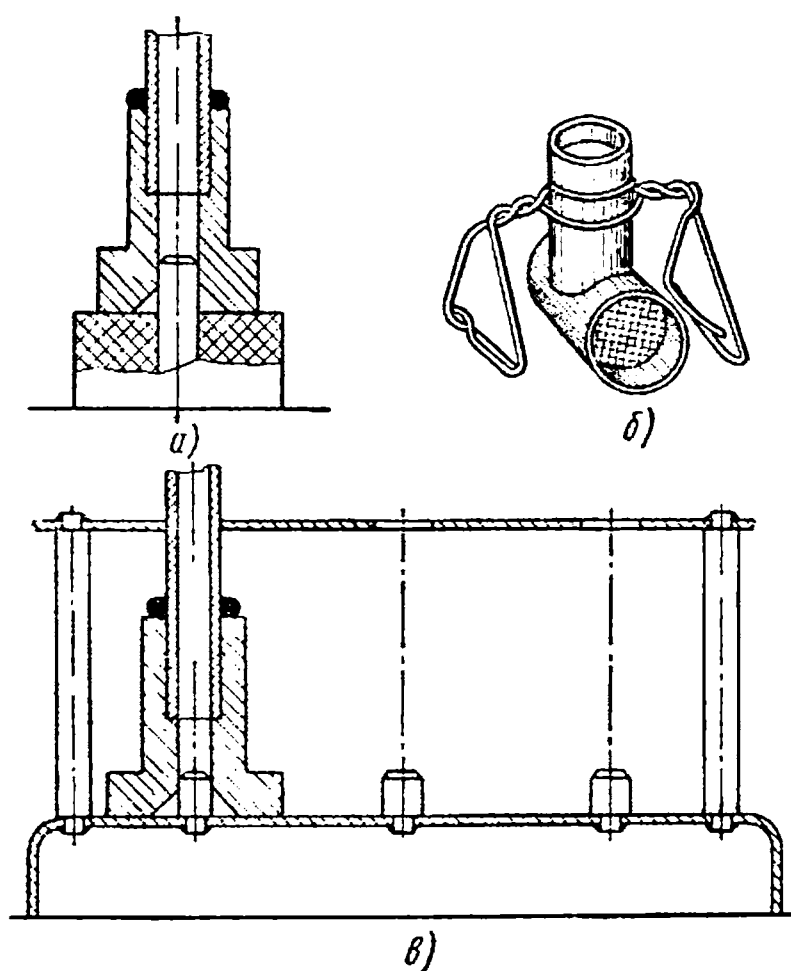


Рис. 80. Простейшие приспособления, применяемые при сборке и пайке:

а и б — одиночные; в — групповое

вызвать коробление, 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 применяют также вакуум, который создается или в тонкостенном контейнере, или непосредственно в объеме паяемой детали (рис. 81, а и б). При пайке в толстостенных контейнерах равно-

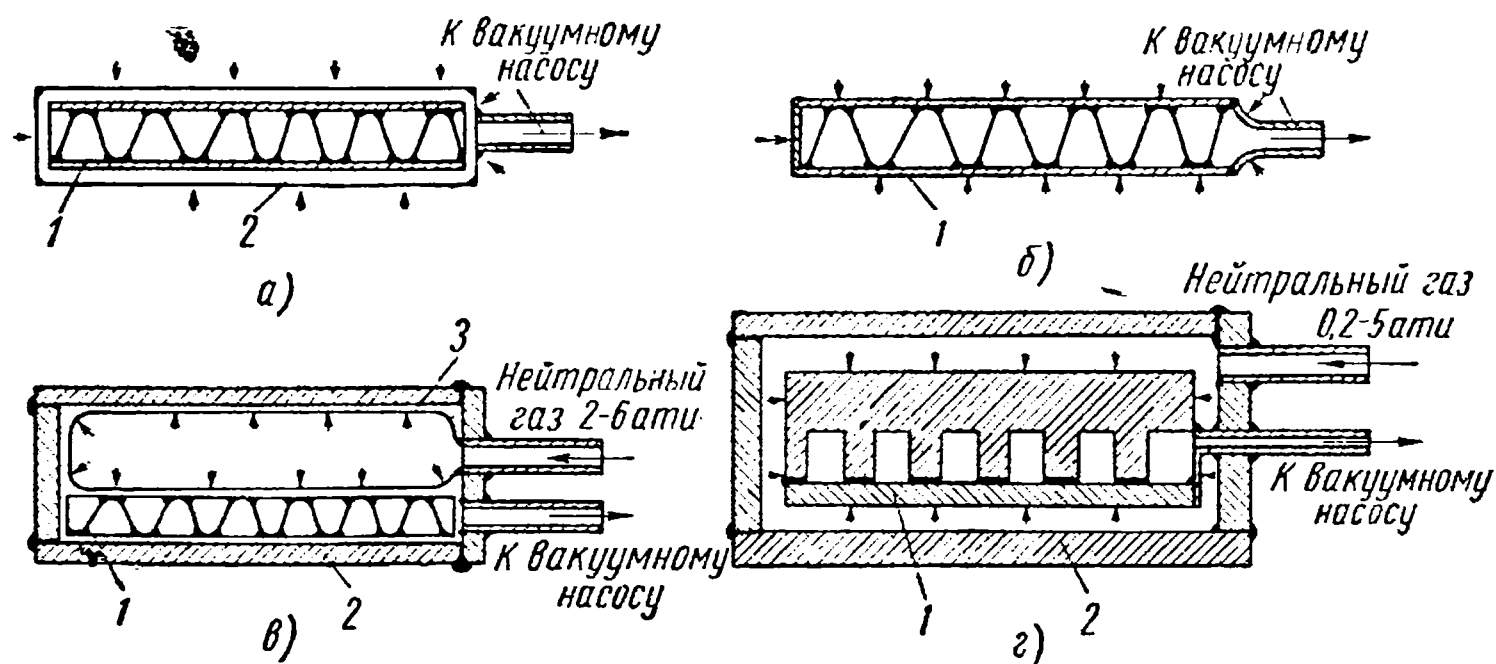


Рис. 81. Приспособления для прижатия частей паяемых изделий с применением вакуума:

1 — паяемое изделие; 2 — контейнер; 3 — стальной «мешок»

мерный прижим в процессе пайки, наряду с созданием вакуума, может быть осуществлен специальным стальным тонкостенным сосудом («мешком»), в который подается избыточное давление нейтрального газа (рис. 81, в), или созданием избыточного давления непосредственно в контейнере (рис. 81, г).

Способы нанесения флюса на место пайки зависят от применяемого нагрева. При пайке в печи флюс наносится на предварительно обезжиренные места пайки в виде паст или в виде тонкого слоя из кипящего насыщенного водного раствора тетраборнокислого натрия, борной кислоты или флюсов на их основе. При пайке в соляных ваннах флюсующей средой является расплав солей; дополнительное нанесение флюса на место пайки обычно не производится. При пайке погружением в латунные или серебряные расплавленные припой флюс наносится на место пайки заранее. Пастообразные флюсы после нанесения необходимо просушить до полного удаления влаги, и только после этого производится погружение в расплав припоя. При пайке погружением в оловянно-свинцовые и другие легкоплавкие припой флюсование производят путем погружения деталей на 3—5 мин в водный раствор

хлористого цинка, после чего они погружаются в расплавленный припой. 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 наносится перед пайкой с помощью кисти. Количество наносимого перед пайкой флюса в каждом отдельном случае определяется опытным путем.

Внесение в соединительный зазор необходимого количества припоя производится или при сборке, или в процессе пайки. Из пластичных припоев могут изготавливаться кольца, шайбы, втулки и т. п., которые устанавливаются в соединительный зазор, в специальные проточки в паяемых элементах деталей или сверху шва. Хрупкие и малопластичные припои изготавливаются в виде литых прутков, применение которых возможно только при ручной пайке горелками или паяльниками. Более целесообразно готовить из хрупких припоев порошки, которые потом смешиваются с флюсом или специальным связующим и наносятся на место пайки в виде паяльных порошков или паст. При пайке в печи, с индукционным нагревом, в соляных ваннах можно применять припой в виде зерен, паяльной пасты, таблеток, спрессованных из порошков припоя и флюса, а также в виде слоя припоя, предварительно наносимого на паяемый материал путем прокатки или гальванического покрытия.

Для закрепления припоя в необходимых случаях применяется точечная сварка или приклеивание 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 бывает необходимо ограничить 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 шва, 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 конструкцией паяемой детали, материалом, из которого она изготовлена, применяемым припоем, количеством изготавливаемых деталей и оснащенностью предприятия оборудованием. При изготовлении небольшого количества деталей экономически наиболее целесообразным является применение пайки газовой горелкой. При наличии на предприятии соответствующего оборудования для этой цели могут быть использованы 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, включающим температуру и условия нагрева, длительность выдержки при температуре пайки и условия охлаждения. Минимальная температура нагрева при пайке, необходимая для заполнения зазора припоем, равна или на несколько градусов выше температуры перехода припоя в жидко-твердое 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 с образованием качественного паяного соединения. Повышение температуры пайки улучшает условия растекания припоя по паяемой поверхности и ускоряет процессы диффузионного взаимодействия между припоем и основным металлом. Однако это, в свою очередь, может привести к структурным изменениям в основном металле за счет выделения эвтектических, карбидных и других составляющих и, следовательно, к снижению механических и коррозионных свойств. Изменения эти особенно заметны при пайке закаленных сталей, нагрев которых выше температур высокого отпуска резко снижает прочность. Высокотемпературный нагрев усиливает также процессы 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. По этим причинам температура пайки обычно выбирается на 30—50° выше температуры плавления припоя, а при пайке некоторыми тугоплавкими припоями, например медно-фосфористыми с содержанием серебра, — даже несколько ниже температуры ликвидуса припоя. Если припой вносится в виде порошка, то для его расплавления требуется более высокий нагрев за счет большего окисления отдельных зерен и трудности удаления окисной пленки с их поверхности. 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 теплопроводностью материала и толщиной стенок паяемого изделия. При низкой теплопроводности материала и больших толщинах стенок нагрев паяемого изделия необходимо производить медленно во избежание коробления и образования трещин.

Выдержка при температуре пайки выбирается на основе экспериментальных данных и 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 имеют место при индукционной пайке и пайке погружением. Наиболее длительные выдержки применяются при диффузионном методе пайки. 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 значения скорости охлаждения ограничиваются опасностью образованию 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.

Пайка в печах. Пайку в печах различают с воздушной нейтральной, активной атмосферами и в вакууме. Пайка в печах с воздушной атмосферой осуществляется путем нагрева деталей в печи, на которые заранее нанесены флюс и припой. Этот способ пайки обеспечивает равномерный и глубокий прогрев больших по размерам деталей и позволяет получить 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 является наиболее передовым способом соединения деталей. Этот процесс осуществляется путем нагрева собранных деталей с нанесенным припоем в печах с нейтральной или активной атмосферой. Окисление основного металла при этом способе пайки отсутствует не только в про-

цессе пайки, но часто и в процессе охлаждения. После пайки, например, детали могут продвигаться в камеру охлаждения, также заполненную контролируемой атмосферой. Выгрузка деталей производится при температуре около $100\text{—}200^{\circ}\text{C}$, чтобы не допускать появления на их поверхности окалины или цветов 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 и 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 горючих газов, которые хотя и имеют более слабые восстановительные свойства, но менее взрывоопасны. В ряде случаев состав газовой восстановительной среды определяется металлом изделия. Так, пайка сталей с высоким содержанием хрома может производиться лишь при употреблении водорода или аммиака, подвергнутых весьма тщательной очистке от кислорода и паров воды, путем пропускания газов через дунитовый¹ или палладиевый катализатор, а также путем последующей многоступенчатой осушки. При пайке в печи припой наносится 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 температуру плавления припоя на $50\text{—}100^{\circ}\text{C}$. Время выдержки при пайке в печи обычно $5\text{—}10$ 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, которые легко могут быть приспособлены для пайки.

Главными преимуществами процесса пайки в печах с контролируемой атмосферой являются высокое и устойчивое качество пайки, хороший вид изделий, а также большая производительность процесса. К недостаткам печного нагрева следует отнести сложность применяемого оборудования и большую энергоемкость процесса.

¹ Дунит — распространенный минерал, каталитическая активность которого определяется содержанием в нем окислов железа, никеля, хрома, а также следов металлов платиновой группы.

Пайка в вакууме успешно применяется 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 производится в вакуумных печах или контейнерах, загружаемых в обычные печи.

При пайке в вакууме наиболее глубокое разрежение необходимо создавать при применении в качестве основного металла сплавов, содержащих 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 наносятся медные и никелевые покрытия. Покрытие значительно снижает требуемый при пайке вакуум. При пайке в вакууме продолжительность выдержки после достижения температуры пайки составляет 5—10 мин. После пайки детали охлаждаются вместе с печью или контейнером до температуры 200—250° С, после чего камера пайки заполняется воздухом и паяные детали извлекаются. Паяные швы, полученные при применении нагрева в вакууме, отличаются чистотой, плотностью металла шва и высокой коррозионной стойкостью. Однако расходы, связанные с пайкой в вакууме, по сравнению с другими способами пайки повышаются, поэтому этот вид пайки целесообразно применять только для ответственных изделий. Кроме того, при охлаждении паяемых деталей под вакуумом цикл пайки становится очень длительным, а производительность вакуумных печей низкой.

Индукционная пайка. 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 металле токов. Соединяемые детали при индукционной пайке после нанесения на них припоя и флюса располагаются в индукторе и нагреваются до температуры пайки. Необходимую интенсивность и характер индукционного нагрева достигают выбором соответствующей частоты тока, продолжительности его включения и главным образом применением соответствующих индукторов. Разнообразие подвергающихся пайке деталей требует создания большого количества 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 и 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 должны быть расположены ближе к массивной детали. Для прогрева массивной детали до необходимой температуры и на требуемую глубину приходится вести нагрев с периодическими выключениями тока, чтобы дать время распространиться теплу 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 иметь в виду, что предварительно нанесенный на место пайки припой не должен образовывать замкнутого витка, т. е. изготавливаться в виде сплошного кольца, так как при этом он будет очень быстро нагреваться и плавиться за счет индуктированных токов.

Индукционный нагрев позволяет также вести пайку в газовых средах и в вакууме. В этом случае паяемая деталь помещается в контейнер, который нагревается в индукторе. Вместо контейнера может быть применена герметичная прозрачная камера 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 незначительно. Существенным недостатком индукционной пайки является значительная стоимость оборудования.

Пайка сопротивлением. При этом способе пайки нагрев осуществляется за счет тепла, выделяемого электрическим током при прохождении через паяемую деталь и токоподводящие элементы. Пайку сопротивлением можно производить 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 в процессе пайки, так как нагрев протекает очень быстро, а припой защищен от окисления основным металлом. Качество паяных соединений при пайке

сопротивлением получается высоким при минимальном короблении деталей. Припой наносится на соединяемые поверхности в виде фольги толщиной 0,05—0,15 мм, гальваническим путем, металлизацией и т. п.

Режим пайки выбирается опытным путем в зависимости от толщины соединяемых деталей, свойств основного металла и припоя. Сжимающее давление на электродах 0,98—7,8 Мн/м² (10—80 кг/см²).

Пайка сопротивлением может производиться также и с применением угольных или графитовых электродов. Нагрев в этом случае осуществляется за счет теплоотвода от электродов и протекает сравнительно медленно, поэтому для защиты основного металла и припоя от окисления применение флюсов или контролируемых газовых сред обязательно.

Преимуществом пайки сопротивлением на контактных машинах является высокая производительность и возможность наблюдать за процессом образования паяного соединения. Недостатком этого способа является трудность подвода контактных зажимов к месту пайки, что не позволяет применить его для деталей сложной конфигурации.

Пайка погружением. 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 пайки весьма производительным. В качестве нагревательной среды применяются расплавы солевых смесей, в которые частично или полностью погружаются паяемые детали. Хорошие результаты для пайки стальных деталей обеспечивает соляная ванна следующего состава: хлористый барий — 75%; хлористый натрий — 20%; тетраборнокислый натрий — 5%.

Оптимальная температура составляет в случае пайки сталей медью 1120—1130° С, латунью 930—940° С, т. е. на 30—50° выше температуры плавления соответствующего припоя.

В случае использования многотигельных печей-ванн, целесообразно делать двухступенчатый нагрев деталей под пайку, т. е. в первой ванне производить нагрев деталей до какой-то промежуточной температуры, а во второй — пайку. Температура первой ванны может быть подобрана с таким расчетом, чтобы в ней можно было нагревать паяные изделия и под закалку. После пайки детали вынимаются из соляной ванны, охлаждаются на воздухе до температуры 200—250° С, после чего погружаются в ванну с горячей водой для удаления остатков солей. Иногда из соляной ванны деталь переносится 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 невозможно удалить соли после пайки.

При косвенном нагреве в соляных ваннах (рис. 82, а) деталь помещается в контейнер, в котором создается контролируемая газовая среда или вакуум. Контейнер подогревается до температуры 100—150° С для удаления с поверхности влаги, после чего погружается в соляную ванну; нагретую до температуры пайки. После определенной выдержки контейнер извлекается из ванны, охлаждается 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. 82, б),

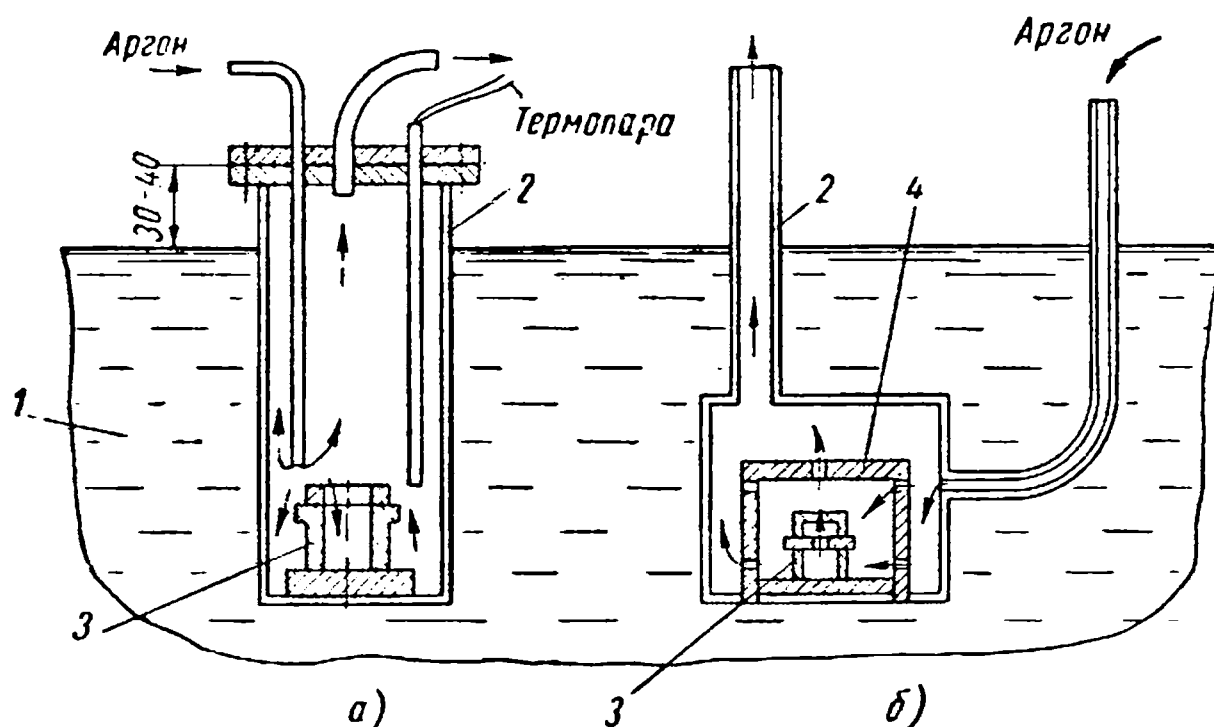


Рис. 82. Примеры косвенного нагрева при пайке в соляных ваннах с частичным (а) и полным (б) погружением контейнера:

1 — расплав солей; 2 — контейнер; 3 — паяемая деталь; 4 — экран

или уменьшают зазор между стенками контейнера и стенками помещенных в них паяемых деталей. Для обеспечения равномерного нагрева деталей в процессе пайки в контейнере иногда устанавливаются специальные экраны.

Пайка в соляных ваннах обеспечивает высокую производительность процесса, хорошее качество паяных соединений и отсутствие обезуглероживания стальных деталей. Этот способ пайки позволяет также точно поддерживать температурный режим в пределах $\pm 5^\circ$, что создает благоприятные условия для применения механизации и автоматизации процесса пайки.

При применении способа пайки погружением в расплавленные припой собранные в узел детали с заранее нанесенным флюсом погружают 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. Пайка погружением

находит широкое применение в производстве радиаторов двигателей внутреннего сгорания, коллекторов электромоторов и других деталей электро- и радиотехнических изделий. Режим пайки устанавливается опытным путем. При погружении в ванну детали нельзя держать слишком долго в припое, так как основным металлом может раствориться, что приведет к порче деталей, а также к загрязнению основным металлом расплавленного припоя. Температура в ванне поддерживается на $50\text{—}100^\circ$ выше температуры ликвидуса припоя в зависимости от количества припоя и веса погружаемых деталей. Для того чтобы ванна обладала достаточным запасом тепла, необходимо превышение веса расплавленного припоя над весом погружаемых деталей не менее чем в 20 раз.

Пайка способом погружения в припой характеризуется высоким и однородным качеством паяных соединений, не зависящим от квалификации рабочего; большой производительностью процесса вследствие быстроты нагрева и пайки; широкими возможностями механизации и автоматизации процесса. Недостаток этого способа заключается в том, что он требует одновременного применения больших количеств 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 (рис. 83). Во время контакта расплавленного припоя с концами проводников деталей радиомонтажа происходит их пайка, обеспечивающая получение надежного электрического соединения.

При селективной пайке (рис. 84) расплавленный припой выходит потоками из специальных, расположенных под паяемыми

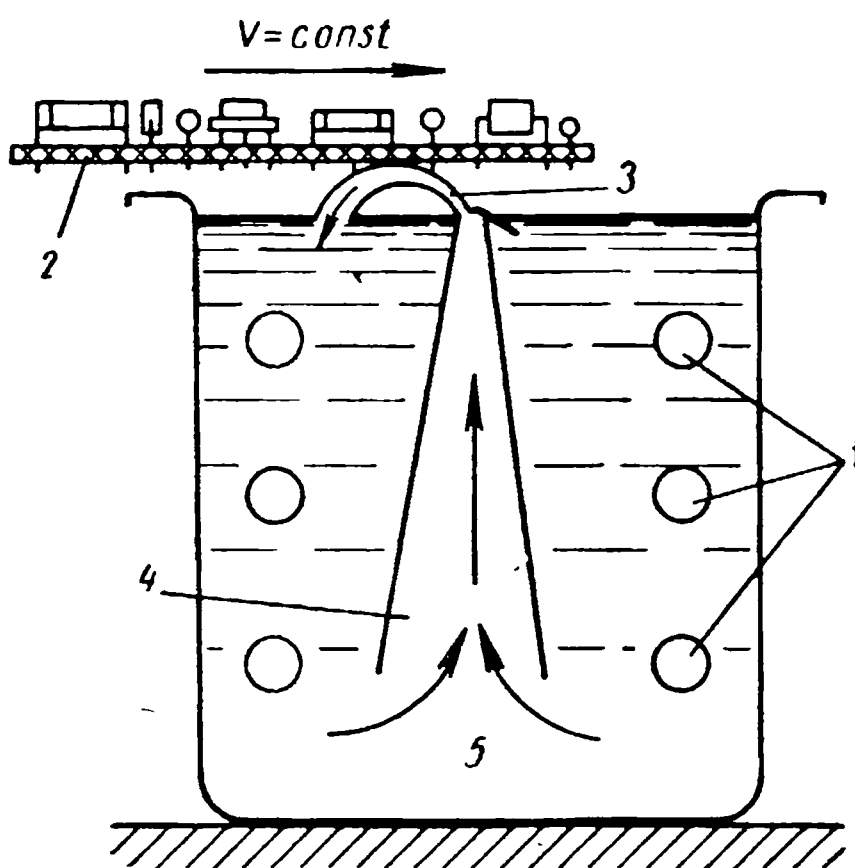


Рис. 83. Схема процесса пайки струей припоя:

- 1 — электронагревательные элементы;
2 — плата; 3 — струя припоя; 4 — сопло;
5 — припой

деталями наконечников, размещенных в строгом соответствии с положением на плате монтажных соединений. Собранная плата опускается на эти наконечники сверху, проводники смачиваются потоками припоя и запаиваются. В результате использования этих способов 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 свободную от окислов рабочую поверхность зеркала ванны и способствует более эффективному затеканию припоя в зазоры. Ско-

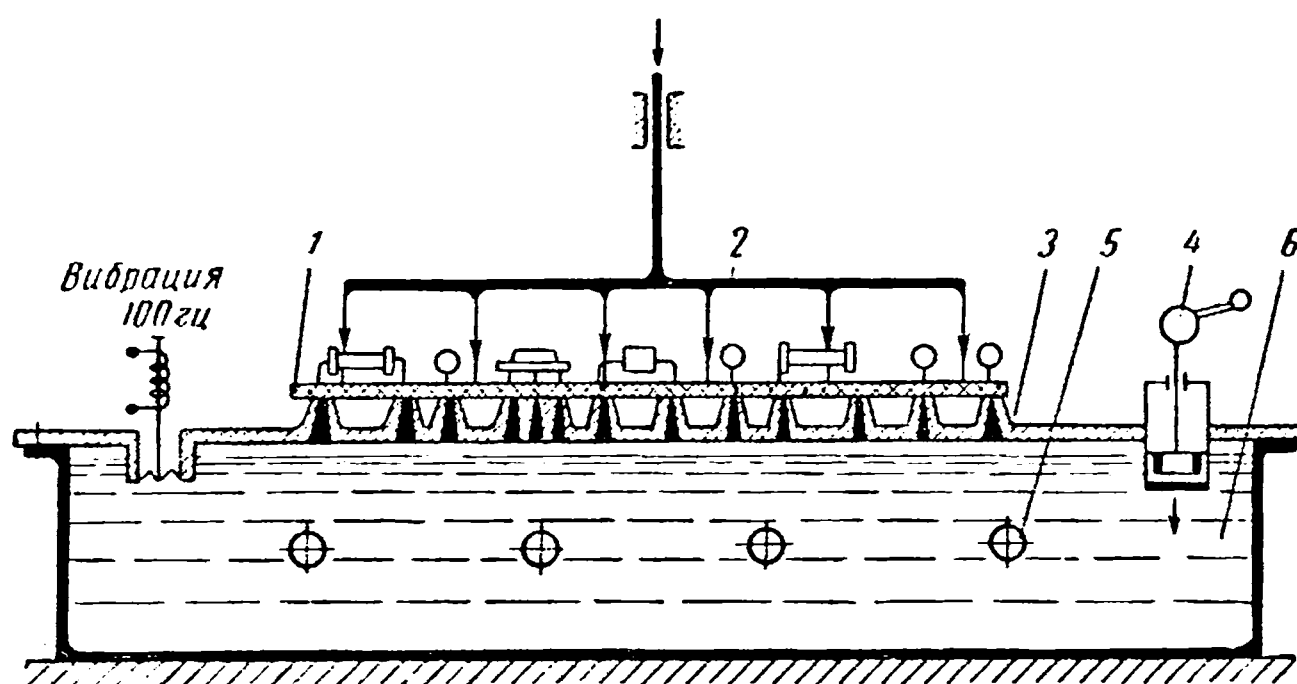


Рис. 84. Схема процесса селективной пайки:

1 — плата; 2 — прижим; 3 — фильера; 4 — поршень; 5 — электронагревательные элементы; 6 — припой

рость горизонтального движения печатных плат при пайке волной припоя колеблется в пределах 10—20 мм/сек. В качестве припоя используют эвтектические или околоэвтектические оловянно-свинцовые и оловянно-свинцово-кадмиевые припои, которые имеют наилучшие технологические свойства и дают наиболее надежные в эксплуатационном отношении паяные соединения.

Радиационная пайка. В последние годы в производство начинает внедряться пайка кварцевыми лампами, которая нашла применение при изготовлении тонкостенных листовых конструкций. Этот способ пайки отличается быстротой нагрева и возможностью точной регулировки температуры пайки. В зависимости от конструкции паяемого изделия блоки кварцевых ламп могут устанавливаться с одной и с двух сторон. Схема процесса пайки при применении двустороннего нагрева приведена на рис. 85 [62]. Блоки кварцевых ламп могут устанавливаться также вне камеры нагрева, которая в этом случае может заполняться газовой средой или вакуумироваться. Высокие скорости нагрева и возможность точной регулировки температуры делают этот способ пайки весьма перспективным.

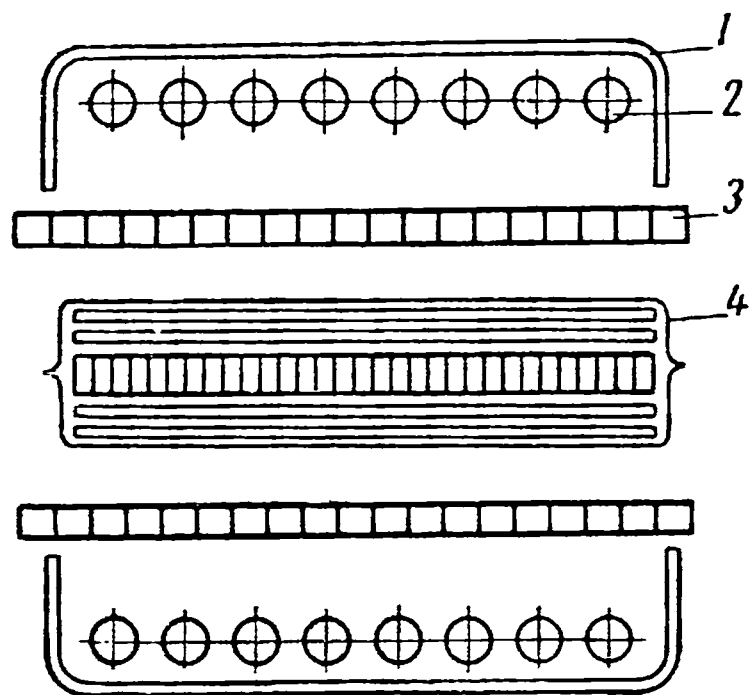
Пайка горелками. Газовые горелки и в первую очередь стандартные ацетилено-кислородные горелки с широким и нормальным факелом являются достаточно мощным источником тепла, хорошо поддающимся регулированию с помощью подбора наконечников, и применяются большей частью для пайки высокотемпературными припоями крупногабаритных деталей. Вместо ацетилена в них целесообразно использовать пропан, который отличается дешевизной и не реагирует с флюсами во время пайки. Кроме того, пропано-кислородное пламя не ослепляет глаз 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 может осуществляться 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. Недостатками этого способа пайки являются трудности контроля температуры нагрева, необходимость высокой квалификации паяльщиков, возможность коробления деталей, вызываемого местным нагревом.

Пайка паяльниками. Этот способ пайки отличается быстротой нагрева благодаря непосредственному металлическому контакту паяльника с подвергающимися пайке деталями. Он применяется главным образом при пайке тонкостенных деталей из сталей, меди и медных сплавов низкотемпературными припоями. При подготовке паяльника к работе рабочую кромку его зашлифовывают под углом $40-45^{\circ}$ и облуживают припоем. При пайке паяльник всей рабочей поверхностью приводят в контакт с местом соединения, предварительно покрытым флюсом. Одновременно к нагретому месту подводят в виде проволоки или прутка припой, который плавится и затекает в зазор. При небольшом количестве необходимого для пайки припоя последний можно вносить в соединение при помощи рабочей части паяльника. Для очистки паяльника от образующихся в процессе работы окисных пленок применяют хлористый аммоний.

Ультразвуковые паяльники применяются иногда для предварительного облуживания поверхности алюминия и его сплавов



низкотемпературными припоями. После облуживания пайка может производиться с применением обычных паяльников. Процесс ультразвукового облуживания целесообразно проводить при температурах не выше 350°C , так как при больших температурах начинает разрушаться также и основной металл. Главными недостатками ультразвуковых паяльников является сравнительно невысокая производительность и потребность в применении сложного, хотя и не громоздкого оборудования.

Абразивные паяльники, как и ультразвуковые, нашли применение 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 будет 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 подогреваются до температуры плавления припоя, облуживаются при помощи абразивного стержня и затем подвергаются 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 подвергаются дальнейшей обработке, связанной с удалением остатков флюсов, зачисткой наплывов припоя и термической обработкой. Для удаления остатков флюсов деталь промывают в холодной или горячей воде, в специальных растворах или зачищают металлической щеткой, обдувают песком и т. п. Остатки флюсов, содержащих хлористые соли щелочных и щелочноземельных металлов, необходимо удалять особенно тщательно, так как они оказывают активное коррозионное воздействие на металл.

Удаление остатков хлоридных флюсов с алюминиевых сплавов производится промывкой в горячей и холодной проточной воде, после чего изделие погружается на 5—10 мин в 5%-ный раствор хромового ангидрида для пассивирования поверхности. Детали, паянные припоями 34А и эвтектическим силумином, могут пассивироваться также 5%-ным раствором азотной кислоты. Детали из алюминиевых сплавов, паяные припоем П575А, могут анодироваться и подвергаться 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 $40\text{—}50^{\circ}\text{C}$ в течение 10—15 мин. Затем следует промывка

в горячей воде и сушка нагретым воздухом. Состав пассивирующего раствора: калиевый хромпик — 13 г; серная кислота — 8 г; хлористый натрий — 0,1 г; уксусная кислота — 5 г; вода — 0,1 дм³ (л). Для изделий больших габаритов и сложной конфигурации, паянных оловянно-свинцовыми припоями с применением коррозионно-активных флюсов, можно применять обработку 10%-ным раствором хромпика, нагретым до температуры 60—70° С. Изделие целиком погружается в ванну с указанным раствором или раствор заливается во внутренние полости. После удаления раствора производится промывка горячей водой и сушка теплым воздухом.

Остатки боридных флюсов сложного состава после пайки в большинстве случаев образуют прочную стекловидную пленку, которая не растворима в воде и может быть удалена только опескоструиванием или другими механическими средствами. Со стальных деталей, паянных медно-цинковыми и серебряными припоями, остатки тетраборнокислого натрия можно удалить обработкой в 10%-ном растворе серной кислоты, в которую добавляется 200 г на 1 дм³ (л) хромовой кислоты (H₂CrO₄). Детали погружаются 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 удаление их с поверхности шва не всегда обязательно.

Остатки флюсующих паст, приготовленных на жировой основе, удаляют с паяных швов хлопчатобумажными салфетками, смоченными растворителями.

Если после удаления остатков флюса швы подвергаются механической доработке, то, особенно в случае коррозионно-активных флюсов, 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 нагрев изделия производился в приспособлении, то и охлаждение изделия во избежание коробления также необходимо производить в закрепленном положении. Детали из углеродистых и легированных сталей могут подвергаться любому виду термической обработки: отжигу, нормализации, закалке, отпуску. В отдельных случаях, при наличии коробления, паяные детали подвергаются 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 указанные значения, то правку следует производить с нагревом выше температуры рекристаллизации основного металла.]

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

Медью, ее сплавами, а затем сталью человечество пользуется в течение тысячелетий. Алюминий и его сплавы, имеющие сейчас широкое распространение, научились добывать и обрабатывать только в прошлом столетии. Большинство других металлов нашли промышленное применение только в текущем столетии, а некоторые из них, например титан, цирконий, ниобий, тантал и другие, начали применять только в последние десятилетия в связи с развитием новых отраслей техники. Эти обстоятельства отразились и на разработке технологии пайки.

§ 1. Пайка меди и ее сплавов

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

При пайке меди в газовых восстановительных средах следует иметь в виду, что обычная техническая медь подвержена так называемой «водородной болезни», т. е. растрескиванию по границам зерен. Это объясняется тем, что при взаимодействии с медью водород растворяется в ней, восстанавливает закись меди, расположенную на границах зерен, а образующиеся при этом под большим давлением пары воды разрывают металл, имеющий при высокой температуре низкую прочность. Бескислородную медь марки МО и медь вакуумной переплавки можно паять и в восстановительных атмосферах, не опасаясь ее растрескивания по границам зерен.

При пайке медных сплавов, легированных такими активными металлами, как алюминий, бериллий, хром и другими, 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, но и даже в вакууме или инертной атмосфере с образованием прочных паяных швов.

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 указанные флюсы непригодны, так как они не растворяют окислы 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 оловянно-свинцовыми 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 все же 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 припои и реже припои на медной основе, потому что последние сравнительно тугоплавки и вызывают местное растворение основного металла (эрозию) в процессе пайки. Сравнительно легкоплавкими являются медно-фосфористые припои, которые дают удовлетворительные результаты при пайке меди, но применение их недопустимо для пайки латуней из-за хрупкости паяных соединений. Последнее объясняется тем, что в паяном шве образуются весьма хрупкие фосфиды цинка.

При соединении деталей из медных сплавов, конструкция которых позволяет сжимать паяемые поверхности между собой, в качестве припоя можно использовать серебряное покрытие (10—20 мкм) или тонкую серебряную фольгу. Находясь в тесном контакте с медью, серебро образует в зазоре при нагреве выше 780° С припой типа ПСр 72. Пайка этим (контактно-реактивным) 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 красноломкости следует обращать внимание на конструирование фиксирующих приспособлений и добиваться, чтобы они не препятствовали расширению деталей при нагреве и, следовательно, не создавали в них напряжений, могущих вызвать растрескивание в процессе пайки.

Ориентировочные данные о прочности паяных соединений для меди и латуни приведены в табл. 35 и 38. Однако следует иметь в виду, что прочность паяных соединений для конструкционных медных сплавов, как правило, выше указанных значений и зависит не только от выбранного припоя, но и от режимов пайки. Поэтому целесообразно в каждом конкретном случае экспериментальным путем определять прочность паяных соединений с учетом всех условий, в которых будет происходить пайка проектируемого изделия.

§ 2. Пайка конструкционных сталей

Углеродистые и низколегированные стали. Эти стали обладают сравнительно низкой прочностью, но они дешевы, поэтому широко используются в строительных металлоконструкциях. В машиностроении они применяются реже. Процесс пайки низкоуглеродистых и низколегированных сталей не вызывает особых затруднений и может быть осуществлен всеми известными способами. Особенно легко протекает пайка низкоуглеродистых сталей. При пайке высокоуглеродистых сталей требуется лишь более тщательная подготовка соединяемых поверхностей.

Высокотемпературная пайка углеродистых и низколегированных сталей производится обычно медью, медно-цинковыми и другими припоями на медной основе. Серебряные припои, хотя и образуют высокопрочные швы, но из-за дефицитности применяются редко.

Медно-фосфористые припои применять для пайки сталей не рекомендуется, так как на границе со сталью они образуют хрупкие фосфиды железа, что придает паяным соединениям повышенную хрупкость и хладноломкость.

Они могут быть использованы только при пайке ответственных деталей из углеродистых сталей, которые не подвергаются ударным и вибрационным нагрузкам, а также не работают при низких температурах.

Встречаются вполне обоснованные попытки использования чугунов в качестве припоев для пайки углеродистых и низколегированных сталей. Это направление является весьма перспективным, особенно в том случае, если для пайки удастся использовать высокопрочные и пластичные модифицированные чугуны. 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. При пайке в контролируемых средах углеродистых и низколегированных сталей самым распространенным способом является пайка медью в печи с восстановительной атмосферой.

Пайка углеродистых и низколегированных сталей при низких температурах производится главным образом оловянно-свинцо-

выми и свинцовыми припоями. В качестве флюса наибольшее распространение получили водные растворы хлористого цинка.

При пайке сталей мартенситного класса, например 30ХГСА, оловянно-свинцовыми 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 явления 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.

Высоколегированные конструкционные стали. Эти стали также можно паять всеми способами с применением рекомендованных выше припоев и флюсов. Затруднения в процессе пайки встречаются только в тех случаях, когда легирующие элементы, например хром, образуют на поверхности стали химически устойчивые окислы. В этом случае применяют более активные флюсы, а в качестве газовой среды используют трехфтористый бор в смеси с азотом или аргоном. 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, снижения 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 мало изучена и требует дополнительных исследований.

Многие стали при весьма высоких температурах пайки (выше 1100°C) не снижают своих механических свойств, хотя указанные температуры нагрева являются недопустимыми с точки зрения термической обработки конструкционных сталей.

Нержавеющие и жаропрочные стали. В связи с высоким содержанием хрома поверхность этих сталей покрыта химически устой-

чивой окисной пленкой, состоящей в значительной части из трудно-растворимых в обычных флюсах окислов хрома. Поэтому пайка данных сталей представляет некоторые затруднения. Так, например, окисная пленка на нержавеющей и жаропрочных сталях в газовых восстановительных средах восстанавливается при температуре около 1200° , в то время как на обычных конструкционных сталях окисная пленка восстанавливается в водороде даже при 900° С. 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 $500\text{—}700^{\circ}$ С делает их склонными к интеркристаллитной коррозии, поэтому нагрев под пайку и охлаждение после пайки нужно производить быстро. При пайке нержавеющей сталей, например Х18Н9Т, медными и некоторыми серебряными припоями они растрескиваются только в том случае, если в момент пайки детали находились в напряженном состоянии. При высокотемпературной пайке сталей припоями на никеле-марганцевой 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 никеле-хромо-марганцевой 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 влечет за собой ряд затруднений при пайке. 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°C .

При пайке в вакууме или нейтральных газовых средах последнее 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 флюса.

При пайке нихромов жаропрочными припоями с местным нагревом рекомендуется применять флюсы № 200 и 201, а при пайке серебряными припоями — флюсы № 284 и 209.

Серебряные и медные припои для пайки жаропрочных никелевых сплавов применяются редко из-за низкой 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 переделными 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 удалением его путем электрохимической обработки в соляной ванне при температуре $450\text{—}510^{\circ}\text{C}$.

Для удаления окисной пленки и защиты чугуна от окисления более целесообразно применять такие активные флюсы, как № 209

и 284, которые растворяют графит на 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°C). Перегрев чугуна связан со структурными превращениями, что при охлаждении влечет за собой выделение хрупкого цементита. В случае необходимости паять чугун оловянно-свинцовыми или другими низкотемпературными припоями предварительно следует удалить с паяемой поверхности углерод путем обработки чугуна флюсом № 209 или 284 при температуре $600\text{—}700^{\circ}\text{C}$. 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 применяются высокоуглеродистые стали, содержащие $0,6\text{—}1,2\%$ С. Такие стали можно паять всеми способами с учетом технологических рекомендаций по пайке конструкционных сталей и чугуна.

Из-за недостаточной теплостойкости указанных сталей их легируют вольфрамом (до 18%), хромом (до 5%), ванадием (до 4%) и другими элементами, увеличивающими жаропрочность и позволяющими благодаря этому значительно повышать скорость резания. Такие инструментальные стали, называемые быстрорежущими, подвергают закалке с температур $1200\text{—}1300^{\circ}\text{C}$ с последующим отпуском при температуре $560\text{—}580^{\circ}\text{C}$ или обработкой 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 $70\text{—}80\%$ 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 припоя производится закалка 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 боридными флюсами недостаточно. При пайке следует использовать более актив-

ные боридно-фторидные 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 лишнем 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 наряду с применением припоев с более низкой температурой плавления и компенсационных прокладок И. И. Яновский предложил корпус инструмента изготавливать из легированной стали типа 30ХГСА, которая после пайки и закалки на мартенсит почти вдвое снижает напряжения в твердосплавном инструменте в сравнении с напряжением, возникающем в инструменте с корпусом из стали У-7 со структурой перлита. Это объясняется тем, что при превращении аустенита в мартенсит сталь 30ХГСА несколько увеличивается 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 медно-цинковые припои типа латуни Л-62, легированной для повышения теплостойкости небольшими добавками никеля, марганца или алюминия. Эти припои, предложенные Н. Е. Будниковым, сравнительно легкоплавки и пластичны, благодаря чему они обеспечивают получение высококачественных соединений при пайке твердосплавного инструмента.

Иногда для пайки инструмента применяют более жаропрочные медно-марганцовые припои.

Твердосплавной 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 паяного 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 следующего состава: 20—30 мл HF, 30—40 мл HCl на литр воды. Время травления 5—10 мин при комнатной температуре. После такой обработки на поверхности титана все же остается тонкая окисная пленка, препятствующая смачиванию титана припоем. Поэтому иногда пытаются паять титан с использованием специальных флюсов, по составу и химизму действия 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 состава «А», который тщательно очищен от примесей кислорода, азота и паров воды. Только в такой чистой атмосфере или в вакууме окисная и нитридная пленка на титане растворяется в металле при условии, что температура пайки выше 700° С. Поэтому процесс пайки титана ведут обычно при температурах 800—900° С, 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° С он склонен к росту зерна и к некоторому снижению пластических свойств. Поскольку предел прочности при этом практически не снижается, то в отдельных случаях соединение титановых сплавов пайкой производят даже при 1000° С.

Водород, всегда находящийся в титане и снижающий его пластичность, удаляется при пайке (или нагреве) в вакууме $1,33 \times 10^{-2}$ н/м² (10^{-4} мм рт. ст.) при температуре около 900° С, поэтому пайка титана в вакууме предпочтительнее, чем пайка в нейтральной атмосфере.

При выборе припоя, способа и режимов пайки необходимо иметь в виду, что титан образует хрупкие интерметаллиды в паяном шве 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, что позволяет рассчитывать на получение менее хрупких паяных соединений.

Из указанных припоев практическое применение нашли серебряные припои, которые позволяют получить при пайке в печи при температуре $950\text{--}1000^\circ\text{C}$ высокопрочные паяные соединения. Так, например, при пайке титана ВТ1Д чистым серебром в атмосфере аргона предел прочности паяных соединений составляет $177\text{--}196\text{ Мн/м}^2$ ($18\text{--}20\text{ кГ/мм}^2$), а при пайке серебром, легированным марганцем ($10\text{--}15\%$), предел прочности паяных соединений достигает 274 Мн/м^2 (28 кГ/мм^2). При этом соединения, паяные чистым серебром, неустойчивы против коррозии и в течение года (в городской атмосфере) снижают свою прочность на $25\text{--}30\%$.

Еще более высокие значения прочности паяных соединений можно получить при высокотемпературной пайке титана припоями на основе никеля или меди (свыше 294 Мн/м^2), но эти металлы очень быстро растворяют его, вызывая сильную эрозию и охрупчивание около паяных швов.

Для получения более пластичных и прочных соединений с успехом применяется так называемая диффузионная пайка титана, сущность которой заключается в том, что изделие, паяное минимально необходимым количеством припоя, например никелем, железом и другими металлами, выдерживается при температуре пайки до тех пор, пока в паяном соединении не образуется пластичный твердый раствор. Прочность соединений, полученных таким способом, близка к прочности основного металла.

Пайка титановых сплавов оловянно-свинцовыми 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 подвергают нагреву до 250°C в течение 1 ч. После этого пайка производится теми же припоями и флюсами, которые применяются для чистого никеля.

При непосредственной пайке титана с разнородными металлами, особенно при высокой температуре, паяные соединения получаются очень хрупкими и непрочными. Так, например, при пайке титана с медью серебряным припоем прочность паяного соединения, как правило, не превышает 98 Мн/м^2 (10 кГ/мм^2), что объясняется тем, что титан и медь быстро растворяются припоем в процессе пайки и образуют в паяном шве хрупкие интерметаллиды.

Для того чтобы избежать этого и повысить прочность паяных соединений, на титан или на оба соединяемые 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. Все эти металлы, за исключением хрома, относятся к сравнительно редким и годовая добыча их в сравнении с железом в тысячи раз меньше. Тугоплавкие металлы играют важную роль в развитии новых отраслей техники, без них невозможно создать надежные конструкции для работы при высоких температурах. Рассмотрение технологии их пайки начнем с вольфрама, как с наиболее тугоплавкого и жаропрочного металла.

Вольфрам находит применение для изготовления деталей, испытывающих в процессе работы нагрев до высоких температур. Температура плавления вольфрама 3410°C . В конструкциях он способен надежно работать при температурах выше 2700°C . Основным недостатком вольфрама являются высокий температурный порог хладноломкости ($300\text{—}500^{\circ}\text{C}$) и пониженная прочность после рекристаллизации. Пайку вольфрама необходимо стремиться производить при температурах не выше температуры рекристаллизации (1450°C). При сварке плавлением рекристаллизация вольфрама и его охрупчивание неизбежны, поэтому применение пайки при изготовлении деталей из вольфрама предпочтительно. При соединении вольфрама с другими металлами, основная трудность связана со значительным различием в коэффициентах линейного расширения.

При пайке вольфрама требуется особо тщательная очистка поверхности деталей. Очистка производится 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 азотно-кислого натрия (NaNO_3). Способ очистки выбирается 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.

Для пайки вольфрама применяют припои с температурой плавления до 3000°C , в том числе чистые металлы: тантал, ниобий, никель, медь, и сплавы: никель-титан, никель-медь, марганец-никель-кобальт, молибден-бор и др. Ввиду активного взаимодействия никеля и припоев на основе никеля с вольфрамом, при пайке ими необходимо применять 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 реактивной диффузии в шве образуется сплав, работоспособный при 2000°C [59]. Преимуществом этого припоя является то, что пайку вольфрама можно производить 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 конструкции, 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. По этим причинам пайку молибдена необходимо производить в глубоком вакууме или в среде аргона, тщательно очищенном 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—60° С.

В качестве припоев 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 129,4 Мн/м² (13,2 кг/мм²) при 980° С.

Если пайка производится при температурах выше температуры рекристаллизации молибдена (около 1100° С), 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° С составляет 216—226 Мн/м² (22—23 кг/мм²).

Тантал имеет температуру плавления 2996° С и плотность 16,6 г/см³. В отличие от рассмотренных тугоплавких металлов — вольфрама и молибдена — он обладает высокой пластичностью.

Тантал интенсивно поглощает газы при нагревании, поэтому при пайке тантала предпочтителен вакуум не ниже $1,33 \cdot 10^{-2}$ н/м² (10^{-4} 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 указанных металлов, например припой, содержащий 85 % Ti и 15 % Mo, дает возможность производить пайку при 1850° С.

Ниобий имеет температуру плавления 2468° С и плотность 8,57 г/см³. 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 по пайке ниобия и его сплавов можно дать технологические рекомендации, аналогичные тем, которые даны по пайке тантала.

Для получения высокопрочных и пластичных паяных соединений целесообразно для пайки ниобия применять чистые металлы: титан, ванадий, цирконий, которые образуют с ниобием неограниченные твердые растворы.

На основе указанных металлов можно получить пластичные припои и жаропрочные паяные соединения, однако все они слишком тугоплавки и требуют оборудования, позволяющего производить пайку в высоком вакууме при температурах 1600—1900° С. Поэтому 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 186 Мн/м² (19 кГ/мм²), а удлинение до 85%, при температуре 1500°С его предел прочности составляет 29,4 Мн/м² (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 тот факт, что запасы хрома в земной коре превышают запасы остальных тугоплавких металлов, взятых вместе.

Задача о пайке хрома и сплавов на его основе находится сейчас в стадии разработки. Главной трудностью при пайке является необходимость удаления с поверхности хрома весьма стойкой окиси Cr₂O₃. Пайку хрома нужно вести в высоком вакууме не ниже $1,33 \cdot 10^{-2}$ н/м² (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 минимумом температуры 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 покрываются никелем слоем 10—20 мкм, после чего подвергаются термической обработке при температуре 200°—250°С в течение 1 ч для улучшения сцепления покрытия с основным металлом. Пайка по покрытию осуществляется согласно рекомендациям, приведенным для никеля.

§ 8. Пайка бериллия

Бериллий наряду с исключительной легкостью (плотность 1,84 г/см³) сочетает в себе высокую прочность (56 кГ/мм²) с довольно высокой (1283°С) температурой плавления. 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 0,45—0,50 дм^3 (450—500 *мл*) ортофосфорной кислоты, 50—55 г хромового ангидрида и 0,025—0,030 дм^3 (25—30 *мл*) концентрированной серной кислоты. При подогреве раствора до 50—60° С он растворяет окисную пленку 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 с вакуумом $1,33 \cdot 10^{-3}$ — $1,33 \cdot 10^{-4}$ н/м^2 (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 88,2 Мн/м^2 (9 кг/мм^2) до 186,5 Мн/м^2 (19 кг/мм^2) при выдержке в течение 96 ч. При скоростной пайке бериллия серебряным припоем прочность паяного шва получается около 98 Мн/м^2 (10 кг/мм^2). 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 98—147 Мн/м^2 (10—15 кг/мм^2).

При низкотемпературной пайке бериллия используют никелевые покрытия, которые облегчают затекание припоя в зазор при использовании флюса 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 механическим способом. 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.

Самым старым способом пайки алюминия следует считать пайку трением, т. е. способ пайки алюминия низкотемпературными припоями при удалении окисной пленки механическим путем в процессе пайки.

При пайке трением соединяемые детали нагревают до температуры плавления припоя, на них наносят припой и удаляют окисную пленку алюминия режущим инструментом, паяльником или

стальной щеткой под слоем расплавленного припоя. Расплавленный припой предохраняет очищенные места от соприкосновения с воздухом и вступает во взаимодействие с основным металлом по мере удаления окисной пленки. Иногда при пайке трением применяют канифоль или стеарин в качестве покровного флюса.

Пайка, трением удаётся любым припоем, который сплавляется с алюминием, и особенно хорошо проходит с припоями, содержащими цинк. Главнейшими недостатками этого метода являются большая трудоемкость процесса пайки и слабая устойчивость шва против коррозии. Поэтому пайка трением недопустима для соединения ответственных деталей, особенно работающих в условиях, способствующих развитию коррозии.

В последнее десятилетие появились два новых способа пайки алюминия, в которых процесс механического удаления окисной пленки в процессе пайки значительно ускоряется. Это, во-первых, абразивная пайка алюминия, предложенная Я. М. Каневским, и, во-вторых, ультразвуковая пайка алюминия. При абразивной пайке асбест, выполняющий роль абразива, легко снимает с поверхности нагретого алюминия окисную пленку, а содержащийся в паяльном стержне припой, оплаваясь в контакте с алюминием, облуживает его поверхность. После облуживания паяемые детали нагреваются до оплавления припоя, сжимаются между собой и охлаждаются. Полученные таким образом паяные соединения первоначально обладают достаточной прочностью, но при эксплуатации во влажной атмосфере или в воде довольно быстро снижают свою прочность в результате коррозии. Это объясняется тем, что применяемые при абразивной пайке оловянно-цинковые припои имеют большую разность нормальных электродных потенциалов по сравнению с алюминием, что является причиной электрохимической коррозии.

Соединения, полученные с помощью ультразвукового паяльника, так же как и соединения, полученные абразивной пайкой, требуют нанесения гидрофобных (водоотталкивающих) покрытий, без которых их можно эксплуатировать только в комнатных условиях или в обезвоженных средах. Единственным преимуществом ультразвуковой и абразивной пайки по сравнению с пайкой трением является улучшение процесса удаления окисной пленки с поверхности алюминия в процессе пайки.

Наиболее надежные паяные соединения удаётся 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 очищается путем травления в щелочах, затем осветляется 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 на 400—500° С в паяное соединение 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 является более трудным из-за его высокой температуры плавления, близкой к температуре плавления алюминия и его сплавов. Преимуществом соединений, паяных силумином, является высокая стойкость против коррозии даже в морской воде.

Наибольшее распространение при пайке алюминия горелкой нашел 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 припои, 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, что видно через окно печи, детали немедленно выгружают из печи и охлаждают на воздухе.

В случае пайки в соляной ванне применяются флюсы без хлористого цинка (табл. 46), разработанные под руководством Б. А. Максимихина. 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 (Ф 320, Ф 380 и 34А). Во избежание коррозии немедленно после пайки нужно промыть детали от остатков флюса в проточной воде в течение 15—20 мин и обработать в 5 %-ном растворе хромового ангидрида (5—10 мин).

Высокотемпературная пайка с флюсом как горелкой, в печах, так и в соляной ванне снижает прочность закаленных алюминиевых сплавов, переводя их в отожженное состояние, поэтому пайка с флюсом типа 34А не может применяться для таких алюминиевых сплавов, температура 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 они еще не доведены до возможности применения в промышленности.

Наиболее интересны попытки решить задачу бесфлюсовой пайки алюминия путем контактно-реактивной пайки. В этом случае на поверхность алюминия наносятся медь, серебро, цинк и другие металлы, которые образуют с алюминием эвтектику и имеют вместе с тем ограниченную область твердых растворов, позволяющую за счет диффузии упрочнять паяные соединения. При необходимости произвести пайку алюминиевых деталей низкотемпературными припоями следует покрыть их поверхность химическим никелем, термически обработать при 250°C 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.

§ 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 находят 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. По этим причинам общепринятая технология пайки конструкционных магниевых сплавов до сих пор не разработана.

При подготовке деталей из магниевых сплавов к пайке особое внимание уделяется очистке соединяемых поверхностей. С поверхности металла должны быть тщательно удалены покрытия, консервирующая смазка 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 применяют увеличенные

зазоры порядка 0,2—0,25 мм. Флюсы (табл. 8) применяются в виде порошка или паст, замешанных на безводном спирте. При пайке горелкой применяется флюс в виде сухого порошка или пасты на спирте.

В качестве припоев (табл. 25) 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 применении нагрева 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 детали подогреваются до 300—350° С. После пайки детали охлаждают и промывают в проточной воде. Затем производится обработка в специальном растворе, содержащем хромовую кислоту, с последующим кипячением в течение 2 ч в 5%-ном растворе хромпика. После такой обработки паяные магниевые детали оксидируются и на них наносятся лакокрасочные покрытия.

§ 11. Пайка металлов с неметаллическими материалами

Пайкой можно получить соединения металлов со стеклом, кварцем, фарфором, керамикой, графитом, полупроводниками и другими неметаллическими материалами. Ввиду различия в физико-химических свойствах металлов и неметаллических материалов природа связи в паяных швах будет иной, 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 паяного соединения происходит между металлом и окислами элементов. При пайке металлов с графитом и полупроводниками соединение создается 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 паяного шва при пайке металлов с неметаллами в настоящее время находится в стадии изучения.

Технологические процессы получения паяных соединений между металлами и неметаллическими материалами можно разделить на три группы:

1. Процессы, при которых соединение между металлами и неметаллами образуется в результате введения между ними в процессе пайки металлического припоя.

2. Процессы, при которых соединение между металлами и неметаллами, предварительно покрытыми различными способами слоем металлов, образуются путем пайки нанесенных металлопокрытий припоями.

3. Процессы, при которых соединение между металлами и неметаллами образуется в результате введения между ними легкоплавких стекла, глазури или эмали.

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. Это имеет место, например, при пайке титана или железо-никеле-кобальтового сплава с высокоглиноземистой керамикой или кварцем.

Основные трудности при пайке кварца с металлами вызываются большим различием коэффициентов линейного расширения соединяемых пар, который у неметаллических материалов в 5—7 раз меньше, чем у металлов.

Соединение металлов с неметаллами в результате совместного смачивания их расплавленным припоем имеет место также при пайке металлов с графитом. Для получения паяного соединения необходимо, чтобы припой одновременно хорошо смачивал оба материала. Для этого также используются 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 дает соединения, устойчивые в среде расплавленных солей [55].

Вторая группа технологических процессов соединения металлов с неметаллами, когда на неметаллический материал перед пайкой наносится пленка 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 наносится 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 соединение ее с металлической деталью производится 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 металла со стеклом, последнее 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 [44].

Третий случай соединения металлов с неметаллами путем применения переходных слоев из стекла, глазури, эмали находит также большое применение. В спаях металла со стеклом, получаемых с применением легкоплавких промежуточных стекол, опасность образования трещин уменьшается, так как напряжения в контакте металл-стекло оказываются значительно ниже, чем в спаях без переходного стекла. Этот способ позволяет производить предварительное покрытие металла стеклом при строго определенных режимах, а последующее соединение элементов изделия сводится к 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.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПАЙКИ

§ 1. Печи для пайки

Применение печного нагрева наиболее соответствует технологическим особенностям процесса 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 производится путем применения флюсов, контролируемых атмосфер и вакуума. Пайка в печи при применении контролируемых атмосфер и средств механизации

ции является наиболее совершенным процессом получения паяных изделий.

В комплекс оборудования, применяемого при печной пайке, входят печи с устройствами для транспортировки паяемых деталей, установки для производства контролируемых атмосфер или создания вакуума и приспособления для сборки и пайки. Применяемые печи по конструктивным особенностям и условиям нагрева паяемых деталей делятся на следующие группы: печи с ручной подачей; печи с роликовым подом; печи с ленточным конвейером; шахтные, колпаковые и элеваторные печи; вакуумные печи.

В электропечах сопротивления с воздушной атмосферой в качестве нагревателей используются главным образом сплавы на никеле-хромовой и железо-хромо-алюминиевой основах. Нагреватели на никеле-хромовой основе, например сплав ЭИ 626, обеспечивают максимальный нагрев изделия до температуры 1200°C . Нагреватели на железо-хромо-алюминиевой 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 порядка 1300°C . В последнее время начинают находить применение стержни из дисилицида молибдена, которые в воздушной атмосфере обеспечивают нагрев печей до 1700°C . В случае необходимости повышения температуры в печах 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. 86 [43]. Печь состоит из двух камер, заключенных в металлический кожух 5. Подготовленные к пайке детали подаются в печь вручную, в противнях, на поддонах, решетках и т. п., которые перед подачей в печь устанавливаются на столик 11. Через входную дверцу 7 детали продвигаются в камеру нагрева 1, обогреваемую нагревательными элементами 3. Для замера температуры в камере нагрева установлена термопара 10. Камера нагрева отделена от камеры охлаждения 6 средними керамическими дверцами 8. При перемещении деталей из камеры нагрева в камеру охлаждения средние керамические дверцы на короткое время открываются. Для регулирования температуры охлаждающей воды, которая должна поддерживаться на уровне 80°C , установлен термостат 4. Детали из камеры охлаждения выгружаются через заднюю дверцу 9 на разгрузочный столик 12. В момент открытия входной или задней дверцы газовая

атмосфера печи выходит и загорается. Одновременно загорается газовый заслон 2, который предохраняет от попадания в камеру нагрева или охлаждения атмосферного воздуха. Обслуживание печи с обоих концов 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. Общий вид печи с ручной подачей представлен на рис. 87.

Печи с роликовым подом наиболее выгодны для пайки деталей больших размеров и веса. Под в таких печах может быть выполнен

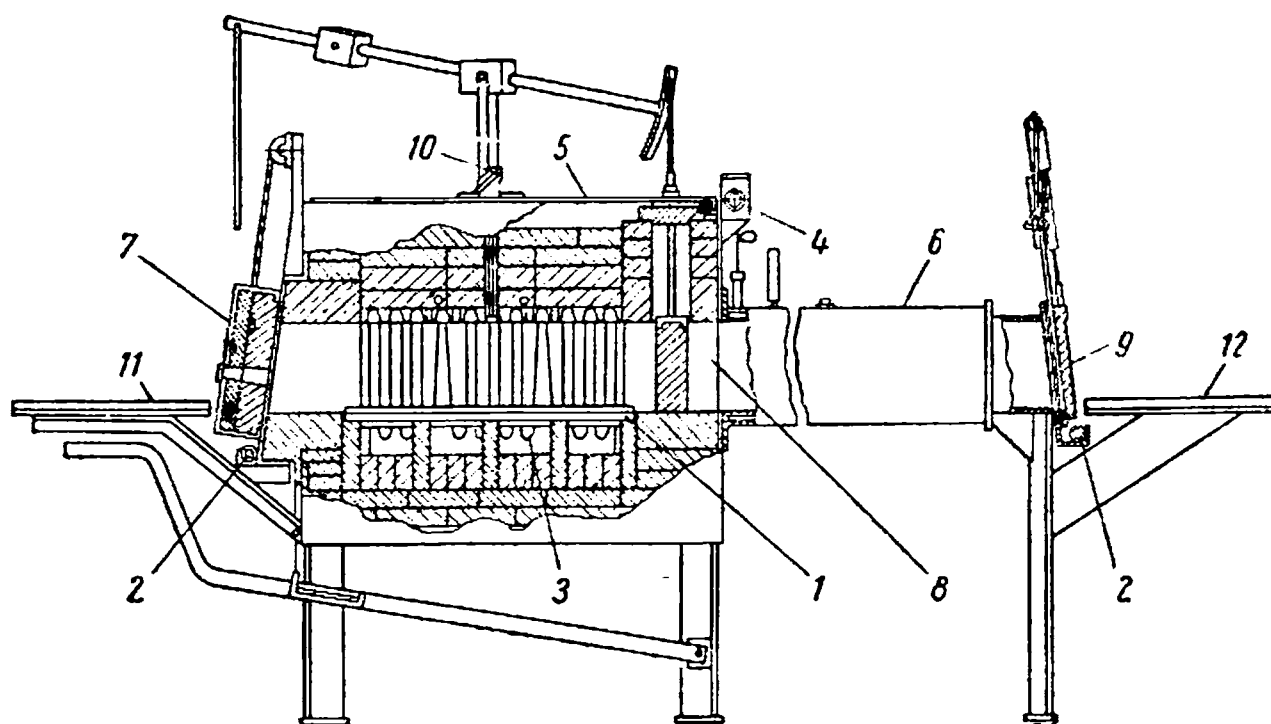


Рис. 86. Схема печи с ручной подачей

в виде роликового конвейера. Ролики, на которые устанавливаются паяемые детали, с одинаковой скоростью приводятся во вращение бесконечной цепью. Печи с роликовым подом обычно конструируются из трех камер: камера подогрева, камера нагрева и камера охлаждения. Когда происходит загрузка деталей в камеру 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 продувается контролируемой атмосферой. Когда дверца отсека нагрева открыта, скорость вращения роликов увеличивается, пока детали с большей скоростью не переместятся из камеры подогрева в камеру нагрева. Как только 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

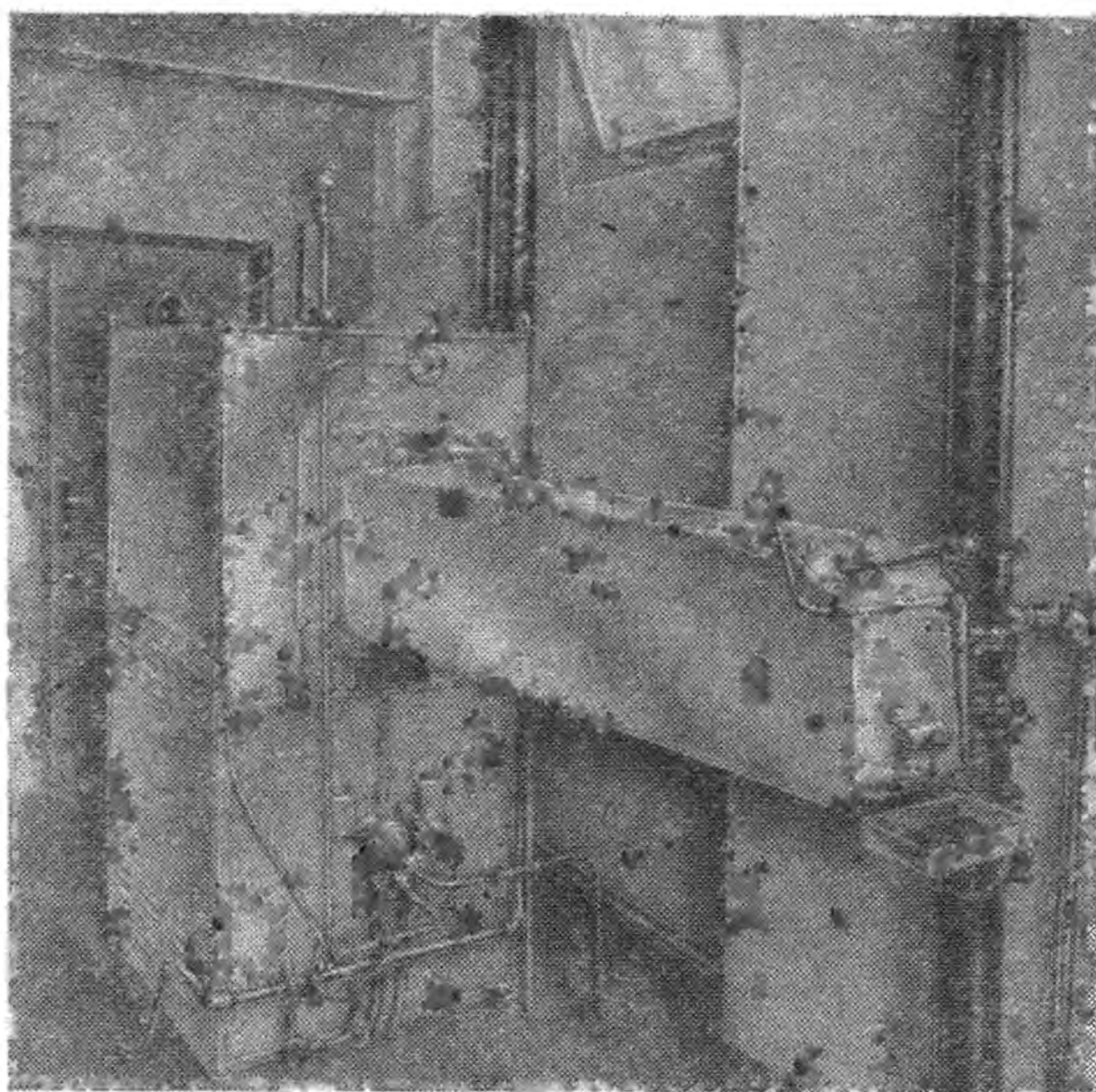


Рис. 87. Общий вид печи с ручной подачей деталей
(со стороны выхода)

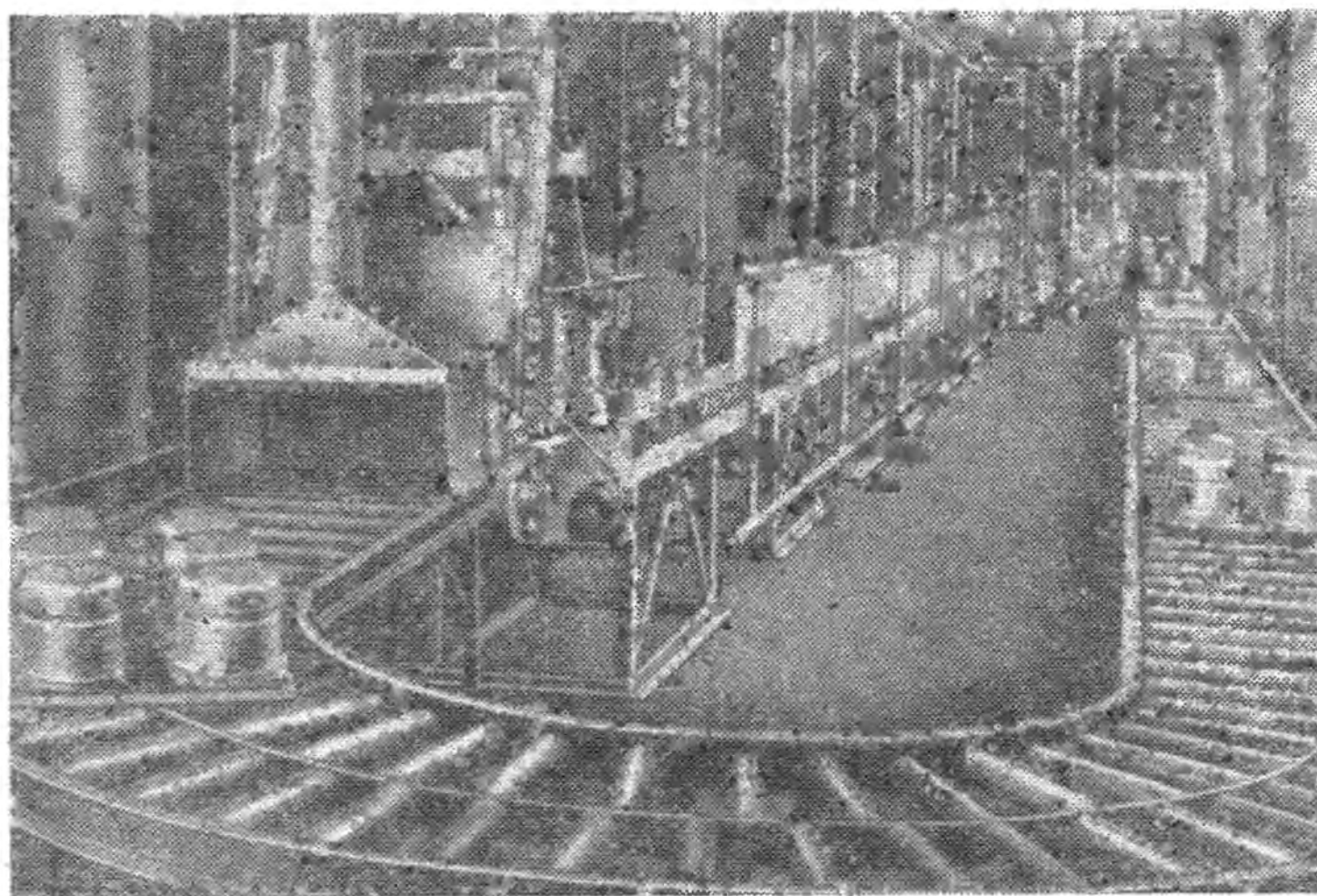


Рис. 88. Общий вид печи с роликовым конвейером

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 10—500 кг/ч (рис. 88).

Печи с ленточным конвейером применяются в серийном или массовом производстве паяных деталей. Схема такой печи с восстановительной атмосферой приведена на рис. 89. Печь состоит

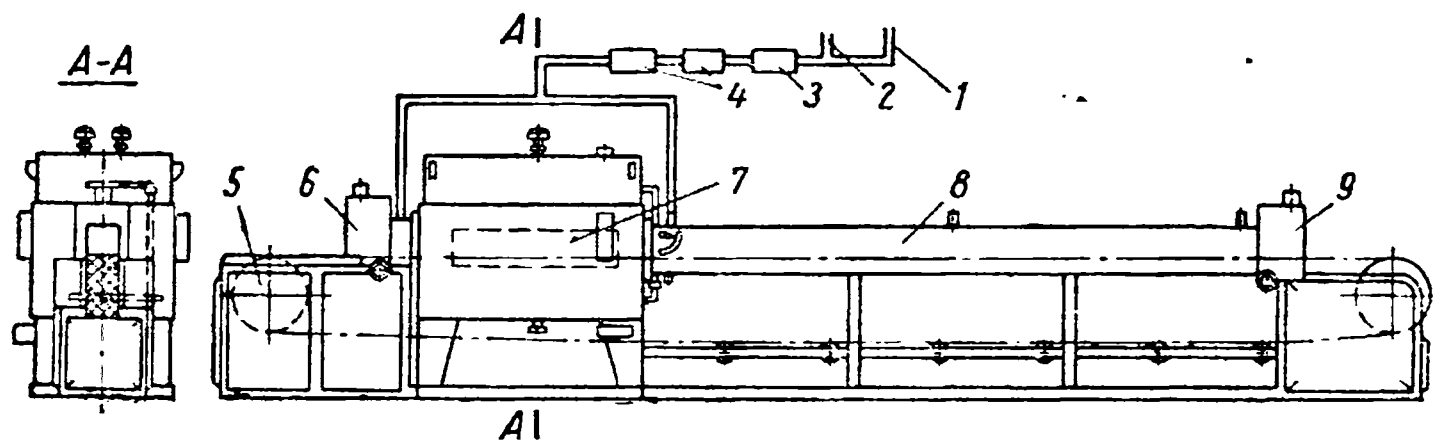


Рис. 89. Схема печи с ленточным конвейером

из камеры предварительного подогрева (входа) 6, камеры пайки 7 и камеры охлаждения в виде канала 8. Паяемые детали, подаваемые на подвесную ленту конвейера 5, последовательно проходят камеру 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, предупреждающий проникновение воздуха в пространство печи. Размер отверстий на входе и выходе печи регулируется при помощи подвижных устанавливаемых в соответствии с высотой деталей дверец печи. Для дополнительной защиты пространства печи от проникновения воздуха на входе и выходе иногда подвешиваются подвижные заслоны из асбестовой ткани. Общий вид печи с ленточным конвейером приведен на рис. 90.

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 происходит постепенное снижение их температуры. По выходе из охлаждающего канала температура нагрева деталей снижается настолько, что их можно брать руками. Увеличение скорости конвейера ограничивают условия нагрева деталей и скорость охлаждения после пайки. За время продвижения в камере

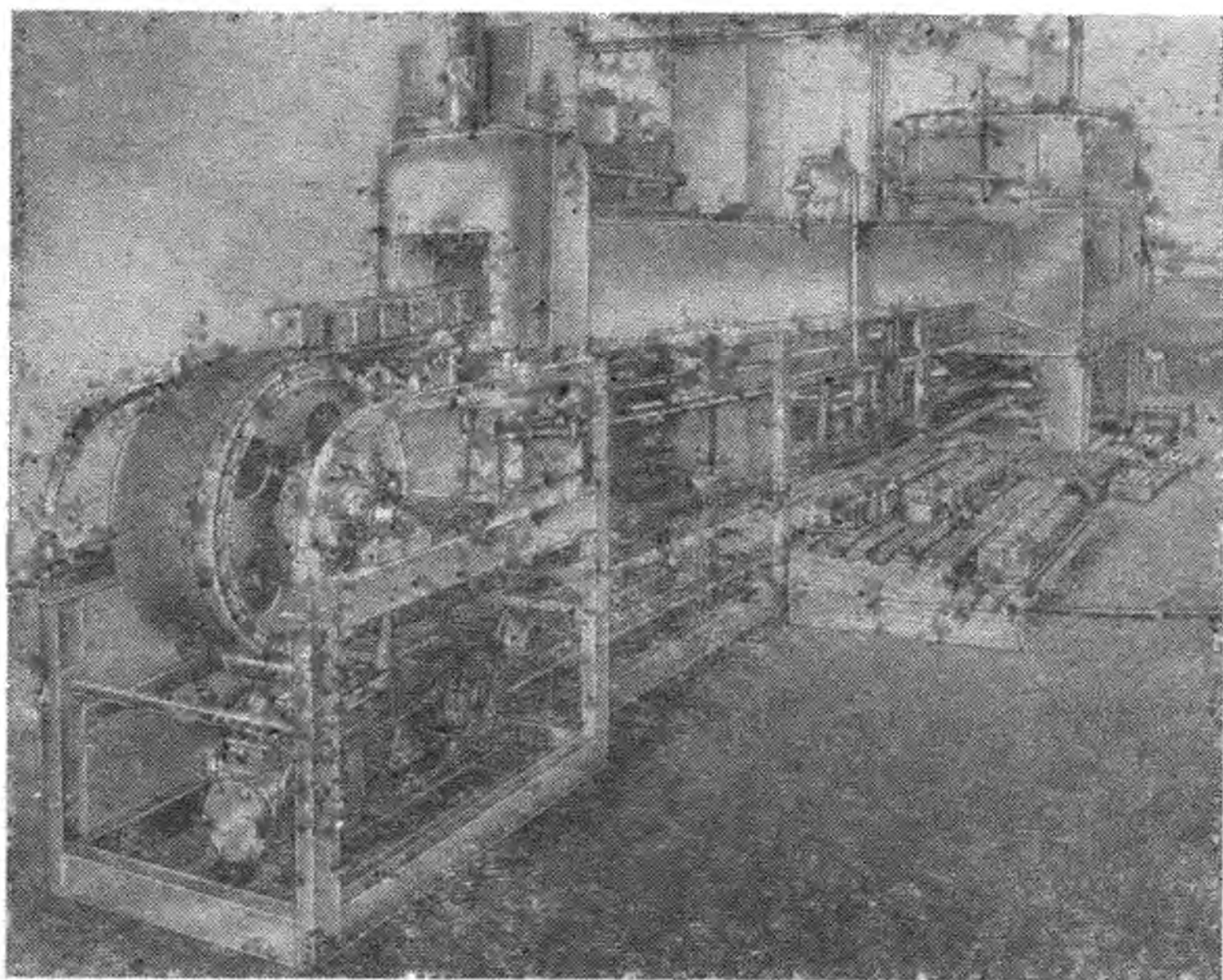


Рис. 90. Общий вид печи с ленточным конвейером

нагрева паяемое соединение должно равномерно прогреваться до температуры пайки. После охлаждения температура деталей не должна быть настолько высокой, чтобы вызывать появление на их поверхности цветов побежалости.

На рис. 91 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 выше 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 достигает до 294 н/м^2 (30 кг/м^2). Эта нагрузка при увеличении длины камеры нагрева печи снижается. Конвейерные печи с горизонтальным расположением пода применяются для пайки деталей из углеродистых сталей. Для пайки деталей из нержавеющей сталей применяются печи с наклонным входом и выходом из печи. Наклонный вход и выход по сравнению с горизонтальным 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 до точки росы от -50 до -60°C ,

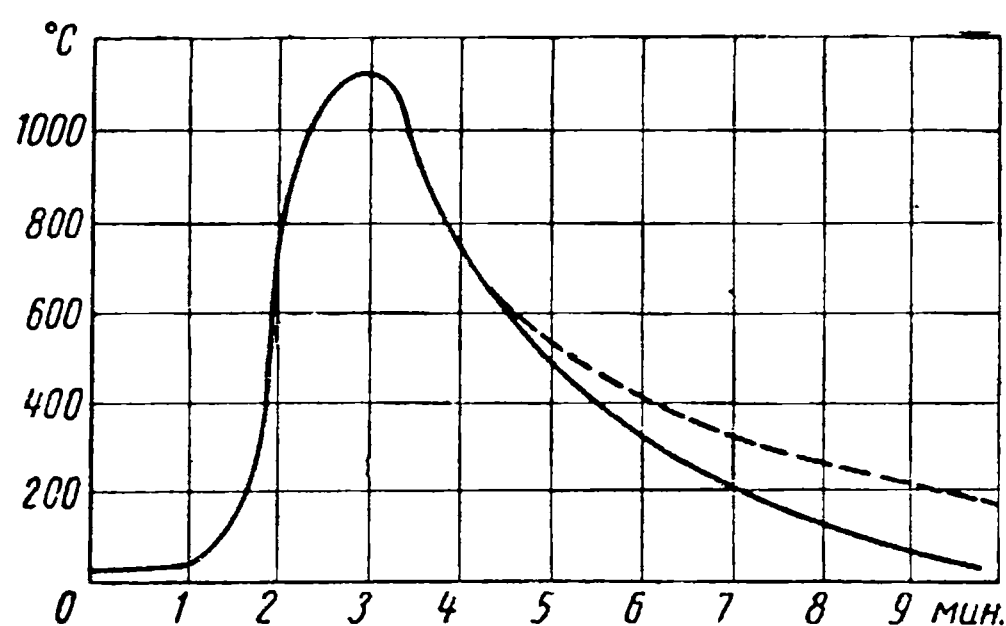


Рис. 91. График цикла нагрева и охлаждения при пайке в печи с восстановительной атмосферой

на входе и выходе из печи газ также сгорает, образуя пламя, защищающее печное пространство.

Шахтные, колпаковые и элеваторные печи. Для пайки деталей больших размеров в контролируемой атмосфере применяются шахтные, колпаковые и элеваторные печи. Производительность шахтных печей низкая. Они применяются для индивидуальной или мелкогрупповой

пайки стальных деталей. В колпаковых печах, также предназначенных для индивидуальной пайки массивных деталей, стенки со сводом печи представляют собой съемный колпак, имеющий в сечении, перпендикулярном вертикальной оси печи, круглую, квадратную или прямоугольную форму. Паяемая деталь собирается и устанавливается непосредственно на поду печи при снятом колпаке. После сборки паяемой детали колпак печи устанавливается и уплотняется. Печь заполняется контролируемой атмосферой под небольшим избыточным давлением, и производится нагрев печи. После пайки и охлаждения колпак печи снимается и паяные детали снимаются 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 вызывает некоторые трудности 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 делается в виде тележки. В элеваторных печах также произ-

водится индивидуальная пайка крупногабаритных деталей. После установки детали на под печи он поднимается, печь герметизируется, продувается контролируемой атмосферой и производится нагрев. После соответствующей выдержки питание током отключается и производится охлаждение вместе с печью. Для элеваторных печей требуется меньшая, чем для колпаковых, высота цеха. Элеваторные печи нашли применение главным образом для пайки деталей из нержавеющей сталей. Недостатком их является большая продолжительность цикла пайки в случае, когда после пайки требуется высокая чистота поверхности деталей.

Оборудование для пайки в вакууме. ✓

При пайке в вакууме паяемые детали могут помещаться в контейнеры, в которых создается необходимый вакуум или вакуумируется пространство печи, в которой производится пайка. В течение всего цикла пайки пространство контейнера или печи необходимо вакуумировать. 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 давлением атмосферы 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. 92. В вакуумноплотный корпус печи 1 с нагревателями 2 устанавливается вакуумноплотный контейнер 3, герметично закрывающийся крышкой 5. Вакуумирование производится через патрубки 4. Выступающая часть контейнера 6 охлаждается водой. В вакуумноплотном контейнере создается высокий вакуум, а в пространстве печи, в котором установлены нагревательные элементы для предупреждения сдавливания контейнера, иногда создается 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 собственного веса, так как детали в контейнере находятся в подвешенном состоянии. При создании вакуума в таких печах 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 ва-

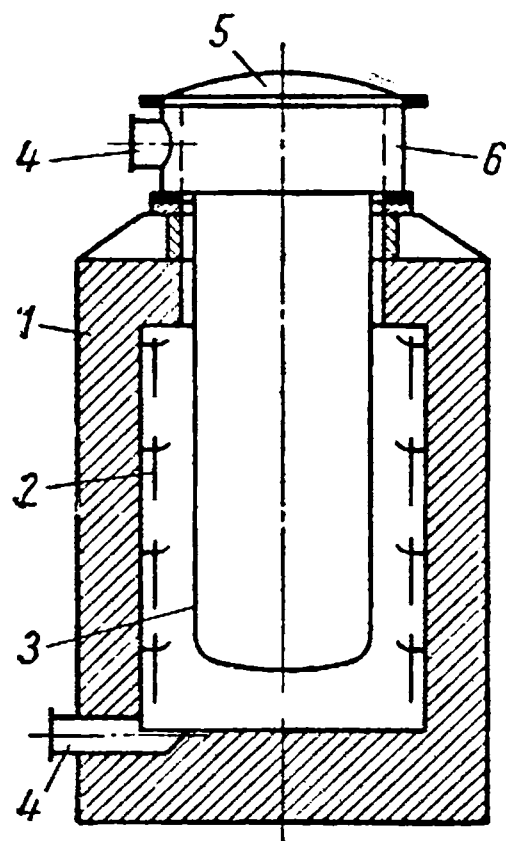


Рис. 92. Схема вакуумной печи

куумный 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 заполняется контролируемой атмосферой, которая повышает теплопроводность в объеме печи, что ускоряет снижение температуры.

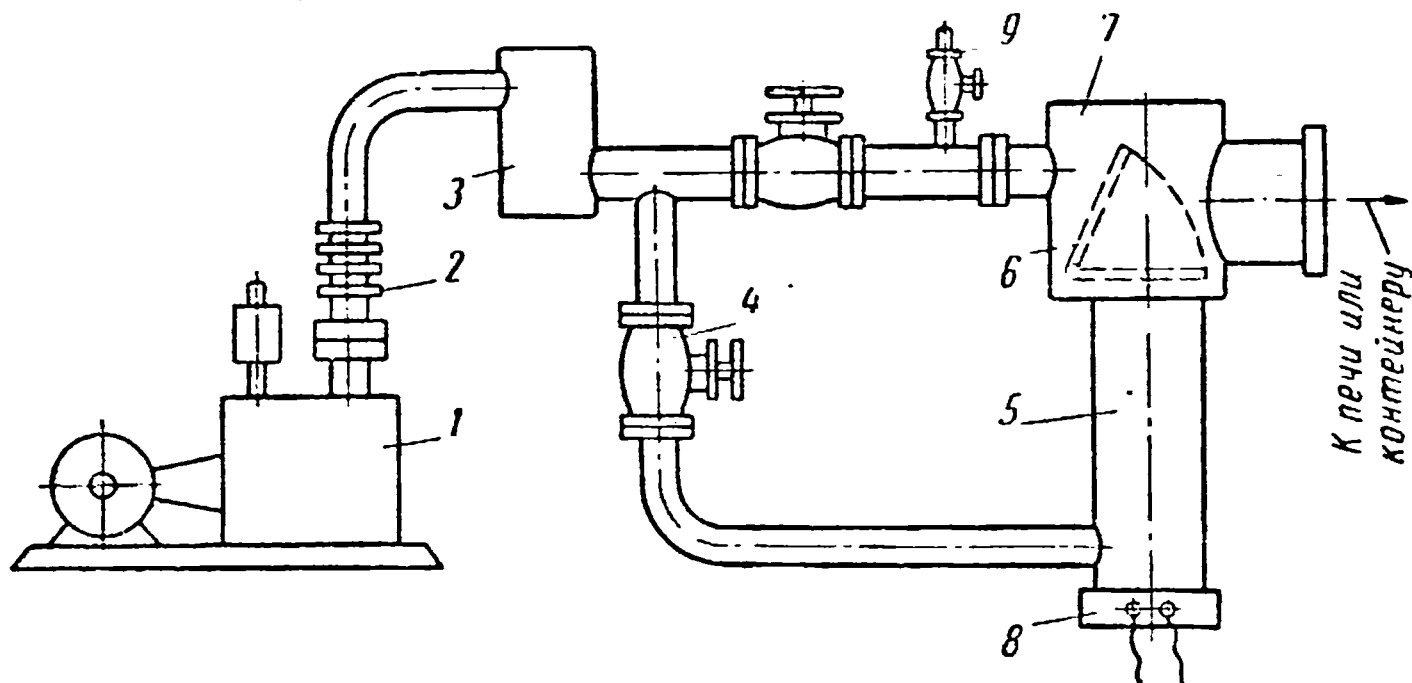


Рис. 93. Схема установки для создания высокого вакуума

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 припой, содержащие такие легко испаряющиеся элементы, как цинк, марганец, магний, 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 $1,33—1,33 \cdot 10^{-1} \text{ н/м}^2$ ($10^{-2}—10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$) применяются механические ротационные насосы. В установках для создания высокого вакуума порядка $1,33 \cdot 10^{-2}—1,33 \cdot 10^{-3} \text{ н/м}^2$ ($10^{-4}—10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$) применяются 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. 93) входит: ротационный (форвакуумный) насос 1, сильфонный компенсатор 2, предотвращающий распространение

вибраций от насоса, фильтр 3 для очистки откачиваемого воздуха от механических примесей, вакуумный вентиль 4, разобщающий насос с контейнером или печью, диффузионный насос 5. Вакуумный затвор диффузионного насоса 7 с заслонкой вакуумного затвора 6 служат для отсоединения диффузионного насоса от системы. Нагрев диффузионного насоса осуществляется нагревателем 8. Вентиль 9 служит для впуска в печь или контейнер воздуха или инертного газа. Характеристики механических ротационных вакуумных насосов приведены в табл. 40.

Таблица 40

Марка насоса	Средняя скорость откачки при давлении в 101,3 кН/м ² (760 мм рт. ст.) в дм ³ /сек (л/сек)	Предельный вакуум в н/м ² (мм. рт. ст.)	Мощность двигателя в кВт	Масса в кг
ВН-461М	0,81	1,33 · 10 ⁻¹ (1 · 10 ⁻³)	0,6	75
РВН-20	3,3	6,65 · 10 ⁻¹ (5 · 10 ⁻³)	0,6	75
ВН-2Г	7,0	3,99 · 10 ⁻¹ (3 · 10 ⁻³)	1,7	108
ВН-1МГ	18,3	3,99 · 10 ⁻¹ (3 · 10 ⁻³)	2,8	312
ВН-4Г	59,0	6,65 · 10 ⁻¹ (5 · 10 ⁻³)	7,0	590
ВН-6Г	155,0	1,33 (1 · 10 ⁻²)	18,0	1521

Диффузионный насос в комплекте с затвором составляют вакуумный агрегат. Основные характеристики высоковакуумных агрегатов приведены в табл. 41.

Таблица 41

Тип агрегата	Средняя скорость откачки при давлении 1,33 · 10 ⁻³ — 2,66 · 10 ⁻² н/м ² (1 · 10 ⁻⁵ — 2 · 10 ⁻⁴ мм рт. ст.) в дм ³ /сек (л/сек)	Масса в кг	Расход охлаждающей воды в дм ³ /сек (л/ч)	Рекомендуемый насос предварительного разрежения
ВА-01-1	50	43	0,014 (50)	ВН-461М: РВН-20
ВА-05-1	250	85	0,033 (120)	ВН-2Г
ВА-5-4	2200	330	0,11 (400)	ВН-1МГ
ВА-8-4	4000	476	0,14 (500)	ВН-1МГ

Предельный вакуум, создаваемый высоковакуумными агрегатами указанного типа, составляет 6,65 · 10⁻⁴ н/м² (5 · 10⁻⁶ мм рт. ст.).

Механические ротационные насосы ВН-461М, РВН-20, ВН-2Г и вакуумные агрегаты ВА-01-1 и ВА-05-1 применяются в лабораториях и в небольших производственных установках; насос ВН-1МГ и вакуумные агрегаты ВА-5-4 и ВА-8-4 — в крупных лабораторных и в среднего размера производственных установках.

Для измерения вакуума до $1,33 \cdot 10^2$ н/м² (1 мм рт. ст.) применяются пружинные манометры. При вакууме до $1,33 \cdot 10^{-1}$ н/м² (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.

Контейнеры. Применяемые при пайке в вакууме и в контролируемых газовых средах контейнеры разделяются на жесткие и мягкие. Жесткие контейнеры изготовляют обычно с помощью сварки из толстостенных труб жаропрочных сталей или сплавов. Мягкие контейнеры свариваются 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 заполняются контролируемой атмосферой, то они рассчитываются на внешнее давление в условиях комнатной температуры. Если заполнение газовой средой не производится, то расчет его ведется на температуру пайки. В процессе пайки контейнеры жесткой конструкции загружаются в печь только той частью, в которой помещены паяемые детали.

Схема контейнеров жесткой конструкции приведена на рис. 94. Контейнер (рис. 94, 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. 94, б, после загрузки деталей крышка приваривается герметичным швом к фланцу контейнера. На рис. 94, 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 применяются 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. В случае пайки в вакууме, второй штуцер может использоваться для установки термопары. Иногда листы, применяемые для изготовления мягких контейнеров, предварительно выштамповываются. Контейнеры изготов-

ляются из низкоуглеродистых сталей 10 и 20 или нержавеющей сталей Х18Н9Т и ЭИ811.

Установки для приготовления контролируемых атмосфер. Для защиты основного металла и припоя от окисления и создания условий для удаления окисной пленки с их поверхности при пайке

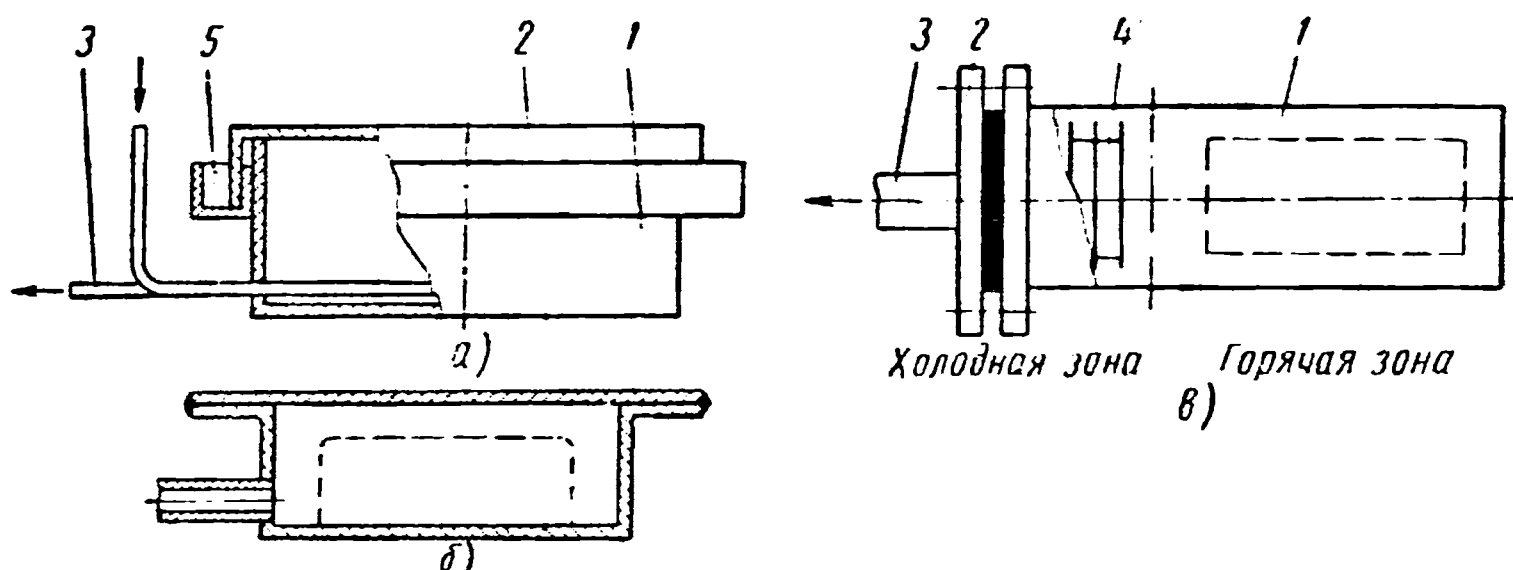


Рис. 94. Конструкция контейнеров, применяемых при пайке в вакууме и контролируемых средах

в печах чаще всего применяются восстановительные или защитные газовые атмосферы различного состава. Они могут быть однородными газами или газовыми смесями. Водород, азот, инертные газы поставляются, как правило, в баллонах, и при употреблении их производится тонкая очистка от примесей и осушка от паров

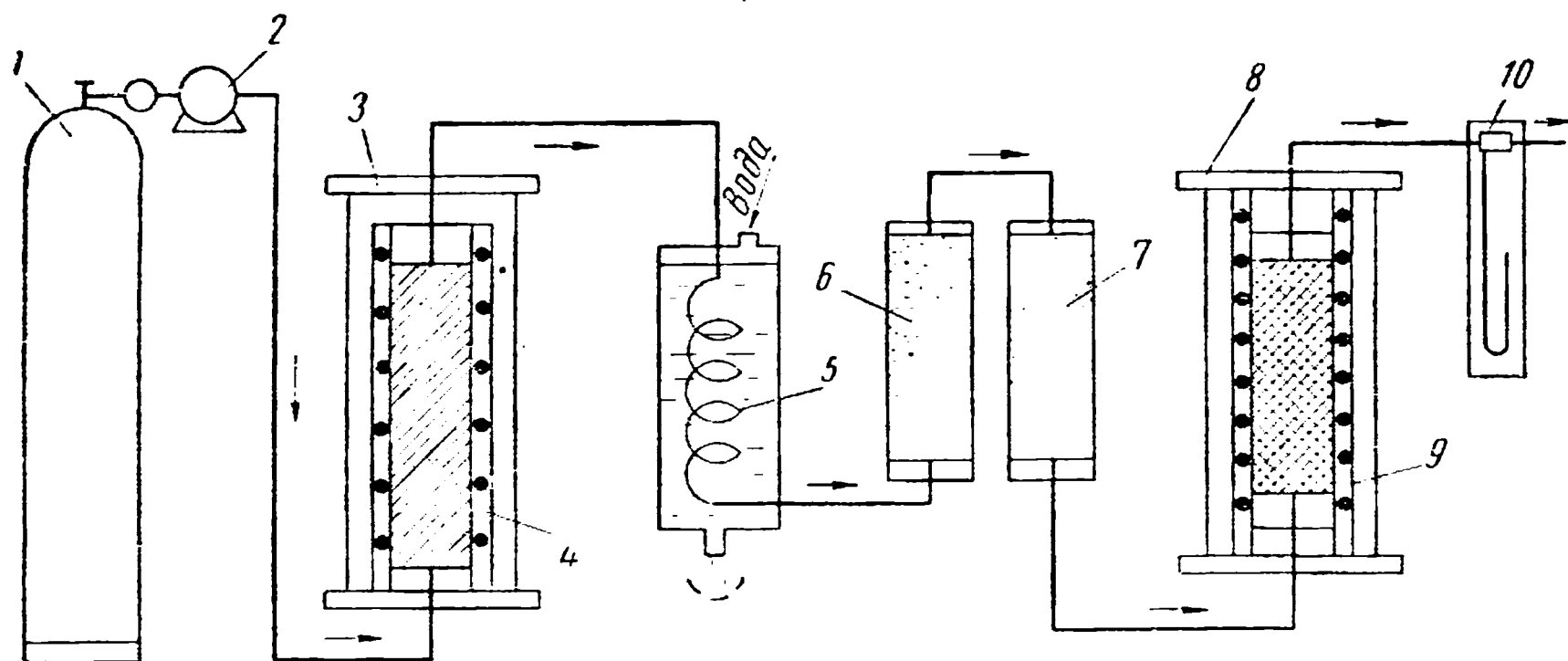


Рис. 95. Схема получения диссоциированного аммиака

воды. При применении контролируемых атмосфер сложного состава применяются специальные установки для получения и очистки газовых сред. На рис. 95 представлена схема приготовления контролируемой атмосферы из аммиака [14]. Основным агрегатом установки является диссоциатор 3 с помещенной внутри его ретортой 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 происходит расщепление его на водород и азот. Смесь этих газов проходит через змеевик 5, где охлаждается. После этого смесь газов направляется в сосуды с силикагелем 6 и алюмогелем 7, где происходит осушка газа. После осушки газ пропускается через медную стружку очистителя 8, подогретую нагревателями 9 до температуры 400—500° и поглощающую находящийся в газе кислород. Очищенная 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. В случае необходимости более тонкой очистки от кислорода и паров воды после реторты 8 устанавливается реторта с платиновым или дунитовым катализатором, кото-

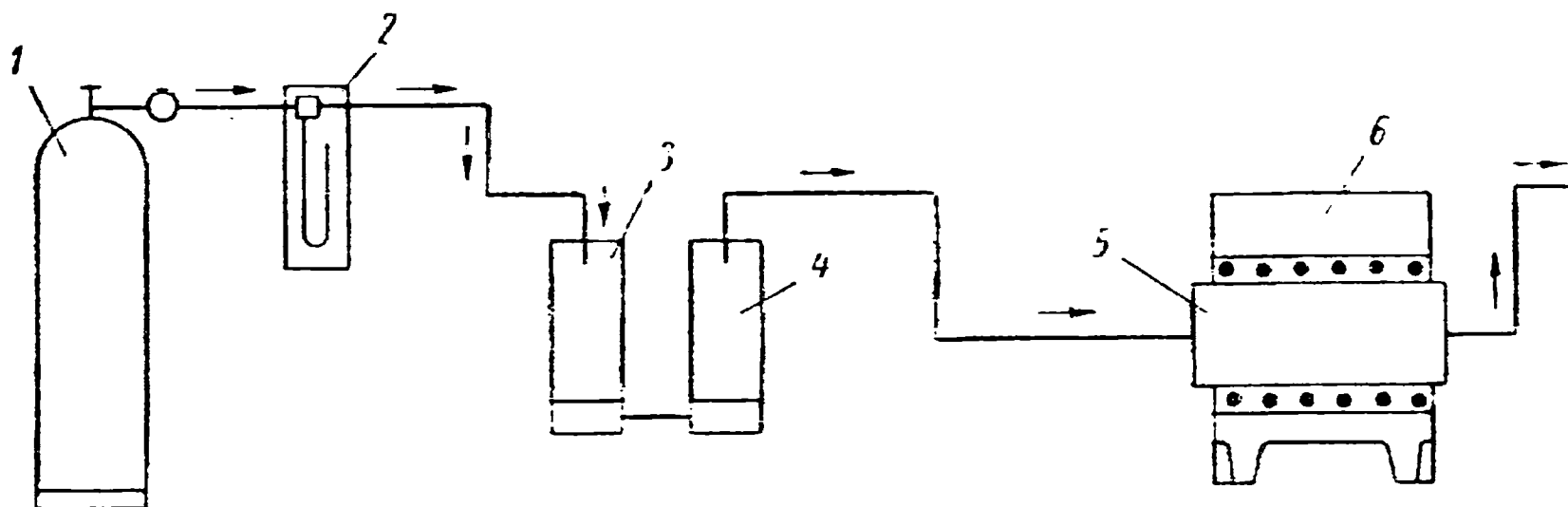


Рис. 96. Схема очистки аргона и гелия от кислорода, азота и влаги

рые обеспечивают соединение остатков кислорода с водородом. Пары воды, образовавшиеся в результате этой реакции, удаляются путем трехступенчатой осушки силикагелем, алюмогелем и окисью бария. Иногда вместо окиси бария применяется фосфорный ангидрид, смешанный со стеклянной ватой.

Схема приготовления контролируемой атмосферы путем частичного сжигания диссоциированного аммиака аналогична. В нее по сравнению с рассмотренной схемой между диссоциатором 3 и холодильником 5 входит камера сжигания. В этом случае, чтобы охладить продукты сгорания, холодильник должен быть более производительным.

При приготовлении контролируемых атмосфер путем частичного сжигания углеводородных газов применяются установки, в которых горючий газ сжигается в смеси с дозированным количеством воздуха. После этого продукты сгорания охлаждаются, очищаются от углекислого газа, подвергаются осушке и направляются в печь.

Инертные газы, применяемые при пайке, также нуждаются в очистке. Схема установки для очистки аргона и гелия от кислорода, азота и влаги представлена на рис. 96. Инертный газ из баллона 1 через ротаметр 2 проходит через сосуды с силикагелем 3 и алюмогелем 4, после чего осушенный газ пропускается через реторту 5 с титановой губкой или циркониевой стружкой, нагрет-

ваемой в печи 6 до температуры 850—920° С. После такой очистки аргон и гелий могут иметь точку росы до —75° С.

При пайке в восстановительных и защитных газовых средах качество паяных соединений в решающей степени 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 применяются машинные и ламповые генераторы. При применении высо-

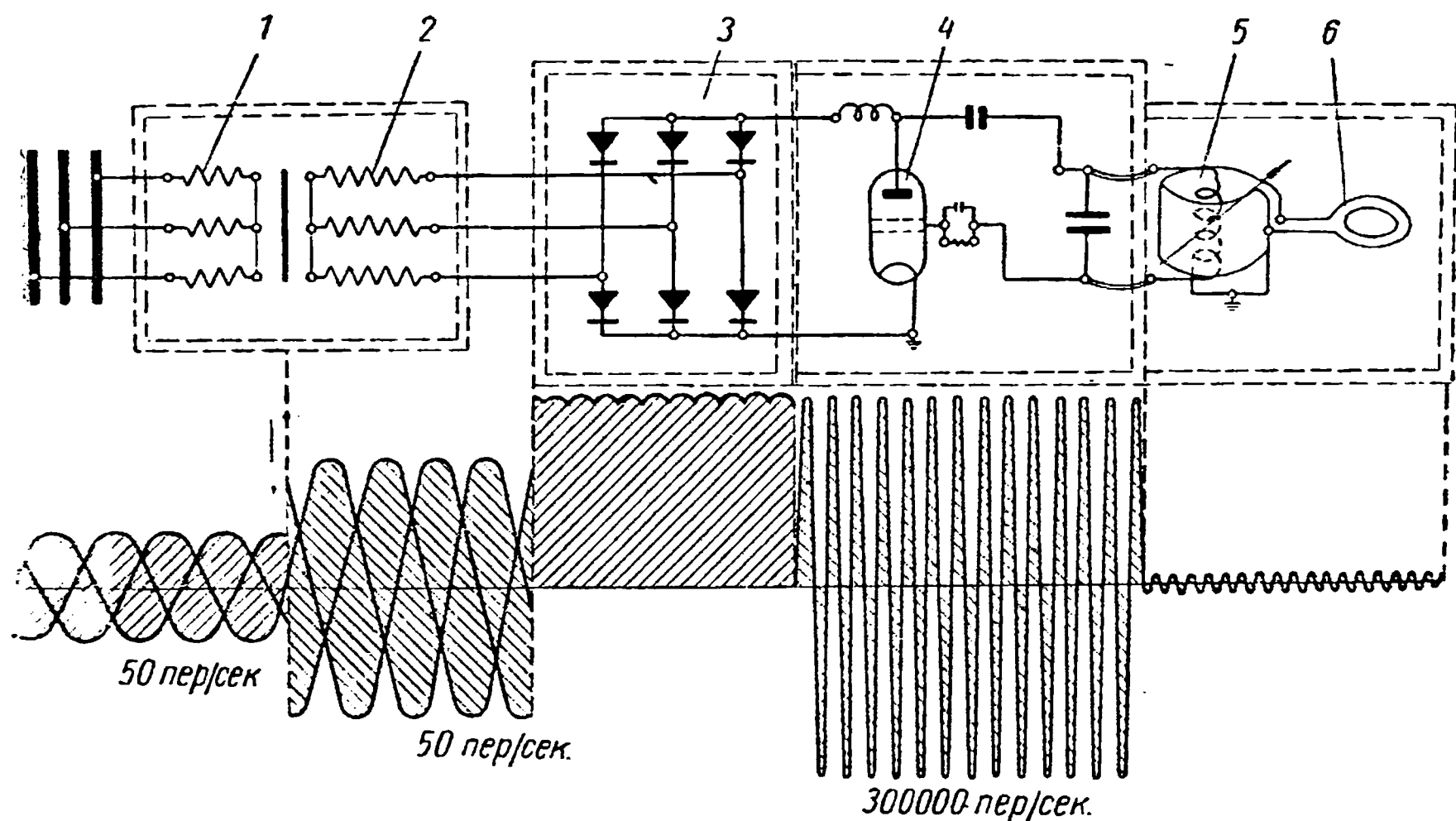


Рис. 97. Схема преобразования тока и нагрева при питании от лампового генератора

кочастотного нагрева различают повышенные частоты 500—10 000 гц и высокие — выше 50 000 гц. Частоты в интервале 10 000—50 000 гц в практике используются редко.

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. 97.

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 напря-

жения, 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

Таблица 42

Показатели	ЛГЗ-10А	ЛПЗ-37 ЛП-37 ЛЗ-37	ЛПЗ-67 ЛП-67 ЛЗ-37	ЛЗ-107	ЛЗ-207
Номинальная колебательная мощность в квт	8	30	60	100	200
Рабочая частота в кГц	300—450	60—74	60—74	60—74	60—74
Напряжение питающей сети трехфазного тока в в	220/380	380/220	380/220	380/220	380/220
Габаритные размеры в мм	1130×1100	ЛПЗ-4020×3500 ЛП-4020×2700 ЛЗ-4020×2200		4120×2200	4620×2800
Высота в мм	2120	2250	2250	2250	2250

Таблица 43

Наименование	ПВ 50/2500	ПВС-100/2500-1	ПВ-100/8000-1V	ВГО-500/2500
Генератор				
Мощность в квт	50	100	100	500
Напряжение в в	750/375	750/375	750/375	1000/500
Сила тока в а	74/148	148/296	148/296	500/1000
Частота в гц: при номинальной скорости вращения	2650	2650	—	—
при синхронной скорости вращения	—	—	8000	2500
Двигатель				
Мощность в квт	60	125	130	700
Напряжение в в	220/380	220/380	220/380	3000/6000
Частота в гц	50	50	50	50
Вес установки в кг	2100	3000	4000	7230

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 ламповыми генераторами приведены в табл. 42.

Машинные генераторы дают ток частотой 2—15 кгц и представляют установку из электродвигателя трехфазного тока и со-

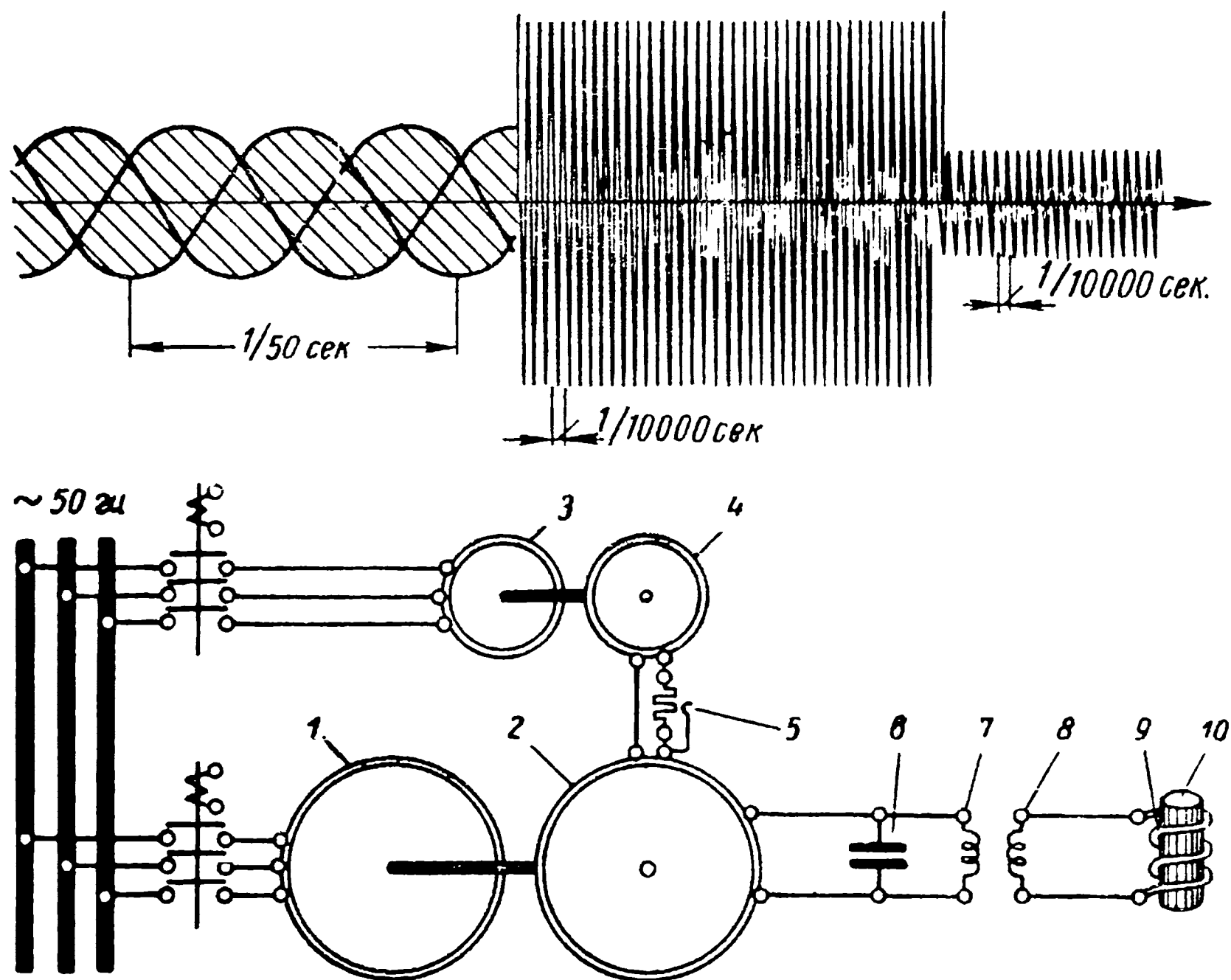


Рис. 98. Схема преобразования тока и нагрева при питании от машинного генератора

единенного с ним генератора, дающего ток повышенной частоты. Характеристики машинных генераторов, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 43.

Схема преобразования тока и нагрева с применением машинного генератора приведена на рис. 98. 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 возбуждателя 4. Регулирование возбуждения производится 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, соединяется с индуктором 9, внутри которого помещается паяемая деталь 10.

При понижении частоты тока глубина прогрева увеличивается, поэтому для более массивных паяемых деталей применяются генераторы частотой порядка 2500 гц. Для пайки тонкостенных деталей используют генераторы с частотой 8000 гц. Преимуществом

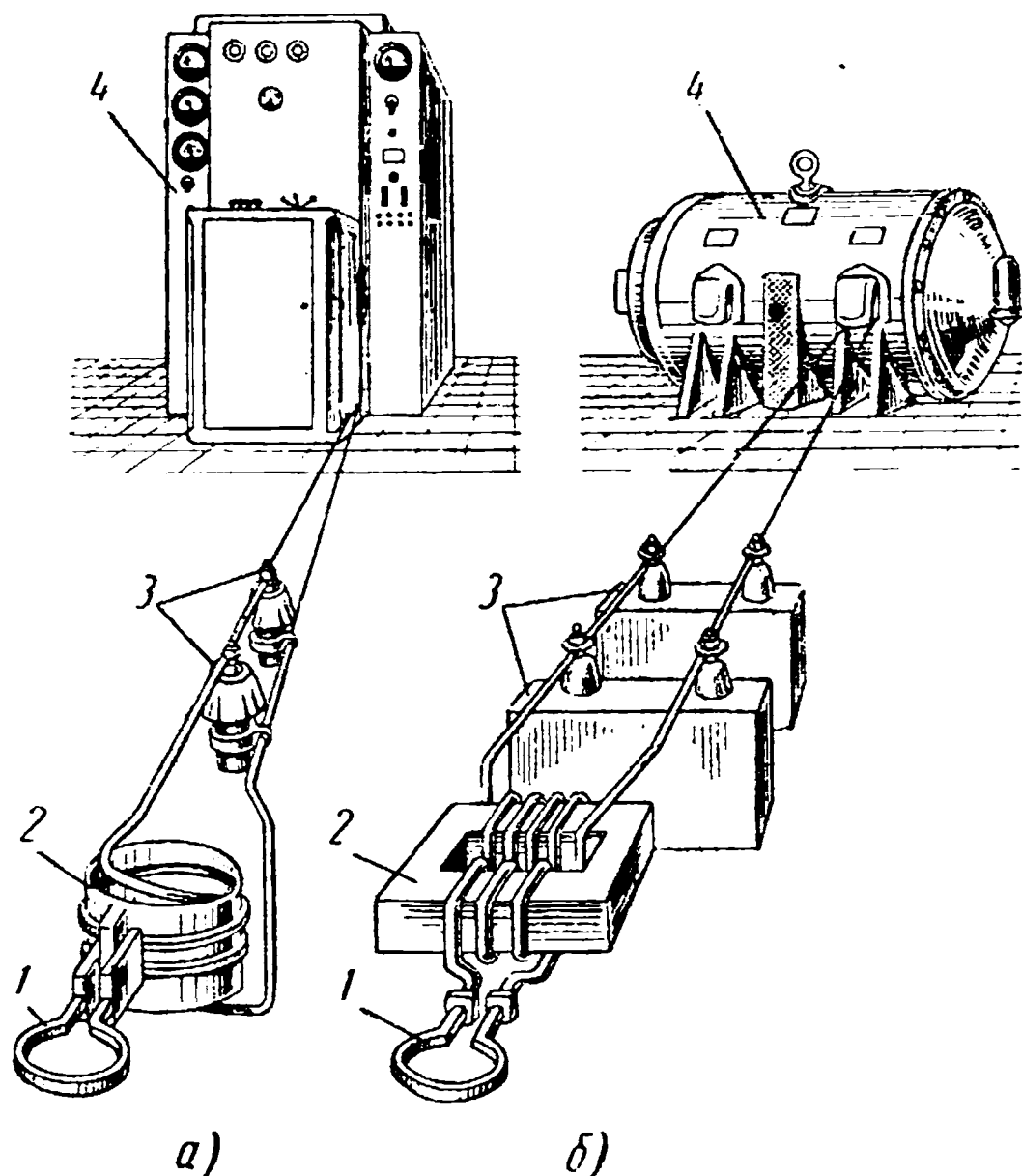


Рис. 99. Основные элементы высокочастотных установок с питанием от лампового (а) и машинного (б) генератора

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, что имеет место при применении ламповых генераторов, не имеющих экранировки.

Основные элементы высокочастотных установок при питании от ламповых и машинных генераторов приведены на рис. 99. При питании от лампового генератора (а) ток высокой частоты от генератора 4 через конденсаторную батарею 3 и воздушный понижающий трансформатор 2 подается на индуктор 1. При питании от машинного генератора (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 вызывают нагрев. Индуктор изготавливается из медной трубки, через которую для охлаждения пропускается вода. Применение для индукторов трубок прямоугольного сечения дает увеличение к. п. д., так как при этом вся внутренняя поверхность индуктора, обращенная к нагреваемой детали, ближе

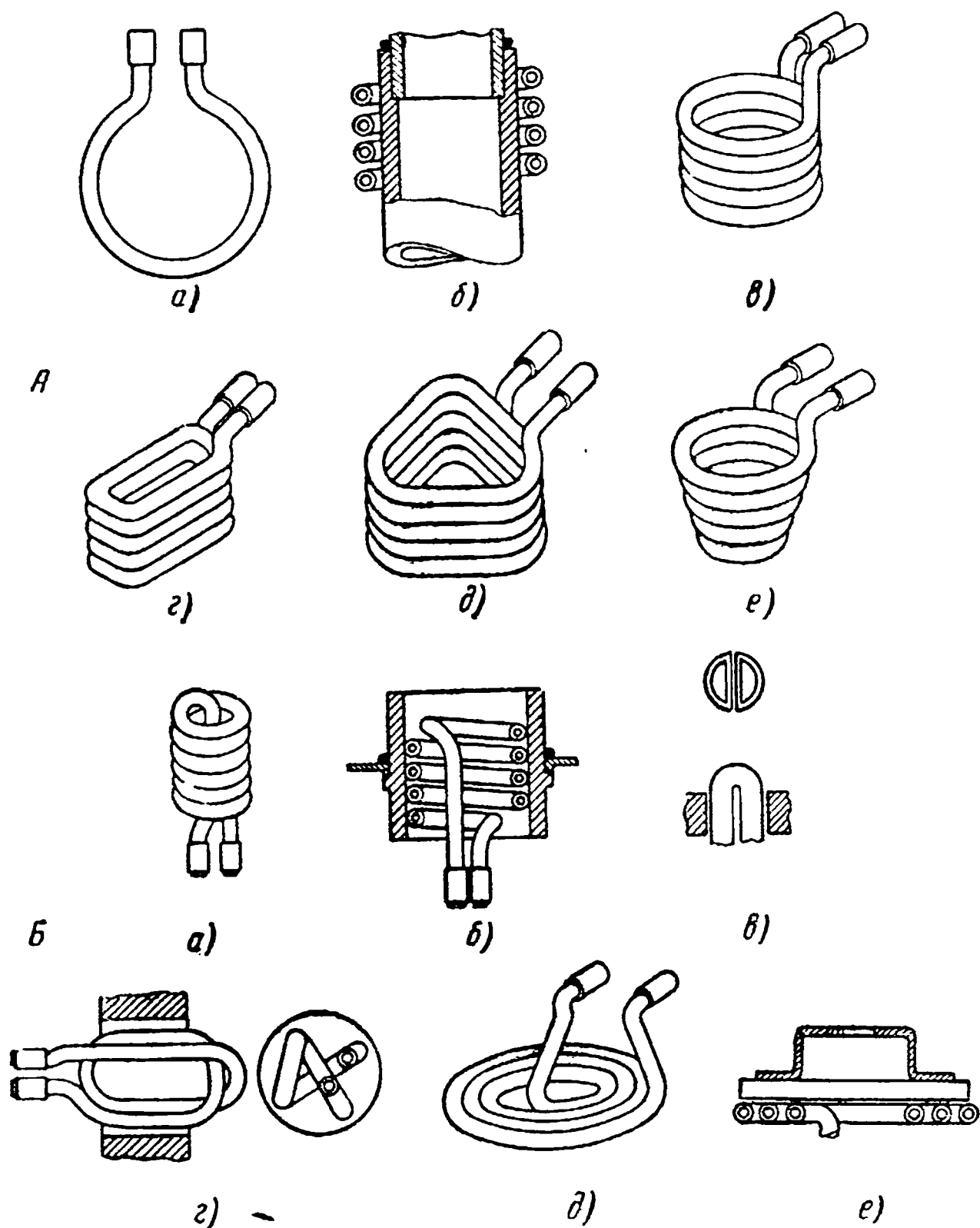


Рис. 100. Типы индукторов, применяемых при пайке

расположена к ней и, следовательно, уменьшается 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. 100. Индукторы группы А предназначены для внешнего нагрева паяемой детали. Они могут быть как одновитковые (а), так и многовитковые разной формы (б, в, г, д, е). Индукторы группы Б предназначены для внутреннего нагрева

паяемых деталей (а, б, в, г) и для нагрева плоских поверхностей (д, е) [20,42].

Существующие методы расчета индукторов весьма приближены, поэтому при конструировании наряду с расчетами используется 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 толсто-стенными или при использовании генератора большей, чем это требуется, мощности в процессе нагрева производят периодическое выключение и включение тока, температура паяемой детали при этом выравнивается за счет ее теплопроводности. 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 нагреве стального изделия 85% индуктированного 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.

Зависимость глубины прогрева от частоты тока и материала деталей приведена в табл. 44 [64].

Как можно видеть из табл. 44, при применении тока стандартной частоты прогрев распространяется на большую глубину. С повышением 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 может регулироваться по температуре детали, времени включения генератора или количеству затраченной энергии. Схема индукционной пайки свечей зажигания двигателей внутреннего сгорания в автомате

Таблица 44

Материал паяемой детали	Температура нагрева в °С	Глубина прогрева в мм для различных частот			
		50 гц	500 гц	10 кгц	1 мгц
Сталь μ — 1	900	70	23	5	0,5
μ — 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

роторного типа приведена на рис. 101. Паяемые детали 4 устанавливаются в специальные гнезда медного, охлаждаемого водой стола 1. Каждая деталь накрывается стеклянным колпаком 2, в котором создается вакуум. В момент, когда деталь занимает положение против индуктора 3, последний опускается и включается ток. После необходимого для пайки нагрева ток выключается и

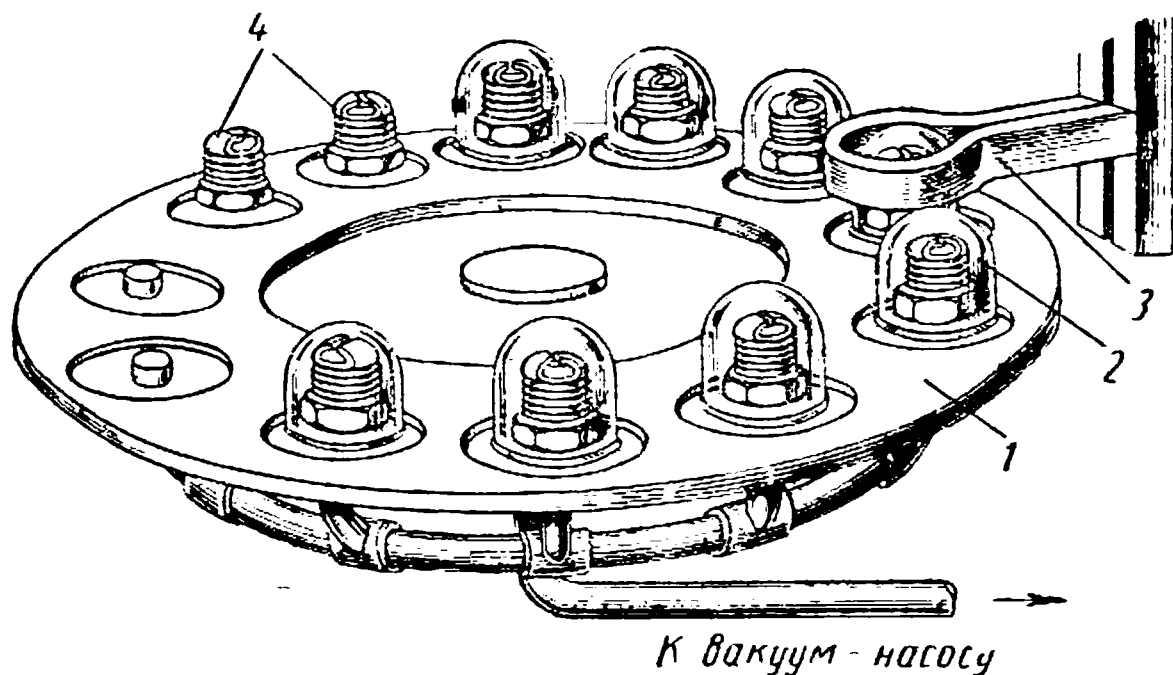


Рис. 101. Схема автомата для пайки свечей зажигания

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 выделения тепла при протекании электрического тока через паяемую деталь, установленную между электродами. В случае применения графитовых электродов она дополнительно нагревается от раскаленных электродов.

Для пайки методом сопротивления могут быть использованы обычные машины для контактной точечной, стыковой и роликовой сварки. Электроды в них, как правило, делаются 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 по форме соответствовать конфигурации паяемого соединения.

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 возможен перегрев отдельных мест. 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

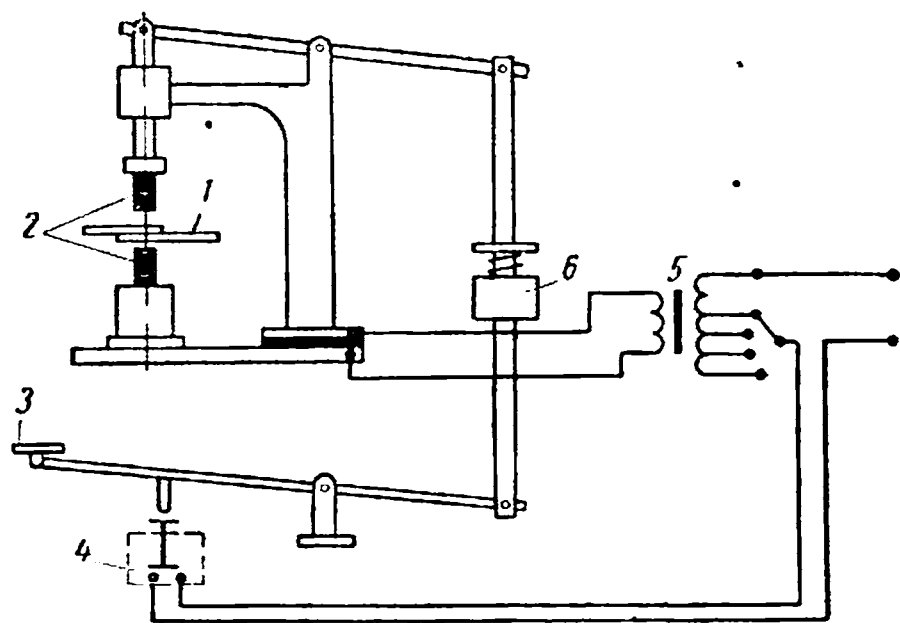


Рис. 102. Схема установки для контактной пайки

тока. Иногда при пайке сопротивлением применяются самофлюсующие припои, что упрощает процесс пайки.

Схема установки для контактной пайки приведена на рис. 102. Переменный ток (2000—3000 а, 5—8 в) от вторичной обмотки трансформатора 5 подводится к электродам 2, между которыми зажимается паяемая деталь 1. Верхний электрод подвижный. При нажатии педали 3 верхний электрод опускается и сжимает паяемые детали, контакт 4 замыкается и включается ток. Регулирование величины давления на электроды осуществляется специальным устройством 6.

При пайке методом сопротивления при зажатии паяемых деталей в электроды из-за неровностей на поверхности электродов и деталей, а также 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 нашел особенно широкое применение при соединении пластин твердого сплава с корпусом инструмента. В этом случае ток пропускается 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 применяется косвенный нагрев, при котором ток пропускается 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 могут устанавливаться в поточную линию. Нашли применение также роторные полуавтоматы с нагревом сопротивлением.

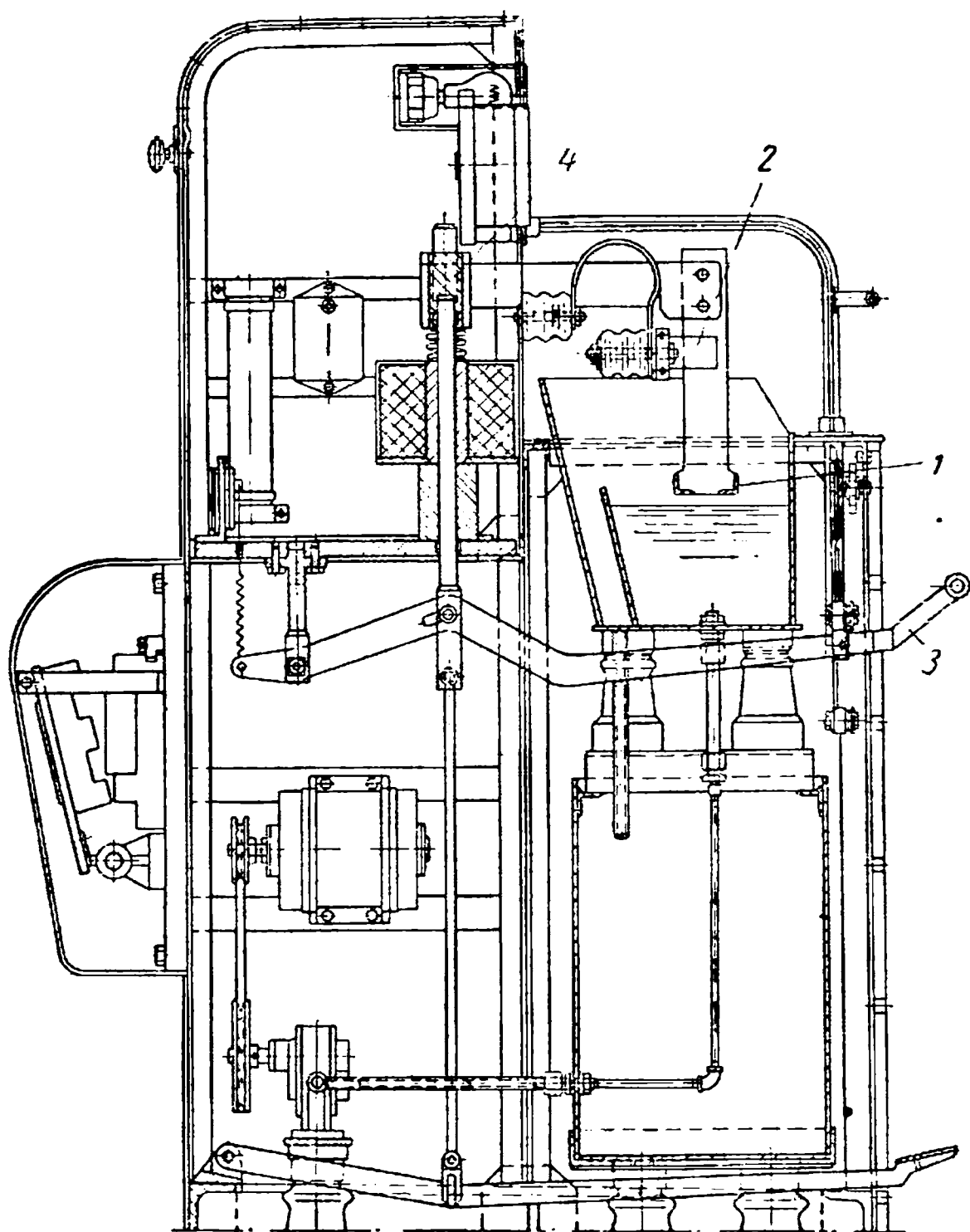


Рис. 103. Автомат для нагрева в электролите АЭ-4

К нагреву сопротивлением относится также нагрев в электролите, разработанный И. З. Ясногородским и практически примененный на Алтайском тракторном заводе. При этом методе нагрева ток, протекая через электролит, вызывает разложение воды. На детали образуется водородная оболочка с большим сопротивлением, проходя через которую ток разогревает деталь. 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 могут быть использованы для нагрева под пайку. На рис. 103 изображен автомат АЭ-4

для нагрева и пайки в электролите. Деталь устанавливается на экране 1 и закрепляется в подвеске с помощью зажимов 2, с которыми соединен отрицательный полюс источника питания. При нажатии рычага 3 кронштейн 4 опускает деталь в электролит. Одновременно, при нажатии рычага, замыкается электрическая цепь и включается реле времени. После необходимой выдержки реле срабатывает, цепь размыкается и кронштейн 4 силой пружин оттягивается кверху извлекая деталь из электролита. Детали могут погружаться в электролит как полностью, так и частично. Такой автомат может быть использован для напайки контактов магнето, для пайки инструмента и других аналогичных деталей.

§ 4. Оборудование для пайки погружением

В промышленности применяются два способа пайки погружением: пайка погружением в расплавы солей и пайка погружением в расплавы припоев.

Пайка погружением в расплавы солей. Собранные и подготовленные к пайке детали погружаются в расплавленные и нагретые выше температуры пайки солевые смеси. Для пайки, как правило, используются соляные печи-ванны, применяемые для термической обработки. Соли обычно оказывают флюсующее действие на основной металл и припой, поэтому надобность в дополнительном применении флюсов, как правило, отпадает. Если флюсующее действие солевых смесей недостаточно, то перед пайкой производится специальное флюсование.

При пайке углеродистых и низколегированных сталей с применением в качестве припоев меди или латуни дополнительное флюсование 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 должны быть просушены до полного удаления влаги. Некоторые наиболее употребительные составы солевых ванн, применяемые при пайке, приведены в табл. 45.

Таблица 45

Состав ванны в % по весу				Температура плавления в °С	Максимальная рабочая температура в °С
NaCl	CaCl ₂	BaCl ₂	KCl		
30	—	65	5	510	900
33	67	—	—	510	900
22	—	48	30	550	900
—	50	50	—	595	900
22,5	77,5	—	—	635	1300
—	—	100	—	962	1300

Для пайки алюминия и его сплавов рекомендуется применять составы соляных ванн, приведенные в табл. 46.

Таблица 46

Состав ванны в % по весу						Температура плавления в °С		Максимальная рабочая температура в °С
NaCl	KCl	LiCl	CaCl ₂	BaCl ₂	KF·AlF ₃	соллдус	ликвидус	
—	51	41	—	—	8	380	450	560
19	—	—	43	28	10	435	480	610
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 газовыми и электрическими нагревательными элементами, установленными снаружи или внутри печей-ванн, а также непосредственно током, подводимым через электроды, погруженные в тигель с солями. При этом используется только переменный ток, так как постоянный вызывает электролиз солей. На рис. 104 представлена соляная печь-ванна типа В-20. Камера нагрева 1 выложена из шамотного кирпича. Тигель 2 установлен на чугунной плите 3. Сверху тигель закрывается крышкой 4, в которой имеется отверстие 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 105 приведены кривые скорости нагрева стальных деталей в соляной ванне 2 и в печи 1, из которых можно видеть, что нагрев до 800° С в соляной ванне происходит в 3,5 раза быстрее, чем в печи [43].

При работе соляных печей-ванн изменяется состав ванны и уменьшается количество солей в ней, так как они испаряются и

уносятся с нагреваемыми деталями и приспособлениями. Для корректировки состава ванны периодически необходимо добавлять новую порцию солей, а через определенный срок, зависящий от условий работы, полностью менять солевую смесь на новую.

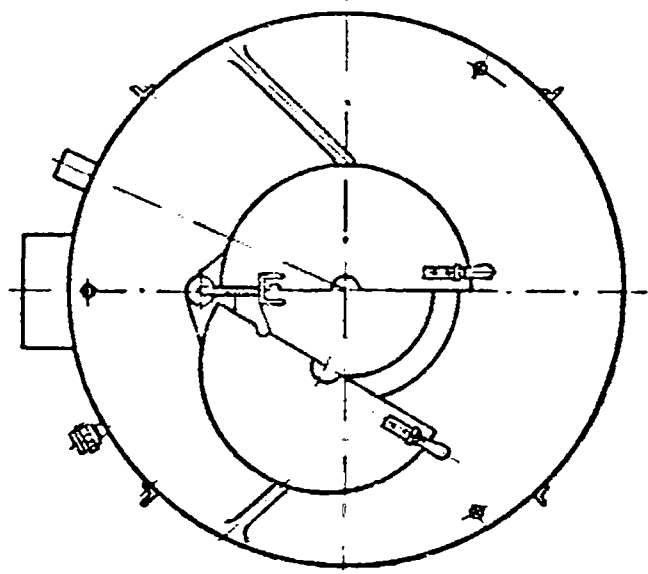
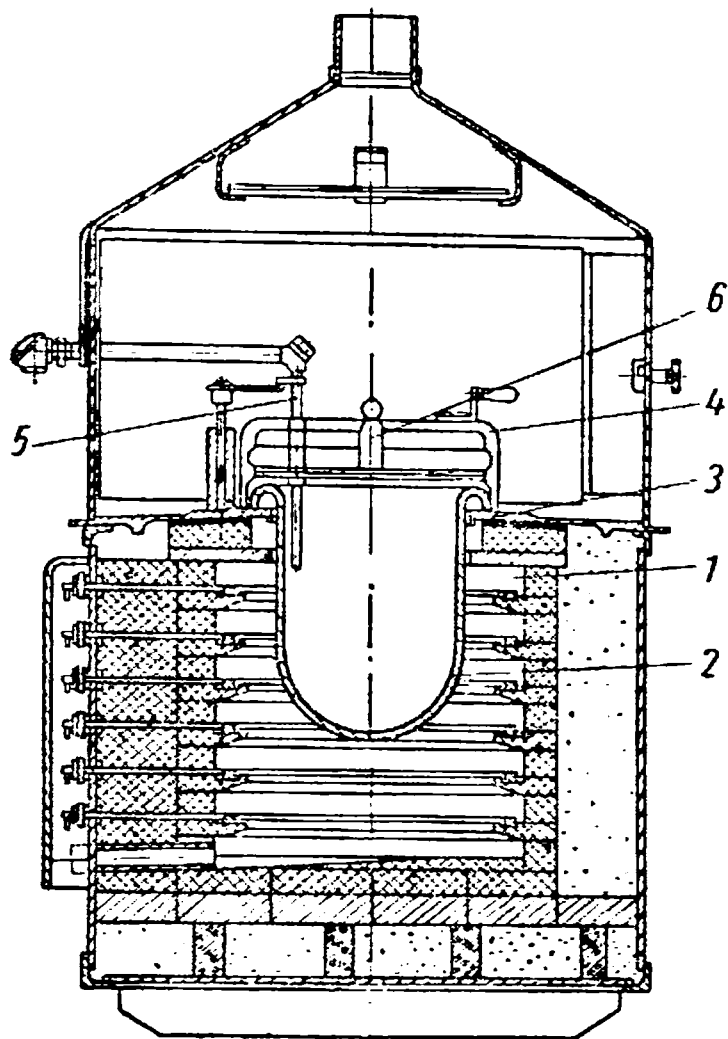


Рис. 104. Электрическая печь-ванна типа В-20

схема конвейерной пайки в соляной ванне рамы велосипеда. Направление движения паяемой рамы справа налево. По моно-рельсу 1 на цепях 2, расположенных на расстоянии 600 мм друг от друга, на подвесках 3 закреплены паяемые детали. Автоматическое погружение и выгрузка деталей осуществляются с помощью копиров 4. Время выдержки в ванне поддерживается автоматически. Конвейерная линия обеспечивает пайку 150—180 велосипедных рам в час.

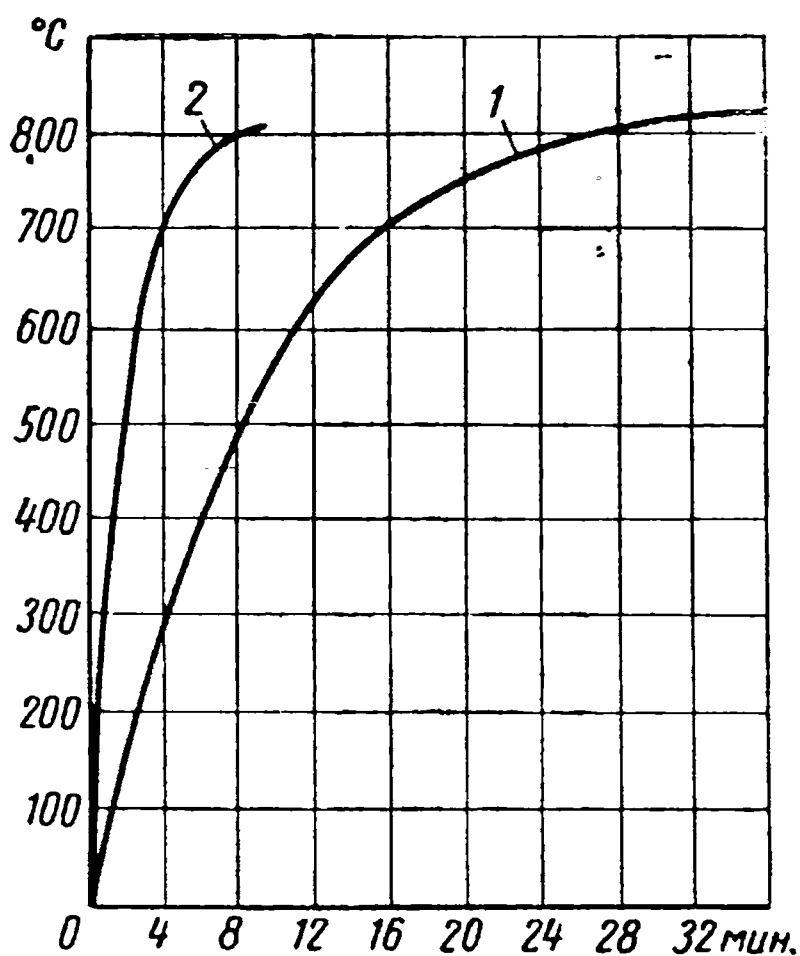


Рис. 105. Скорость нагрева стальных деталей

1 — в печи; 2 — в соляной ванне

При пайке в соляных печах-ваннах для повышения производительности мелкие детали перед погружением укладываются на решетку или в кассеты, а также собираются на «елку» — металлический стержень с ответвлениями, на которые надеваются паяемые детали.

Более высокая производительность достигается при автоматизации процесса пайки в соляных ваннах. На рис. 106 приведена

Пайка погружением в расплавленные припой. При пайке погружением в расплавленные припой применяемое оборудование отличается простотой. Припой расплавляется 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 наноситься на детали перед пайкой. В последнем случае перед погружением покрытой флюсом детали в расплав металла она должна быть подогрета до полного удаления влаги. В процессе пайки за счет испарения

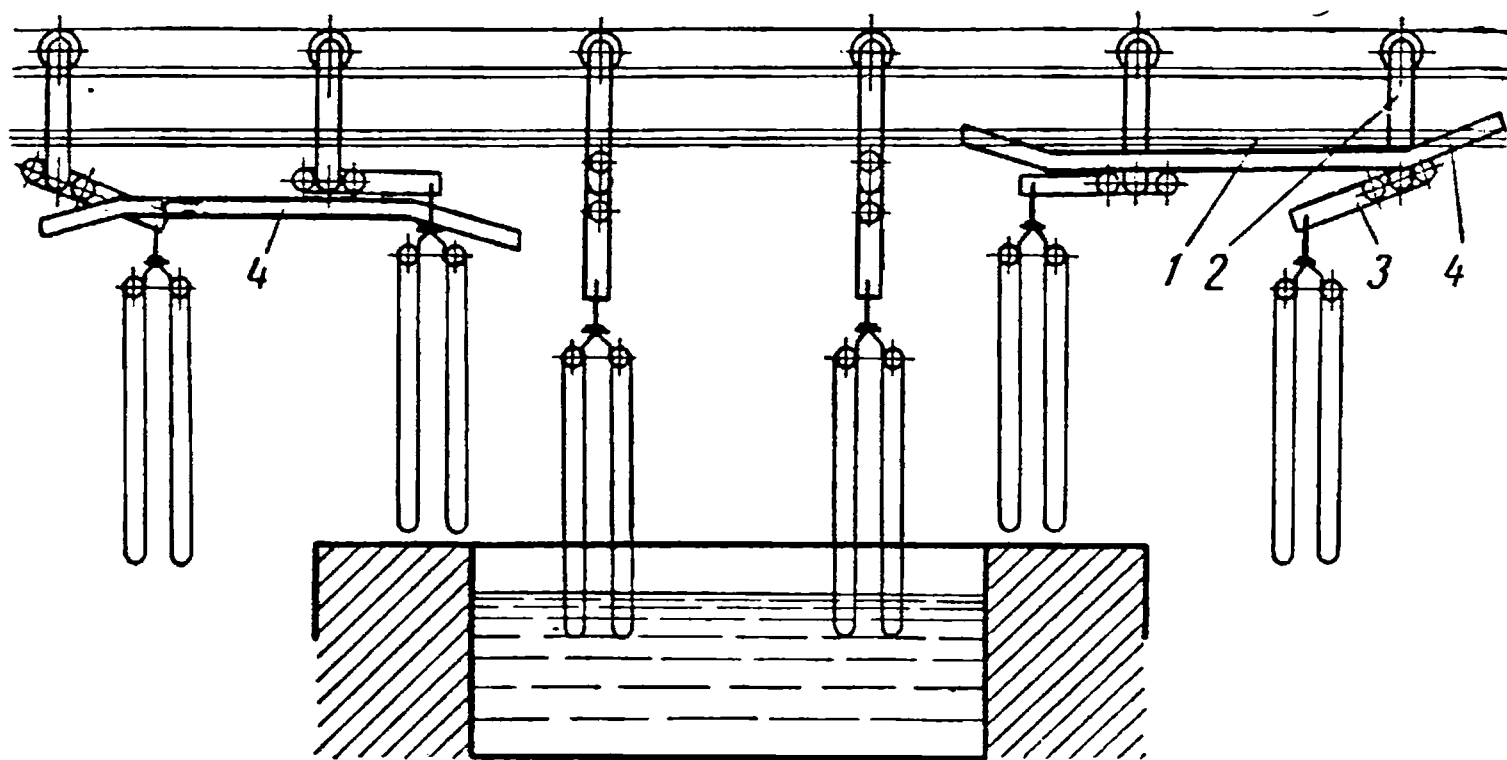


Рис. 106. Схема конвейерной пайки рамы велосипеда погружением в соляную ванну

компонентов припоя, а также растворения паяемых металлов происходит изменение состава расплава. Для корректировки состава ванны с припоем периодически, согласно результату анализа, необходимо вводить недостающие компоненты. Если при пайке погружением применяются тугоплавкие припои, то производится предварительный подогрев деталей до температуры на $200\text{—}300^\circ\text{C}$ ниже температуры пайки. Предварительный подогрев позволяет использовать ванны с меньшим количеством расплавленного припоя, кроме того, при этом ускоряется процесс пайки. Температура ванны поддерживается на $50\text{—}60^\circ\text{C}$ выше температуры плавления припоя. Время выдержки в расплаве припоя 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. На рис. 107 представлен общий вид роторного полуавтомата для пайки зубков угольного комбайна. По конструкции зубки угольного комбайна аналогичны металлообрабатывающим резцам, оснащенным пластинками твердого сплава.

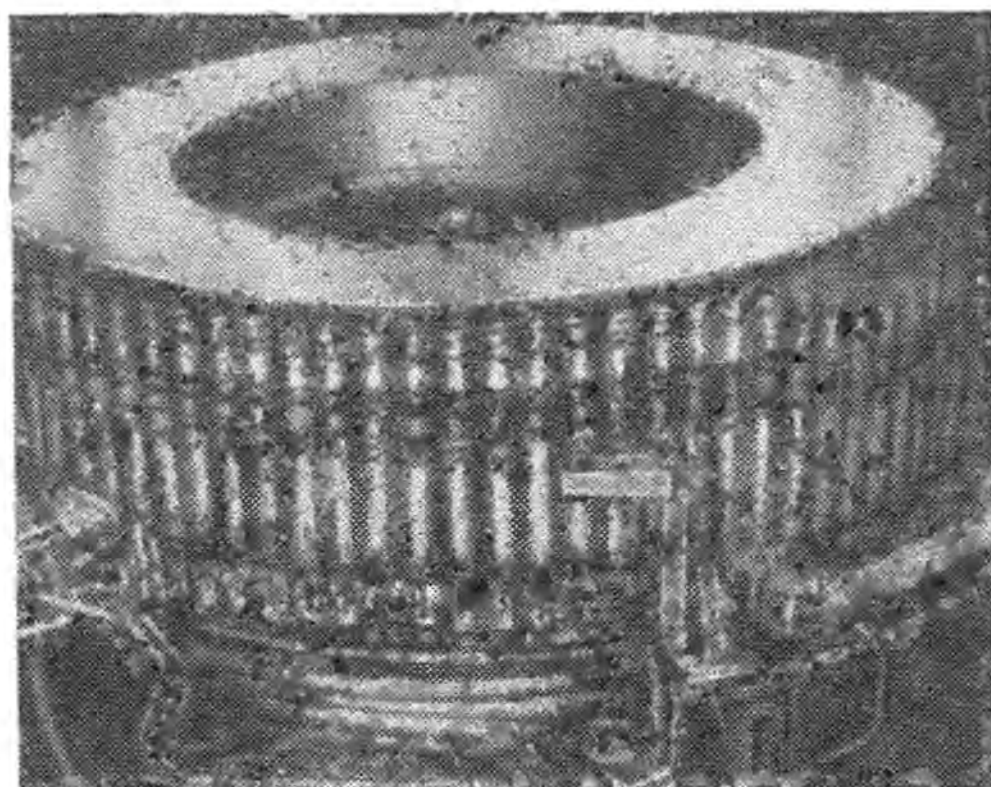


Рис. 107. Общий вид роторного полуавтомата для пайки зубков угольных комбайнов

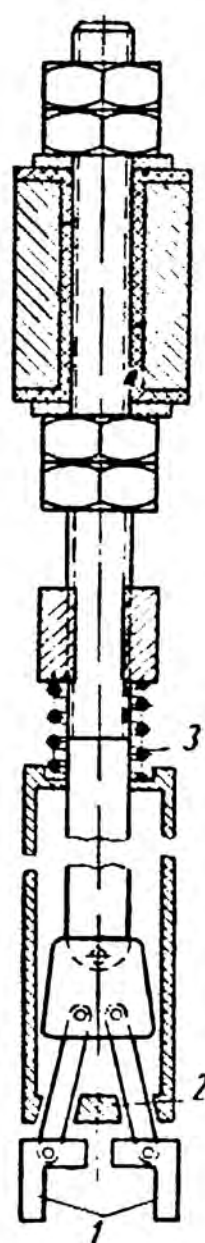


Рис. 108. Подвесной клиновой зажим роторного полуавтомата

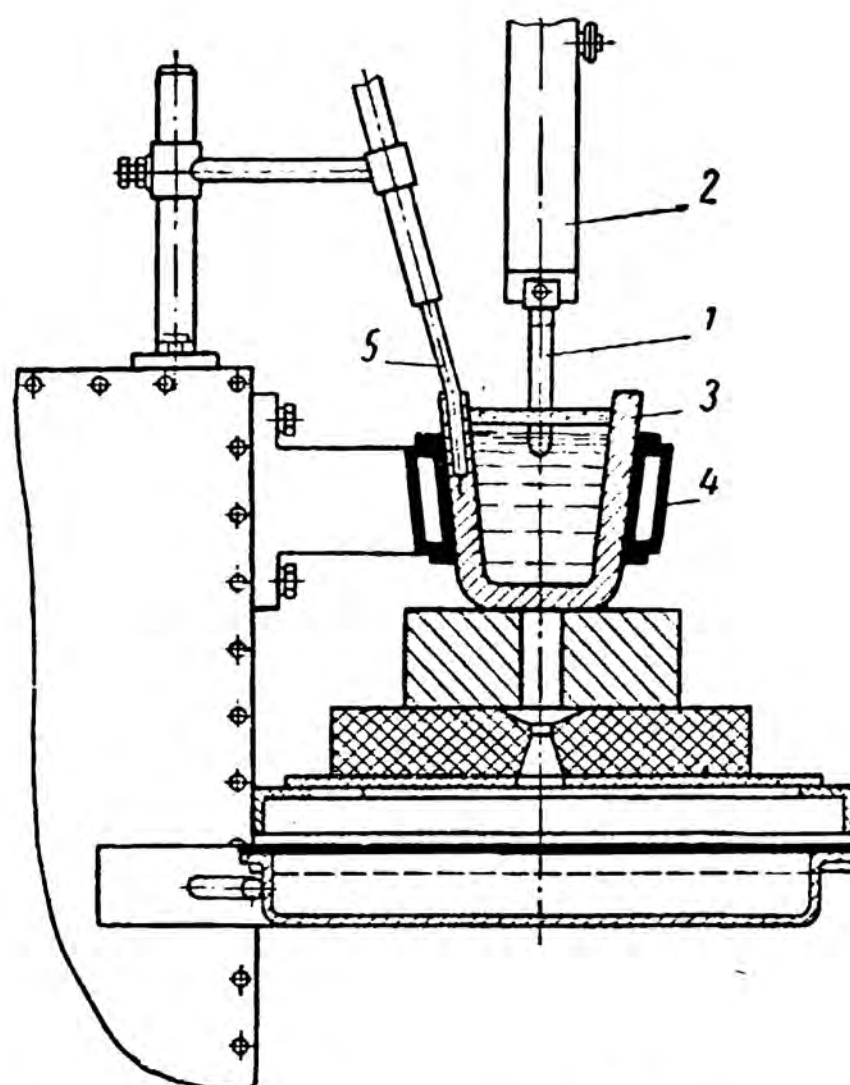


Рис. 109. Схема процесса пайки и конструкция тигля роторного полуавтомата

Полуавтомат устанавливается в поточной линии изготовления зубков. Пластика твердого сплава укладывается в паз зубка, и на специальном полуавтомате производится опрессовка для предотвращения ее выпадения. После опрессовки зубок по цепному конвейеру поступает в загрузочный бункер полуавтомата, который представляет собой роторную установку, состоящую из горизонтального рабочего колеса, на котором расположены 100 подвесок клиновых зажимов (рис. 108). Зубок захватывается клиновым зажимом и транспортируется на протяжении всего цикла обработки. Зажим включает захваты 1, распорный клин 2 и пружину 3.

Схема пайки приведена на рис. 109. Паяемая деталь 1, укрепленная в клиновый зажим 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 Л62, находящейся в тигле под слоем флюса при температуре 1080° С. Постоянство температуры в тигле поддерживается 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 применяется 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 изготавливают 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 срока из строя. Для предотвращения вредного воздействия паров лития и повышения качества пайки вначале защищали паяемое изделие кварцевыми пластинами. В настоящее время при изготовлении сотовых панелей последние укладываются в специальные герметичные конверты, сваренные из тонколистовой стали (рис. 85).

§ 6. Горелки для пайки

В оборудование поста для пайки газовыми горелками входит: набор горелок, соединительные трубопроводы, редукторы и источники горючих газов, кислорода или воздуха. По применяемому горючему различают горелки: а) ацетилено-кислородные; б) го-

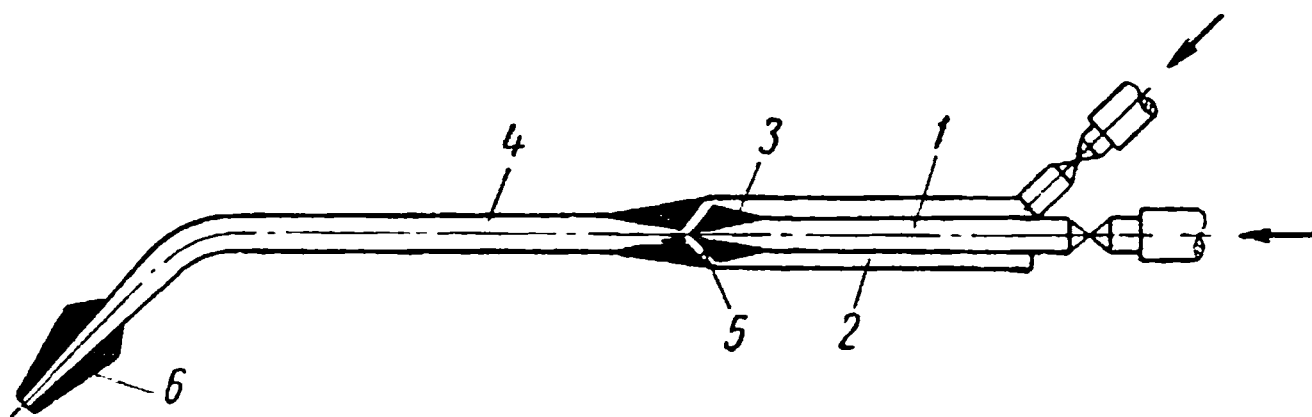


Рис. 110. Схема инжекторной горелки

релки, работающие на природном или промышленном газе в смеси с кислородом или воздухом; в) керосино-кислородные.

При применении ацетилено-кислородной смеси рекомендуются обычные сварочные горелки. Схема сварочной инжекторной горелки приведена на рис. 110. Горелка имеет центральную трубку 1

для прохода кислорода и трубку 2 для горючего газа, поступающего под более низким давлением. Кислород проходит по трубке 1 с большой скоростью через отверстие инжектора 3, увлекает за собой из кольцевого канала 5 горючий газ. В смесительной камере 4 газы перемешиваются и сгорают на выходе из мундштука 6. К наконечникам № 2 — 7 этих горелок ВНИИАВТОГЕНМАШ разработал специальные многопламенные мундштуки, которые создают рассредоточенное пламя и обеспечивают более равномерный нагрев при пайке. Многосопловой мундштук приведен на рис. 111.

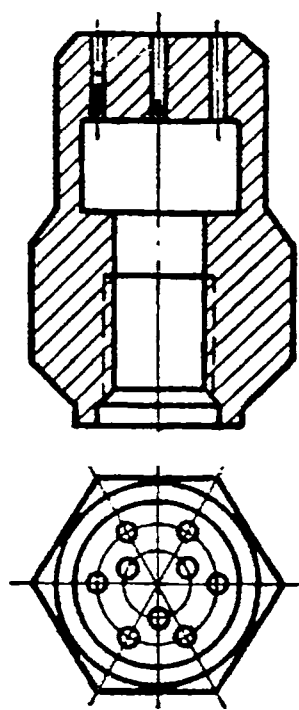


Рис. 111. Многосопловой мундштук

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 пламенем отдельного подогревающего сопла. Керосино-кислородные горелки применяются для пайки деталей с толщиной стенок 2—10 мм и обеспечивают нагрев до температуры 1000—1100° С.

Правила эксплуатации газовых горелок, трубопроводов и редукторов, применяемых при пайке, те же, что и при сварке.

При применении для целей нагрева при пайке промышленных и природных горючих газов они могут подаваться к рабочему месту из генераторов, баллонов или заводской сети. Кислород и воздух поставляются в баллонах или также подаются из заводской сети. Процесс пайки газовыми горелками легко поддается механизации. На рис. 112 приведена 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 устанавливаются паяемые детали. Зубчатые колеса 3, одно из которых — ведущее,

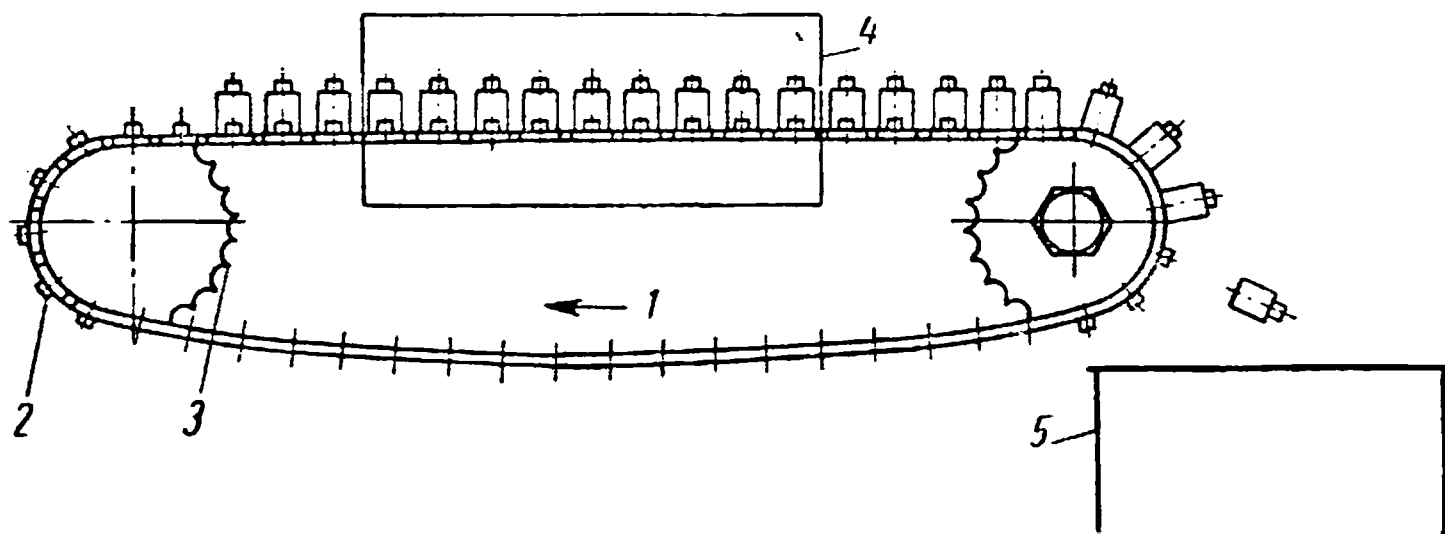


Рис. 112. Схема установки конвейерного типа для газопламенной пайки

второй — ведомое, приводят конвейер в движение. Меняя зубчатую передачу, можно варьировать скоростью 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. 113 приведена зависимость температура — время для газопламенного нагрева тонкостенной и толстостенной трубы. Нагрев тонкостенной трубы до 600°C осуществляется за 5 сек, а затем через 1,5 сек температура трубы достигает 750°C . Для нагрева толстостенной трубы до температуры 600°C необходимо 30 сек, а для достижения температуры 750°C еще 15 сек. Максимально возможная температура нагрева при этом в тонкостенной трубе 1600°C , а в толстостенной 1200°C [64].

При разработке процесса пайки с применением газового пламени из технологических и экономических соображений время

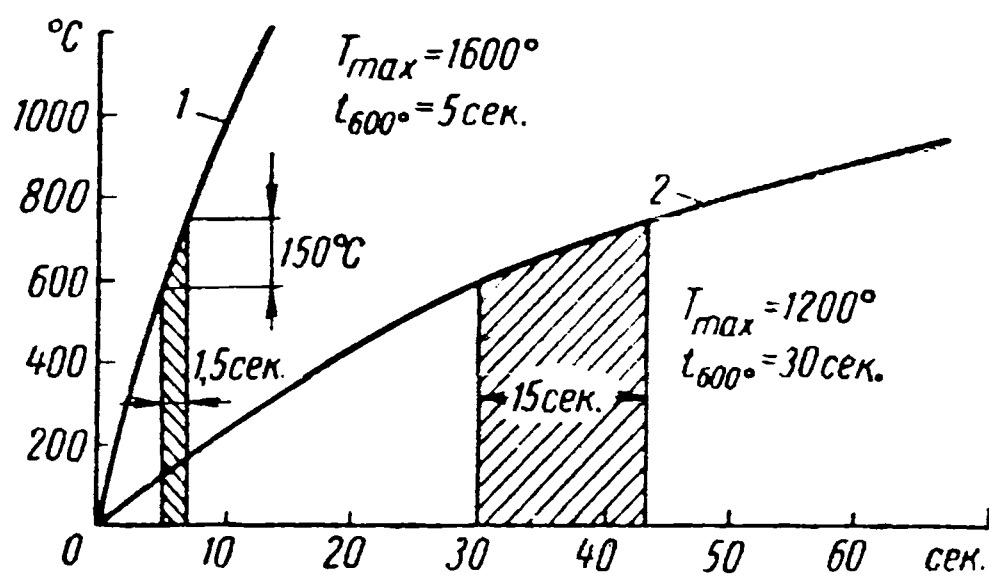


Рис. 113. Кривые скорости нагрева при газопламенной пайке тонкостенной (1) и толстостенной (2) трубы

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 соображениями экономики. При пайке с применением флюсов в атмосфере воздуха через 4—5 мин флюс теряет

свои флюсующие свойства, что является ограничением максимальной выдержки при газопламенной пайке.

§ 7. Паяльники

Для низкотемпературной пайки применяются паяльники с периодическим и постоянным нагревом. Рабочая часть паяльников изготавливается из красной меди, вследствие ее высокой теплопроводности. Паяльник аккумулирует тепло от источника нагрева и

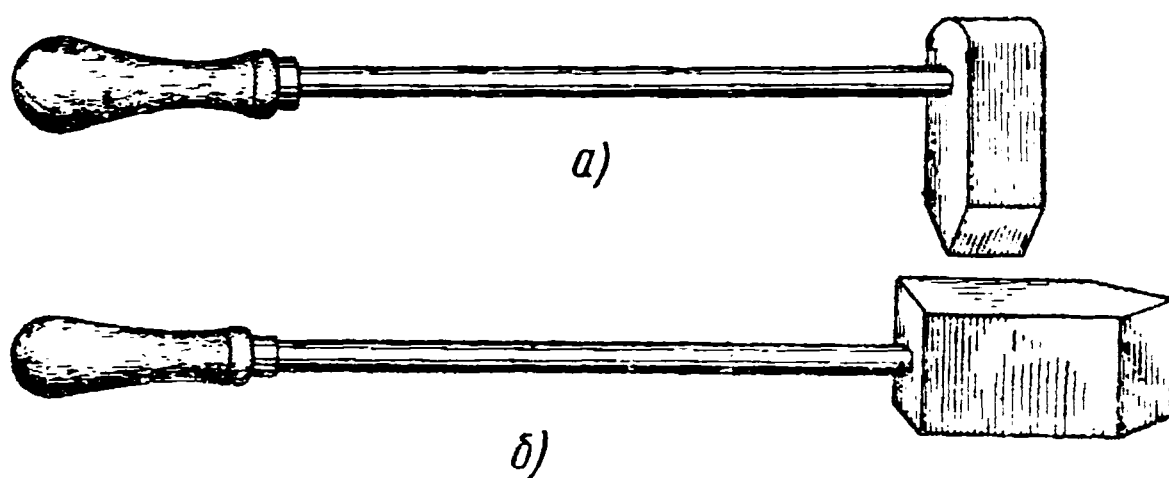


Рис. 114. Паяльники с периодическим нагревом:

а — молотковый; б — торцовый

передает его паяемой детали в процессе пайки, а также переносит расплавленный припой к месту соединения деталей.

Паяльники с периодическим нагревом (рис. 114) 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. 115. Нагревательный элемент электропаяльника сделан из нихромовой проволоки, намотанной на слой асбеста, слюды, сте-

клоткани или керамическую втулку, устанавливаемую на медный стержень паяльника.

Паяльники, изготовленные из меди, хорошо облуживаются 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) наносится железное или никелевое покрытие толщиной 0,1—0,2 мм. Размер паяльника зависит от массивности паяемых деталей. Для электромонтажных работ применяют паяль-

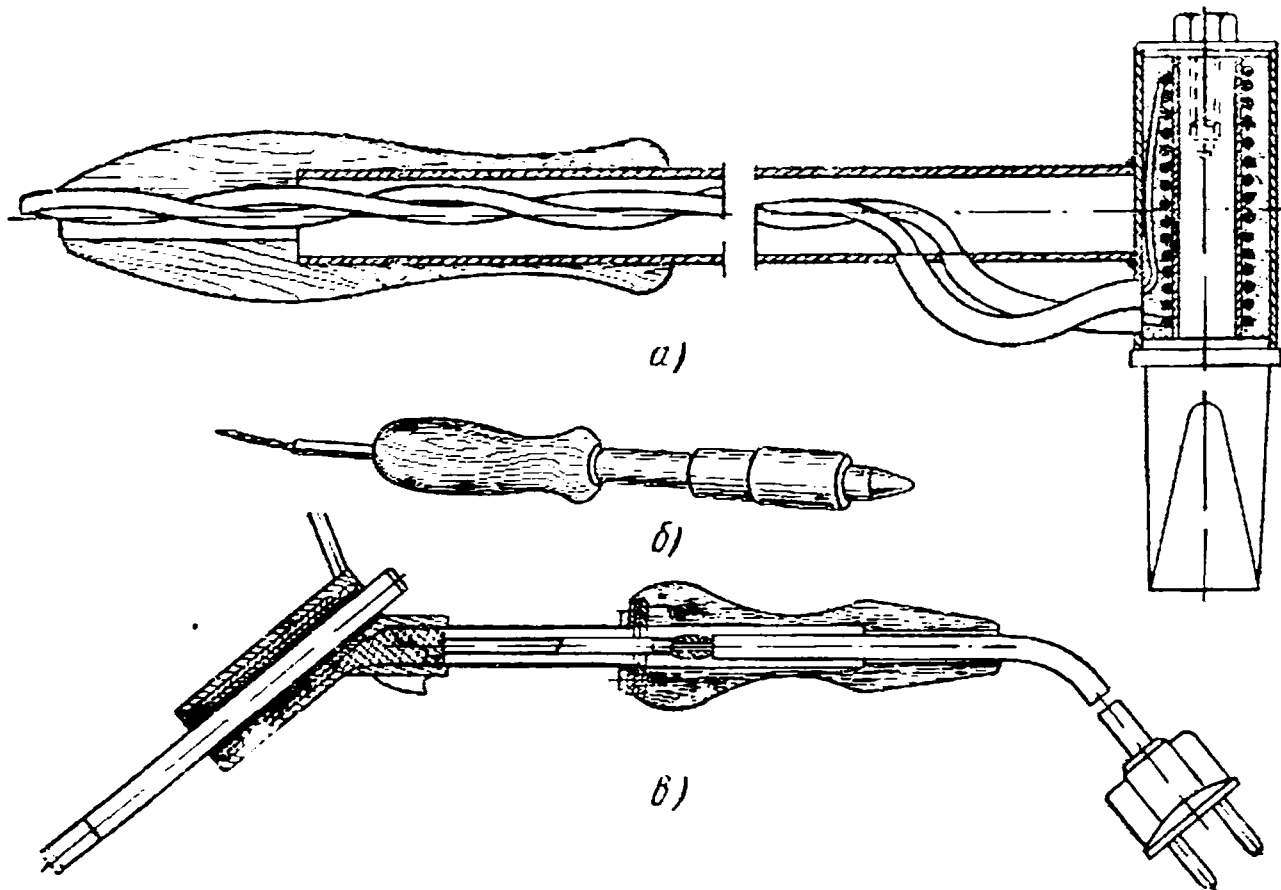


Рис. 115. Электропаяльники:

а — молотковый; б — торцовый; в — угловой

ники малой мощности (до 200 *вт*) и весом до 1 *кг*. Для пайки массивных деталей применяют паяльники мощностью до 1200 *вт* и весом до 4,5 *кг*.

Для ультразвуковой пайки нашли применение ультразвуковые паяльники и ультразвуковые ванны. Ультразвуковой паяльник и переносный генератор марки УП-21 приведены на рис. 116. Технические данные этого паяльника приведены ниже.

Рабочая частота в <i>кГц</i>	18—22
Мощность генератора в <i>вт</i>	40
Габариты в <i>мм</i> :	
генератора	332×342×310
паяльника	292×160×52
подставки	205×105×138
ванны	288×200×162
Диаметр ванны в <i>мм</i>	25
Глубина ванны в <i>мм</i>	10
Масса в <i>кг</i> :	
генератора	14
паяльника	1,1
подставки	0,25
ванны для лужения	0,8

Абразивный паяльник (рис. 117) в отличие от электропаяльника имеет рабочий стержень 2, изготовленный прессованием из

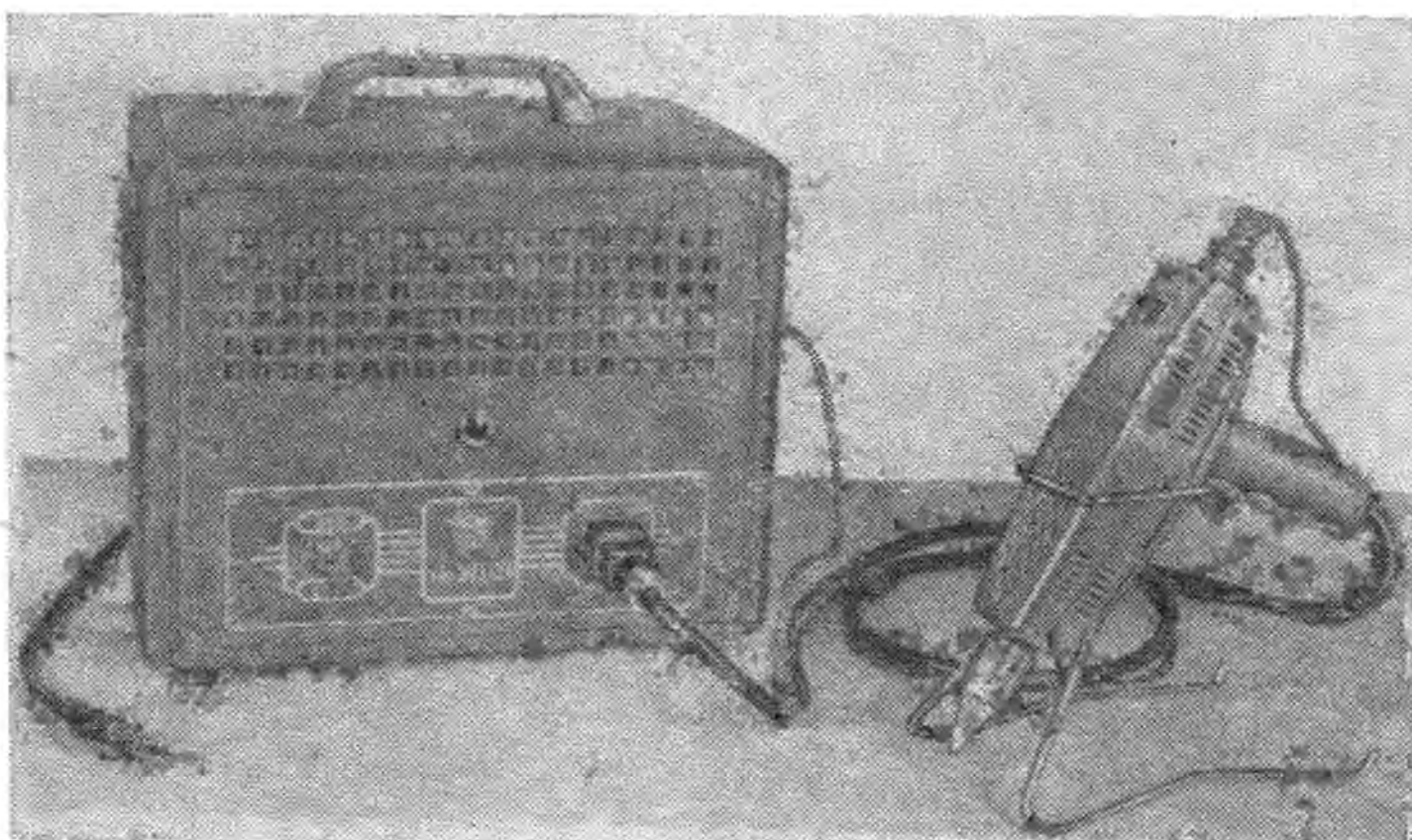


Рис. 116. Ультразвуковой паяльник и переносный генератор УП-21

порошка припоя и измельченного асбеста (абразива). Конструктивно паяльник состоит из медной втулки 1, нихромового нагревателя 3, кожуха 5, асбестовой изоляции 4. Абразивный паяльный стержень закрепляется в медной втулке с помощью зажимного кольца 7. К кожуху паяльника прикреплена рукоятка 6 [25].

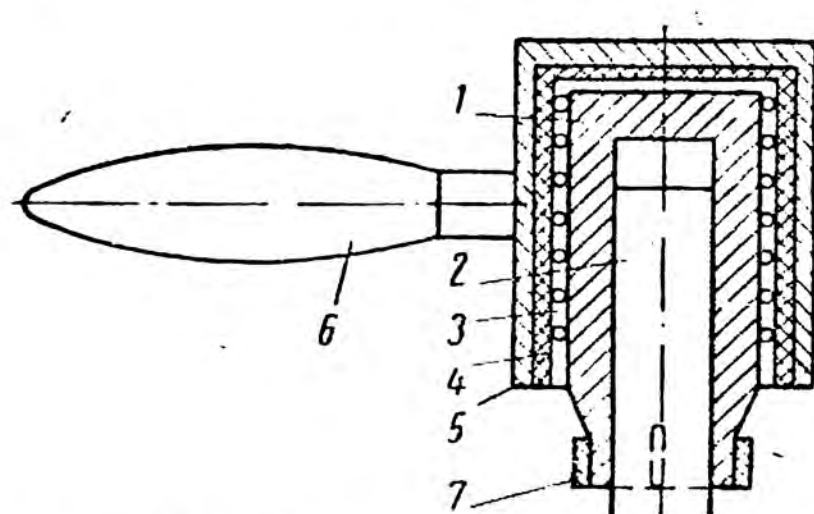


Рис. 117. Абразивный паяльник

времени на подогрев. Паяльники с постоянным нагревом не обладают этим недостатком, но имеют небольшой срок службы в связи с выходом из строя нагревателей.

Глава IV

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА, ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

КОНТРОЛЬ ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ

§ 1. Дефекты паяных изделий

Дефекты, образующиеся при изготовлении паяных конструкций, можно разделить на три группы: дефекты заготовок и сборки изделия под пайку; дефекты паяных швов; дефекты паяного изделия 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 устанавливаются необходимые зазоры и соединяемые детали надежно закрепляются. После нанесения и закрепления припоя изделие устанавливается 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 паяемого изделия. Причиной этих дефектов является 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 измерительным инструментом.

К наиболее типичным дефектам паяных швов относятся: поры, раковины, трещины, шлаковые и флюсовые включения, непропай, т. е. несплошное заполнение зазора припоем, а также отсутствие в отдельных местах связи между основным металлом и припоем. Последнее объясняется несмачиванием в этих местах паяемого металла припоем. Причиной образования мелких пор и непропаев является выделение в процессе пайки газов, содержащихся в припое и образующихся при испарении отдельных компонентов припоев и флюсов. Возникновению пор, неспаев и усадочных раковин

благоприятствует также слишком большой зазор или недостаточное количество внесенного при пайке припоя. Наличие влаги во флюсе и на прутках припоя в виде адсорбированного слоя также способствует появлению пор и непропаев. Как показали исследования, прокаливание прутков алюминиевых припоев при температуре 350°C 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 при пайке, когда флюс, реагируя с основным металлом, постепенно переходит в шлак, который плохо вытесняется 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°C , называются холодными. В зависимости от расположения трещин в паяных соединениях их делят на три группы: трещины в шве, трещины в основном металле, трещины в контакте основной металл — припой. К образованию трещин наиболее склонны швы, спаянные припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации, а также загрязненные примесями.

Горячие и холодные трещины в основном металле возникают под действием собственных напряжений, образующихся при сборке, нагреве под пайку, кристаллизации металла шва и охлаждении паяного изделия. Трещины в основном металле могут образоваться под действием расплавленного припоя. В процессе пайки иногда происходит 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 контакте основной металл — припой 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 является недостаточное заполнение зазора припоем. Чтобы избежать непропаянных мест, необходимо добиваться тщательного удаления окисной пленки и соблюдать установленные зазоры. На качество заполнения зазора боль-

шое 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 [53]. Такой дефект паяных соединений, как отсутствие связи между основным металлом и припоем, обычно имеет место 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. Предупреждение образования этих дефектов или уменьшение их достигается применением общего нагрева, постепенного охлаждения после пайки, а также применением приспособлений, надежно фиксирующих положение отдельных элементов изделия при сборке, пайке и охлаждении. Для предотвращения образования дефектов в паяных соединениях в первую очередь необходимо строгое соблюдение технологии 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 строгому контролю должны подвергаться не только готовая продукция, но и процесс пайки и даже подготовительные операции.

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

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

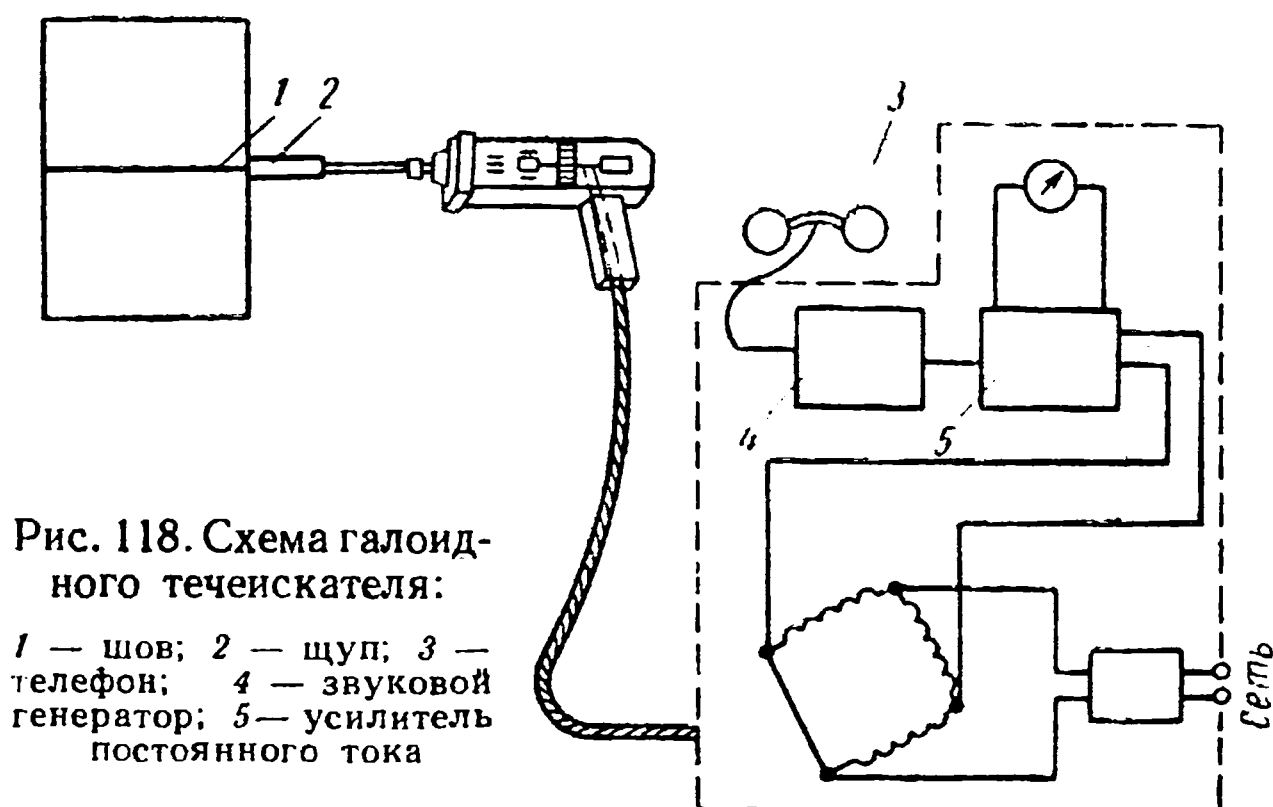
После пайки производится приемка и испытания паяных изделий. Для испытания качества паяных соединений могут быть применены методы контроля без разрушения и с разрушением. Для контроля без разрушения применяются визуальный осмотр, испытание под давлением или течеискателями, просвечивание рентгеновскими и γ -лучами, контроль намагничиванием, ультразвуковой контроль и др. Контроль с разрушением применяется 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 может производиться 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 проверяются качество заготовок и сборки под пайку, а также качество готового изделия. При осмотре заготовок обращается внимание на чистоту соединяемых поверхностей, на отсутствие забоин, вмятин, на качество покрытия. При осмотре сборки обращается внимание на правильность установления капиллярных зазоров, на наличие и закрепление припоя, на надежность закрепления элементов паемого изделия. При контроле готового изделия последнее проверяется на соответствие 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.

Испытание паяных изделий давлением воздуха или воды. Этот метод контроля производится после внешнего осмотра. При пневмоиспытании в паяное изделие нагнетается воздух до давления, установленного техническими условиями, после чего швы смачивают мыльной водой или погружают изделие в воду. Неплотности определяются 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 покрываются бумажной лентой, пропитанной 5 %-ным водным раствором азотнокислой ртути или раствором фенолфталеина. После 5—10 мин выдержки под давлением бумажные ленты осматривают. Неплотности определяют по появлению черных или фиолетовых пятен на бумаге.

Газоэлектрические течеискатели. Для контроля паяных швов на непроницаемость нашли применение гелиевые и галоидные течеискатели. Принцип их действия основан на том, что паяный шов обдувается с одной стороны газом-индикатором или внутренний объем испытываемого изделия заполняется 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 отсасывается. 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 применяется гелий, а в галоидных течеискателях фреон-12, четыреххлористый



углерод, хлороформ и другие галоидные газы. Блок-схема галоидного течеискателя ГТИ-2 представлена на рис. 118.

Чувствительность гелиевого и галоидного течеискателей очень высокая, но они сложны, поэтому применяются только для наиболее ответственных изделий [35].

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 применяются рентгеновские аппараты малого напряжения, например выпускаемый заводом «Мосрентген» 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 он применяется редко. По рентгеновским снимкам определяют размеры, расположение и характер внутренних дефектов в паяных швах. В технических условиях на приемку изделия указывается количество допустимых дефектов на рентгеновских снимках.

При наличии стабильной продукции на предприятиях иногда разрабатываются специальные эталоны допустимых дефектов. Схема просвечивания и характер дефектов, связанных с незаполнением шва припоем (непропаи), приведена на рис. 119. Черные пятна на рентгеноплёнке (рис. 119, б) соответствуют расположе-

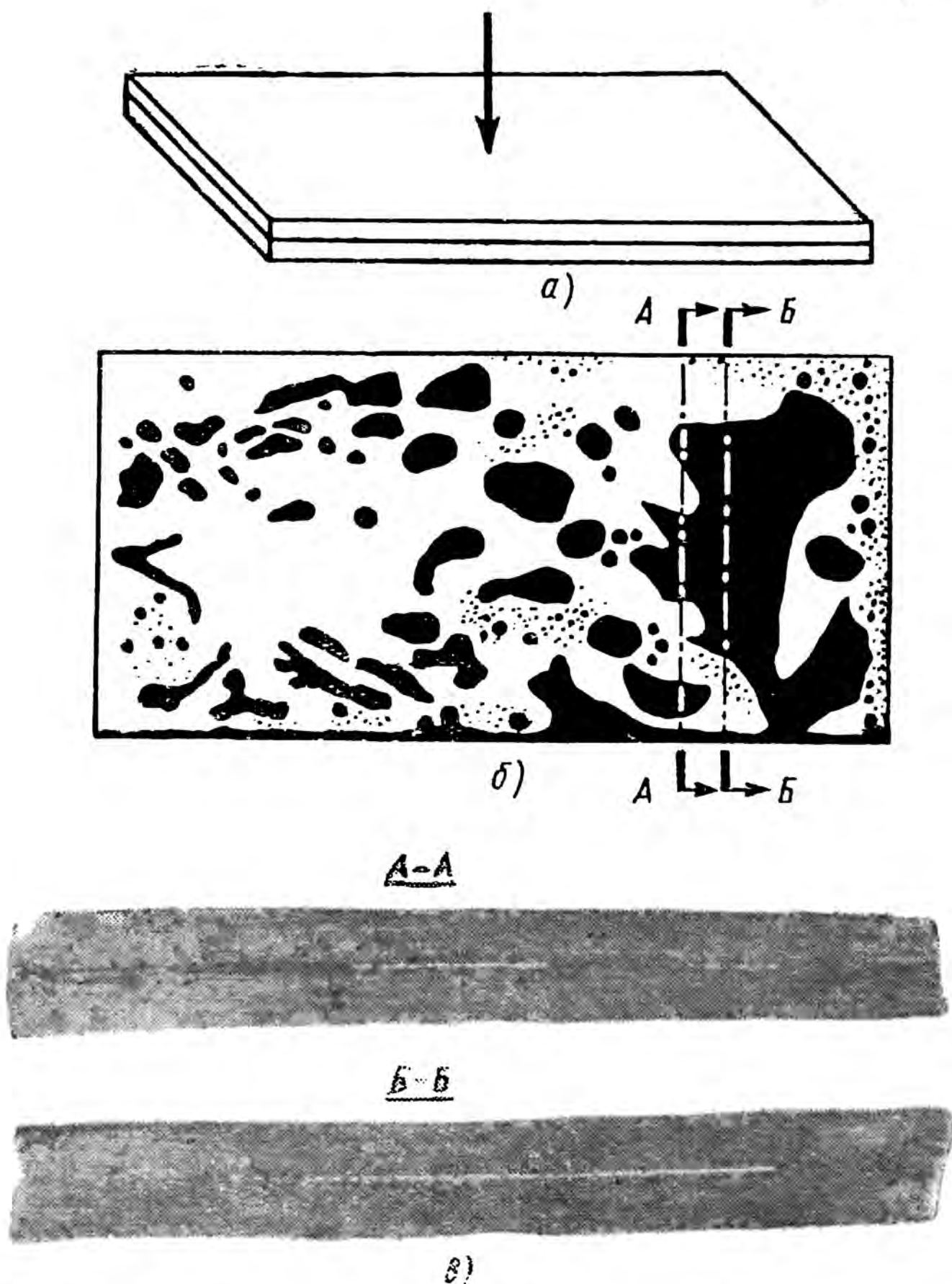


Рис. 119. Схема просвечивания (а), характер дефекта по рентгено снимку (б) и при разрезке паяного соединения (в)

нию непропаев в паяном соединении, что особенно отчетливо можно видеть на той же фигуре в разрезах А—А и Б—Б (увеличено).

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 расположены на поверхности или неглубоко от поверхности и не располагаются в направлении действия маг-

нитного 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 наносится слой сухого магнитного порошка при помощи пульверизаторов или детали погружаются в суспензию магнитного порошка в масле или керосине. Скопление порошка на поверхности паяных деталей указывает место нахождения дефекта. Индукционный метод контроля паяных деталей применения не находит.

Метод контроля ультразвуком. Этот метод впервые был предложен в 1929 г. С. Я. Соколовым и основан на способности ультразвуковых колебаний отражаться от поверхности внутренних неоднородностей металла. Ультразвуковой контроль дает отчетливое выявление таких дефектов 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 производят испытания паяных соединений и паяных изделий на механическую прочность, микроисследования и коррозионные испытания. Самым простым методом определения механической прочности при разрушающем контроле является постепенный отрыв одной из соединенных деталей по шву (отдир), который позволяет вскрыть шов и визуально оценить имеющиеся в нем дефекты. Схема контроля на отдираание приведена на рис. 120. Аналогичный результат в части вскрытия имеющихся в шве дефектов дает разъем паяного соединения путем распая, т. е. нагрева до температуры плавления центрального слоя шва, при которой возможна разборка паяного соединения.

Количественная оценка надежности паяных швов разрушающим методом контроля наиболее полно производится при механических испытаниях.

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 проводятся при разработке новых припоев, при отработке технологии пайки и

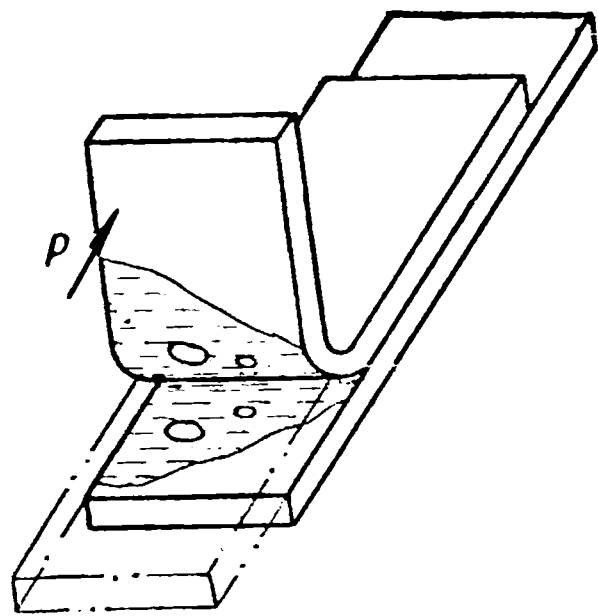


Рис. 120. Схема контроля паяного соединения на отдираание

контроле механических свойств паяных соединений. В зависимости от степени ответственности паяных изделий могут проводиться лабораторные испытания отдельных узлов или полностью изделий в условиях, имитирующих эксплуатационные нагрузки. Особо ответственные паяные конструкции подвергаются натурным испытаниям в условиях эксплуатации. При работе паяного соединения в конструкции в нем могут возникнуть напряжения растяжения, сжатия, сдвига и сложные напряженные состояния, когда одновременно возникают различные напряжения. Для паяных соединений получили наибольшее распространение испытания на срез и на отрыв.

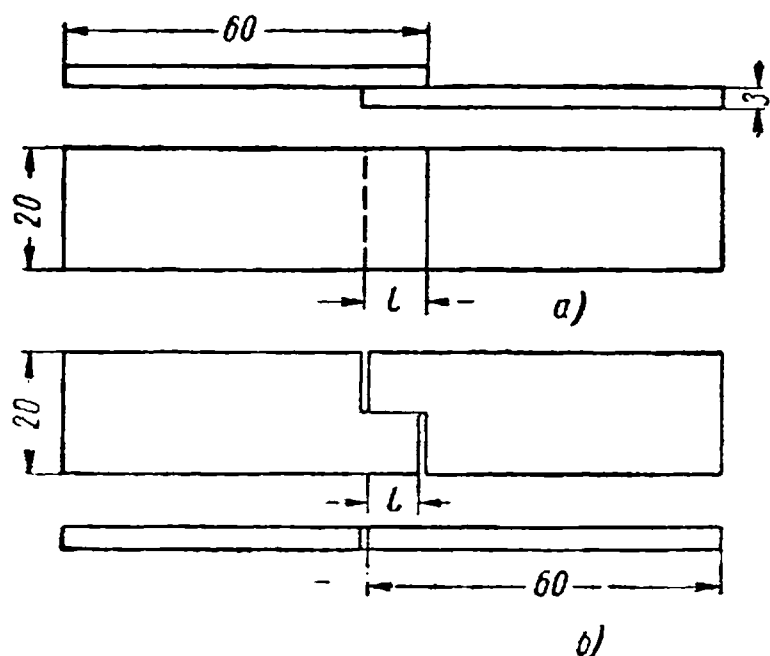


Рис. 121. Форма плоских образцов:

a — внахлестку; *б* — ступенчатая

При проведении механических испытаний различают кратковременные статические испытания, длительные статические испытания, динамические испытания при ударных нагрузках, испытания на усталость.

Для паяных соединений получили распространение, главным образом, кратковременные статические испытания плоских и круглых образцов. Форма и размеры образцов для механических испытаний паяных соединений определяются методом испытания и кон-

струкцией паяного изделия. Форма головок образцов выбирается в соответствии со способом крепления в захватах машины для испытания.

Испытания паяных образцов на срез проводятся 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. 121, *a*. Недостатком их является несимметричное приложение нагрузки в процессе испытания, в результате чего образец по шву работает не только на сдвиг, но и частично на отрыв.

Чтобы избежать этого, применяют нахлесточные образцы, изображенные на рис. 121, *б*, которые при испытании обеспечивают работу шва только на срез. При испытании на срез применяют также круглые образцы, изображенные на рис. 122. Зазор в соединении такого образца устанавливается в соответствии с чертежом изделия. Поверхности, подлежащие пайке, зачищаются тонкой наждачной бумагой и обезжириваются. Стержни образца закрепляются в приспособлении, обеспечивающем постоянный зазор в процессе пайки. Припой в виде кольца укладывается при сборке. При ручной пайке припой может применяться в виде

прутка. Нагрев прекращается после образования в соединительном зазоре сплошной галтели припоя. После затвердевания припоя производится испытание образца на растяжение при комнатной температуре. Недостатком круглых образцов является сложность их изготовления.

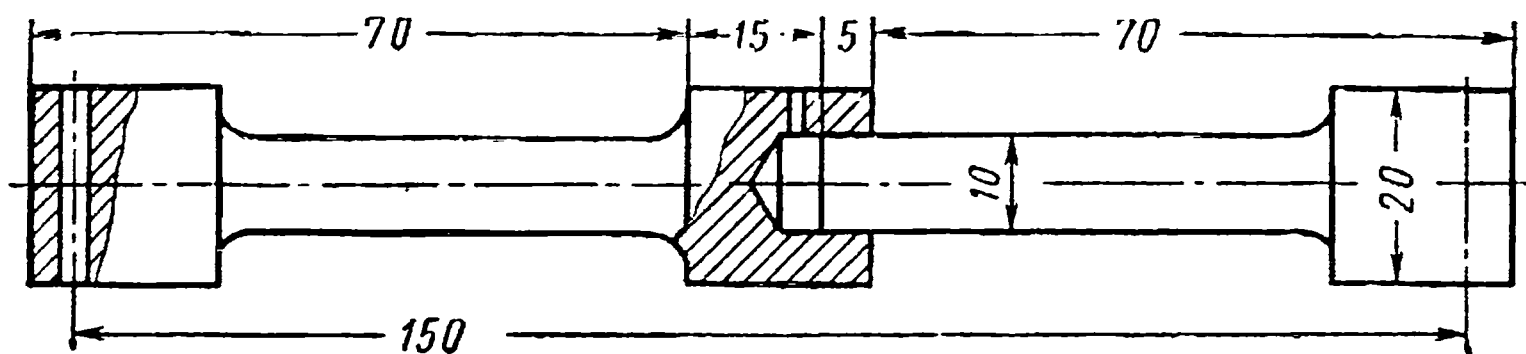


Рис. 122. Форма круглого образца для испытания паяного соединения на срез при растяжении

Более простыми являются образцы для испытания паянных соединений на срез при приложении к образцу нагрузки на сжатие. Форма такого образца и схема испытания приведены на рис. 123. Этот метод испытания чаще применяется для образцов, паяных с применением низкотемпературных припоев, но он с успехом может использоваться и для соединений, паянных высокотемпературными припоями.

При испытании паяных образцов на срез следует иметь в виду, что толщина основного металла образца и величина нахлестки (перекрытия) выбираются 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 срезаются фрезеровкой или обработкой на токарном станке. Наиболее пригодным для таких испытаний является ступенчатый образец, изображенный на рис. 121, б. В круглых образцах, спаянных с перекрытием, галтель можно удалить только с одной стороны, поэтому испытание их без галтелей не производится.

Иногда для определения прочности паяного соединения проводятся испытания на отрыв. В этом случае применяют плоские или круглые образцы, спаянные встык. Форма плоского образца приведена на рис. 124. Две пластины собираются встык и соединяются пайкой в соответствии с технологией, принятой для дан-

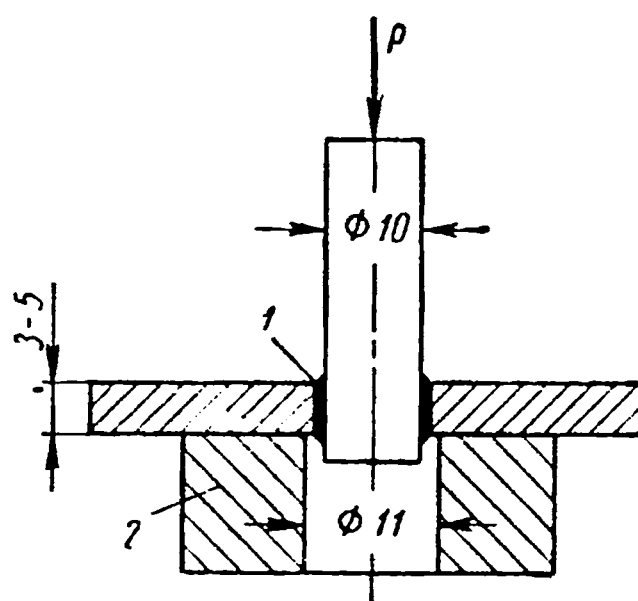


Рис. 123. Форма образца и схема испытания на срез при сжатии:

1 — паяный шов; 2 — кольцевая подставка

ного изделия. Перед пайкой образцы закрепляют в зажиме, чтобы обеспечить постоянный зазор в соответствии с чертежом. Присадочный металл при ручной пайке вводится через отверстия в одной из пластин. При пайке в печи припой наносится при сборке образца. Нагрев прекращается, как только в верхней части соединительного зазора образуется непрерывная линия жидкого при-

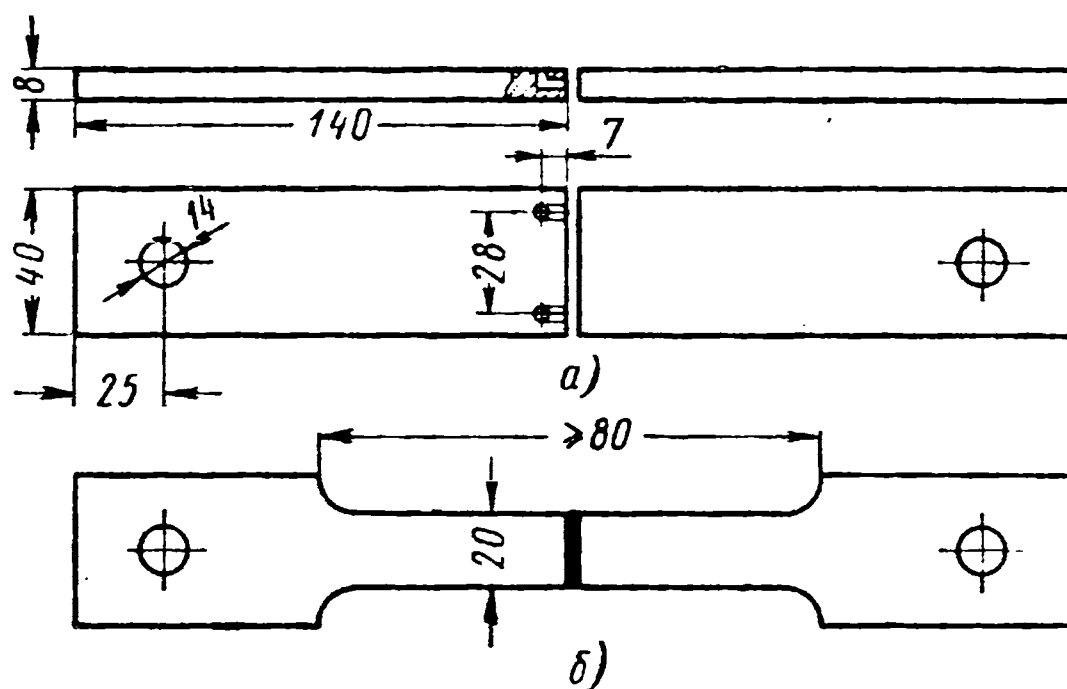


Рис. 124. Форма плоского образца, паянного встык:
а — при сборке под пайку; б — после подготовки к испытанию

поя. Спаянные пластины остаются в приспособлении до отвердевания припоя, после чего из них вырезается образец для испытания на разрыв (рис. 124, б). Испытание проводится при комнатной температуре.

Испытание паяных соединений на отрыв применяют иногда при внецентренном приложении нагрузки. При этом происходит постепенный разрыв (раздир) паяного шва. Форма образца для этого вида испытания приведена на рис. 125.

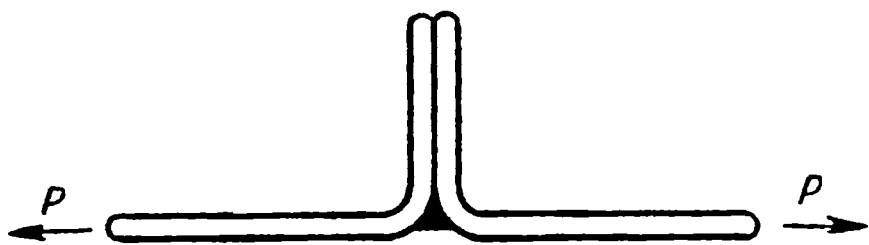


Рис. 125. Форма паяного образца для испытания на отрыв

Если паяемое изделие должно работать при низких температурах или в условиях глубокого холода, то испытуемые образцы помещаются в криостат, устанавливаемый на обычные разрывные или другие испытательные машины. После охлаждения образца до заданной температуры он подвергается механическим испытаниям непосредственно в криостате.

Испытания на длительную прочность применяются для соединений, предназначенных для эксплуатации при высоких температурах. Длительной прочностью называют сопротивление материала механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки. При этих испытаниях обычно

используется то же оборудование, что и при испытаниях на ползучесть.

Для определения предела длительной прочности паяных соединений испытывают при различных нагрузках большое количество образцов, нагретых до заданной температуры. При этом каждый образец доводится до разрушения. Полученные данные используются для построения графика зависимости длительной прочности от времени, при помощи которого можно определить предел длительной прочности для заданного времени и температуры.

Прочность паяных соединений при ударных нагрузках обычно определяется на маятниковых копрах. При испытании могут применяться стандартные образцы без надреза, спаянные посередине.

Если паяемое изделие в эксплуатационных условиях подвергается вибрационным и другим повторно-переменным нагрузкам, то паяные соединения, а иногда и сами изделия подвергаются испытаниям 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 общепринятая методика этого испытания в настоящее время находится в стадии разработки.

При подготовке заготовок образцов для механических испытаний под пайку необходимо применять обработку только на станках, чтобы обеспечить по соединяемым пайкой поверхностям равномерный зазор. Не допускается подготовка плоских образцов путем вырезки из листа на ножницах.

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. При проведении испытаний всегда необходимо выдерживать эти условия.

Металлографические исследования. При разработке технологии пайки и исследовании свойств паяных соединений широко применяется металлографический анализ, заключающийся в исследовании 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 при просмотре шлифа будет искажать результаты микроструктурного анализа. При травлении шлифов ввиду различного электрохимического потенциала зоны сплавления, диффузионных зон и основного металла травимость их будет

различной, поэтому микроструктура паяного шва выявляется неравномерно. По этим причинам для получения качественных шлифов применяют специальную методику их приготовления. 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. 47 [39].

Таблица 47

Паяемый металл	Припой	Составы травителей и способы травления
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	Оловянно-свинцовый	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	Оловянно-свинцовый	1. Электротравление в H_3PO_4 (уд. вес 1,54), плотность тока до 0,5 а/дм ² . Травитель выявляет 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 не-травленном виде. При этом на шлифе выявляются 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 происходит при рассматривании неметаллических включений.

После просмотра нетравленного шлифа его подвергают травлению. Изучение травленных шлифов обычно производят при увеличении микроскопа в 100—1500 раз. На шлифе изучают структуру зоны сплавления, диффузионные зоны и основной металл, а также мелкие дефекты, которые выявляются после травления. Особое

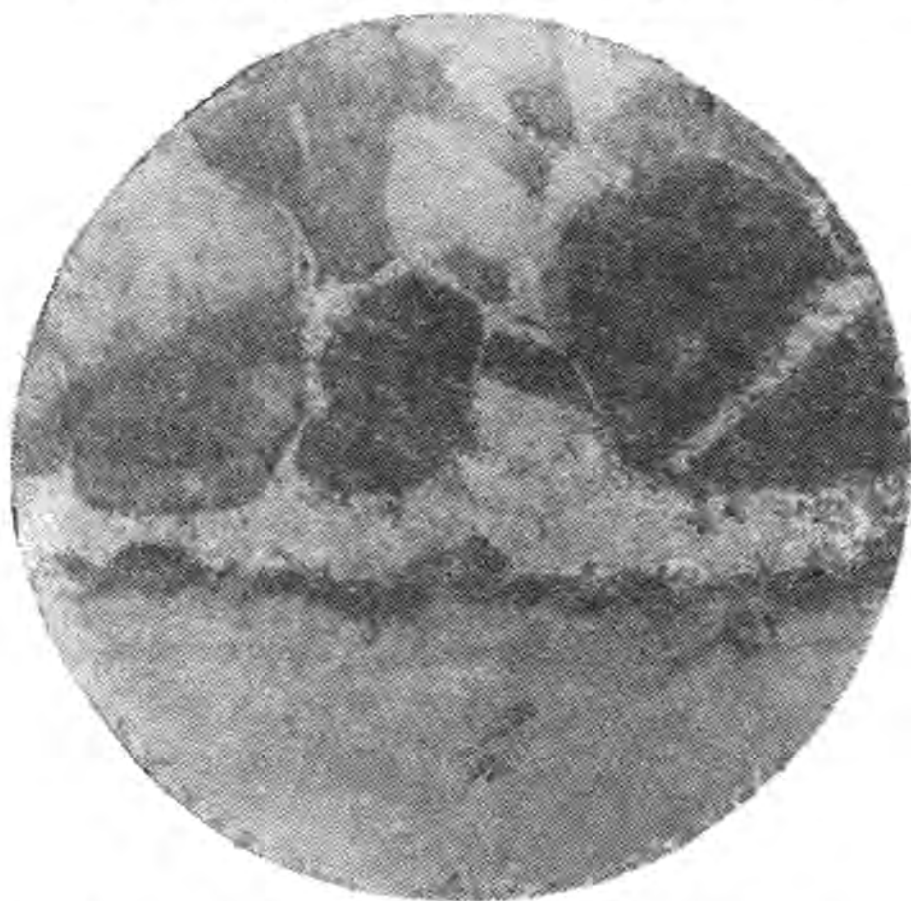


Рис. 126. Микроструктура шва при пайке нержавеющей стали X18H9T с безкислородной медью припоем ПСр72; $\times 200$



Рис. 127. Микроструктура шва при пайке меди серебряным припоем, содержащим палладий (по Л. Л. Гржимальскому); $\times 200$

внимание обращается на характер структурных составляющих, расположенных в контакте основной металл — припой, так как это в значительной части определяет прочность паяного соединения.

При высоких температурах в процессе пайки происходит интенсивное взаимодействие между основным металлом и припоем, что можно видеть по микроструктуре шва. На рис. 126 приведена микроструктура соединения стали X18H9T, покрытой никелем, с безкислородной медью серебряным припоем ПСр72, из которой можно видеть, что зерна меди по границе шва интенсивно растворялись в жидком припое и последний проник в основной металл на большую глубину. Это объясняется тем, что припой, растворяя покрытие, обогащается никелем, а как показано выше (рис. 53), наличие никеля в серебряном припое способствует интенсивному проникновению его по границам зерен меди. С другой стороны, введение в серебряный припой Пср 72 палладия не вызывает такого значительного растворения меди по границам зерен, что

по-видимому объясняется преобладанием фронтальной диффузии меди в расплавленный припой. На рис. 127 приведена микроструктура шва, полученная при пайке меди в вакууме с применением серебряного припоя, содержащего 20% Pd. Как можно видеть из микроструктуры, по границе шва имеет место незначительное растворение основного металла припоем, почти что не наблюдается проникновение припоя по границам зерен.

При пайке разнородных металлов характер взаимодействия расплавленного припоя с соединяемыми металлами может быть различным и определяется соответствующими диаграммами состояния. На рис. 128 приведена микроструктура соединения вольфрама с молибденом, паянного железом в среде водорода при температуре 1600° С. Из микроструктуры можно видеть, что со стороны молибдена происходит интенсивное растворение основного металла, причем припой не проникает по границам зерен, а как бы вымывает отдельные частицы молибдена, которые отрываются и переходят в шов. Более высокую растворимость молибдена в жидком железе можно объяснить, во-первых, тем, что молибден интенсивнее растворяется в расплавленном железе по сравнению с вольфрамом, и, во-вторых, тем, что температура плавления молибдена значительно ниже температуры плавления вольфрама.

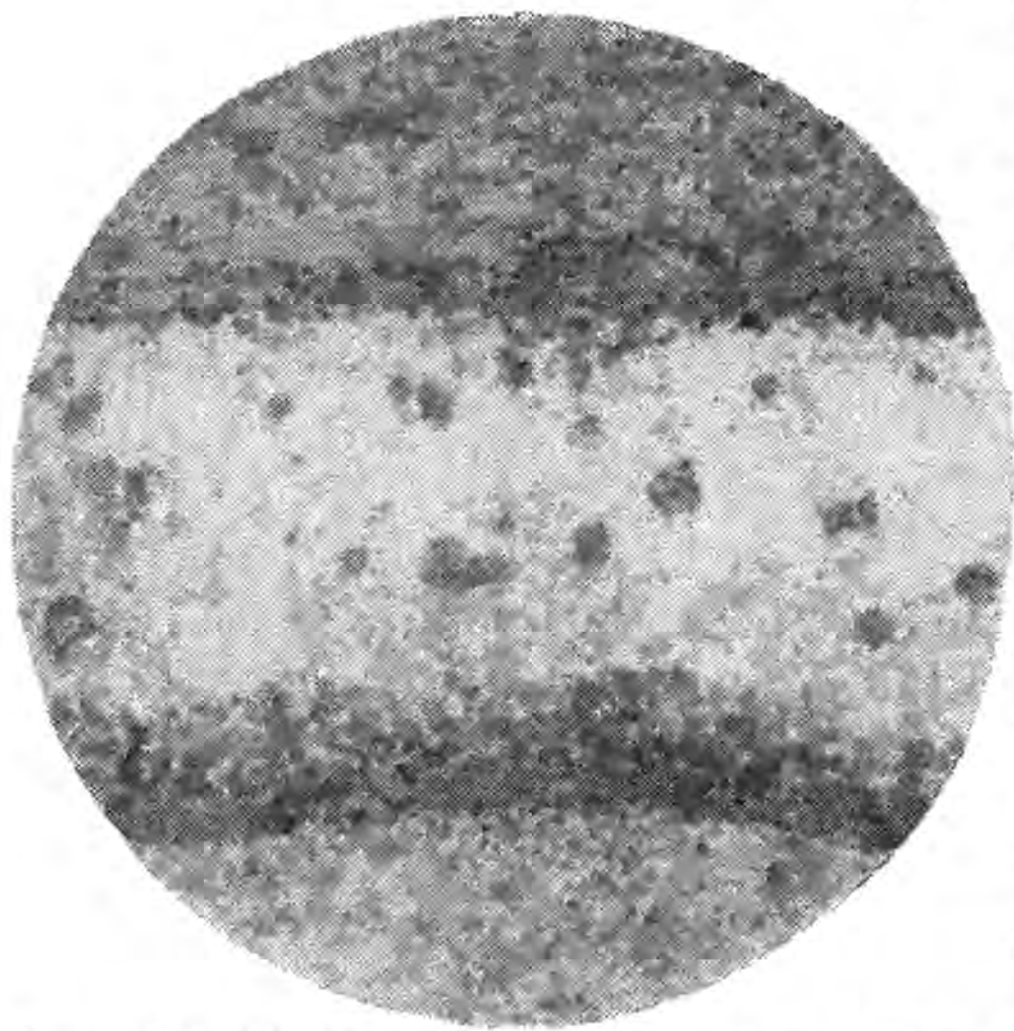


Рис. 128. Микроструктура шва при пайке железом вольфрама с молибденом (по Л. Л. Гржимальскому); $\times 200$

ффрама с молибденом, паянного железом в среде водорода при температуре 1600° С. Из микроструктуры можно видеть, что со стороны молибдена происходит интенсивное растворение основного металла, причем припой не проникает по границам зерен, а как бы вымывает отдельные частицы молибдена, которые отрываются и переходят в шов. Более высокую растворимость молибдена в жидком железе можно объяснить, во-первых, тем, что молибден интенсивнее растворяется в расплавленном железе по сравнению с вольфрамом, и, во-вторых, тем, что температура плавления молибдена значительно ниже температуры плавления вольфрама.

При исследовании паяных соединений часто одновременно с микроанализом производят измерение микротвердости отдельных структурных составляющих зоны сплавления, диффузионных зон и основного металла с помощью прибора микротвердости ПМТ-3.

Наряду с перечисленными средствами исследования структуры паяных швов в последнее время начинают находить применение микрорентгеновский анализатор, позволяющий определять химический состав в любой точке паяного шва, высокотемпературный микроскоп с тепловым травлением шлифов, а также метод радиоактивных изотопов, дающий возможность более глубоко изучать процессы диффузии в паяных соединениях.

Наряду с перечисленными средствами исследования структуры паяных швов в последнее время начинают находить применение микрорентгеновский анализатор, позволяющий определять химический состав в любой точке паяного шва, высокотемпературный микроскоп с тепловым травлением шлифов, а также метод радиоактивных изотопов, дающий возможность более глубоко изучать процессы диффузии в паяных соединениях.

Коррозионные испытания. Коррозионные испытания паяных

образцов и изделий имеют целью определить пригодность их для продолжительной работы в условиях эксплуатации. Испытания на коррозионную стойкость делятся на три группы: лабораторные, в эксплуатационных условиях, натурные испытания паяных изделий.

Качественная оценка коррозионной стойкости производится внешним осмотром. При количественной оценке производят взвешивание образцов, определение механических свойств, исследование структуры.

Коррозионная стойкость паяных соединений при электрохимической коррозии обычно определяется:

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

Условия испытания определяются требованиями к паяному изделию. Они обычно подбираются 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, могут испытываться в условиях высоких температур при воздействии различных газовых сред.

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. Про-

цесс 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.

Заготовка под пайку может производиться механической обработкой, литьем, штамповкой и другими методами. Ограничения в применении способов заготовки деталей под пайку лимитируются точностью и чистотой обработки соединяемых поверхностей, требования к которым диктуются применяемым методом пайки. Так, для пайки-сварки можно применить 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 производится их очистка. Для этой цели применяется пескоструйная или гидropескоструйная обработка, травление, а в индивидуальном производстве также зачистка металлической щеткой, напильником, наждачной бумагой и т. п. Пескоструйную обработку заготовок под пайку необходимо производить 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. Гидropескоструйная обработка — более гигиеничный способ обработки поверхностей, так как не вызывает пылеобразования.

Травление поверхности перед пайкой является прогрессивным и наиболее производительным способом очистки поверхностей

деталей. Этот способ наиболее 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. применяются 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 микропоры в металле, 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. Нанесение покрытий производится также в гальванических цехах.

Сборка под пайку должна производиться в отдельном хорошо освещенном помещении, которое необходимо выбирать таким образом, чтобы операция сборки входила в общий технологический поток. При изготовлении паяных конструкций наиболее часто производится полная сборка изделия, после чего следует пайка. При применении ступенчатой пайки предварительно может производиться сборка и пайка 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. В связи с проблемой всемерного сокращения трудоемкости технологических процессов, в машиностроении стоит вопрос о механизации сборочных работ. В настоящее время процессы сборки перед пайкой механизированы только на отдельных предприятиях, например, при изготовлении автомобильных радиаторов и печатных панелей. Основной же объем сборочных работ выполняется вручную. Поэтому задача комплексной механизации и автоматизации сборочных работ при изготовлении паяных конструкций, в первую очередь в крупносерийном и массовом производстве, очень актуальна.

При организации цеха или участка пайки необходимо закладывать 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 зависит от степени их специализации и от 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 производстве 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 применяется 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, 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 ответственных 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 в системе ЦЗЛ 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, которые могут проходить сборку и пайку на отдельных рабочих местах. Технологический процесс сборки и пайки разрабатывается различно 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 составляются технологические карты, а для простых — маршрутные ведомости. Для изделий крупносерийного и массового производства должны составляться подробные технологические карты, которые при массовом производстве дополняются еще инструкционными картами по каждой операции.

Маршрутные ведомости должны включать 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.

Технологические карты, помимо сведений, содержащихся в технологических ведомостях, должны иметь:

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, составляются подобно технологическим картам, но отдельно на каждую операцию или несколько операций с эскизами и подроб-

ным описанием каждого перехода. Помещаемые в технологических ведомостях и в технологических и инструкционных картах данные о режимах пайки должны включать:

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

2. Продолжительность выдержки.

3. Скорость нагрева.

4. 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 определяется на основе ведомственных или заводских нормалей, а также технических данных применяемого оборудования. Под технически обоснованной нормой времени понимается 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

$$t_{шт} = t_o + t_s + t_{об} + t_{отд},$$

где t_o — основное или технологическое время, затрачиваемое непосредственно на процесс пайки;

t_s — 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:

$$t_{оп} = t_o + t_s.$$

Подготовительно-заключительным временем $t_{п.з.}$ называется 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, и оно вклю-

чается в штучную норму времени в составе времени на обслуживание рабочего места.

При нормировании труда применяется аналитический и опытно-статистический способ установления норм.

При определении норм времени на процесс сборки и пайки, основным должен быть расчетно-аналитический метод нормирования. Этот метод может применяться 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. Норма времени, необходимого для выполнения заданной операции при этом методе, определяется расчетным путем, исходя из условий сборки, режима пайки, технических характеристик оборудования и характера производства.

Количество производственных рабочих, занятых на сборке и пайке, определяется, исходя из трудоемкости работ на годовую программу и годового фонда времени. Количество вспомогательных рабочих и обслуживающего персонала устанавливается 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 производится подбор рабочих.

Расход припоев и флюсов зависит от типа шва, метода 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: во-первых, зависящие от геометрии шва и, во-вторых, — от метода пайки, применяемого оборудования, характера производства, точности сборки и качества выполнения работ. Обычно расход припоев определяется на основе расчетов и уточняется 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 G на изделие с учетом безвозвратных потерь может быть определена из соотношения

$$G = G_{н.д} \frac{100}{100 - \alpha},$$

где G — расход припоя в кг;

$G_{н.д}$ — масса припоя, расходуемого на паяемую деталь, в кг;

α — процент угара и других безвозвратных потерь припоя.

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

$$G_{н.д} = Fl\rho\varphi 10^{-3},$$

где F — площадь шва в $см^2$;

l — величина соединительного зазора в $см$;

ρ — плотность припоя в $г/см^3$;

φ — коэффициент, учитывающий потери припоя за счет наплывов в паяном соединении.

Коэффициент φ в зависимости от способа пайки и условий производства может принимать значения 1,2—1,8.

Норма расхода припоя G на изделие может быть найдена также по удельным нормам расхода, если известны площадь спая и длина галтельных участков.

Норма расхода припоя на заполнение зазора определяется из соотношения

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

где F — площадь шва в $см^2$;

q — норма расхода в $г/см^2$.

Норма расхода припоя на образование галтелей определяется из соотношения

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

где l — протяженность галтелей в паяном соединении в $см$;

q' — удельная норма расхода припоя на галтель в $г/см$.

Полная норма расхода определяется как сумма 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. 48 [37].

Удельные нормы расхода серебряных припоев в $г$ на образование $1 пог. см$ галтелей приведены в табл. 49.

В случае пайки-сварки норма расхода припоя подсчитывается по методике, аналогичной применяемой для расчета расхода припоя при сварке плавлением.

Величина зазора в мм	ПСр 10	ПСр 12	ПСр 25	ПСр 45	ПСр 65	ПСр 70
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

При лужении масса полуды в кг определяется по формуле

$$G_n = F_n l_n \rho 10^{-3},$$

где F_n — поверхность детали, подвергаемая лужению, в $см^2$;

l_n — толщина слоя полуды в $см$;

ρ — плотность припоя в $г/см^3$.

Таблица 49

Толщина соединяемых элементов в мм	Размеры галтели в мм	ПСр 10	ПСр 12	ПСр 25	ПСр 45	ПСр 65	ПСр 70
До 0,2 вкл.	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 агрегатах может быть задана режимом работы агрегата. Так, на Московском автозаводе им. Лихачева при лужении ленты перед заливкой баббитом толщина слоя полуды принята равной 0,003 мм, при лужении радиаторных трубок в трубочной машине — 0,015 мм. При лужении методом погружения автомобильных подшипников перед заливкой их баббитом на центробежных машинах или на машинах для литья под давлением толщина слоя полуды составляет 0,07 мм.

Удельные нормы расхода припоев при лужении автомобильных подшипников методом погружения приведены в табл. 50.

Суммарные потери при лужении на угар припоя в ванне и механические потери составляют в среднем 10%.

Нормы расхода флюсов при пайке подсчитываются, исходя из площади шва. Данные по расходу флюсов на единицу площади

шва при пайке низкотемпературными припоями приведены в табл. 51 [4].

При пайке с применением контролируемых газовых атмосфер после заполнения пространства печи или контейнера последую-

Таблица 50

Марка припоя	Норма расхода в г на 1 м ² площади	Средняя толщина слоя припоя в мм
ПОС-40	511,0	0,07
ПОС-30	678,0	0,07
ПОС-4-6	759,0	0,07

Таблица 51

Флюс	Норма расхода в г/см ²	Марка флюса	Норма расхода в г/см ²
Водный раствор хлористого цинка	0,18	ВТС	0,15
Прима 1	0,12	Кани-фоль	0,13
Паста 15-85	0,15	КЭ	0,10
ФИМ	0,11	ЛТИ	0,15

щий расход газовой среды незначителен. Обычно в магистрали, подающей газовую атмосферу, поддерживается давление не выше 1333,2—3999,6 н/м² (10—30 мм рт. ст.).

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

В нашей стране имеются широкие возможности для создания наиболее 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.

Программой КПСС, принятой XII съездом, поставлена задача дальнейшего улучшения условий труда. В течение 1961—1970 годов намечено осуществить переход на шестичасовой рабочий день — при одном выходном дне в неделю, или на 35-часовую рабочую неделю — при двух выходных днях, а на подземных работах и производствах с вредными условиями труда — на пятичасовой рабочий день, или на 30-часовую пятидневную рабочую неделю.

В течение 1971—1980 годов на базе роста производительности труда начнется переход к еще более сокращенной рабочей неделе.

Таким образом, Советский Союз станет страной самого короткого, самого производительного и наиболее высокооплачиваемого рабочего дня. Значительно возрастет свободное время трудящихся, что создаст дополнительные условия для повышения их культурно-технического уровня.

Наряду с сокращением рабочего дня Программа КПСС предусматривает увеличение продолжительности ежегодных оплачиваемых

мых отпусков трудящихся. Постепенно продолжительность минимального отпуска всех рабочих и служащих увеличится до трех недель, а в дальнейшем до месяца.

Одной из важных задач подъема народного благосостояния является всемерное оздоровление и облегчение условий труда. На всех предприятиях за период с 1961 по 1970 годы будут внедрены современные средства техники безопасности и обеспечены санитарно-гигиенические условия, устраняющие производственный травматизм и профессиональные заболевания. Постепенно будут ликвидированы ночные смены на предприятиях, за исключением тех, где круглосуточная работа обусловливается технологическим процессом 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

Выплавка припоев производится, как правило, под слоем флюса, поэтому вопросы техники безопасности при производстве припоев и флюсов рассматриваются одновременно.

При производстве припоев и флюсов путем сплавления их 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 припоев и флюсов, в зависимости от их состава, 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. Он добавляется 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 мест-

ная вентиляция и соблюдение других мер предосторожности против попадания бериллиевой пыли и паров бериллия в организм.

При выплавке оловянно-свинцовых 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 вызывает сильные ожоги и воспаления при попадании на кожу. Хлористый аммоний при температуре свыше 100°C 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. Предельно допустимые концентрации ядовитых газов, паров и пыли в мг/дм^3 в воздухе производственных помещений приведены ниже. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий изложены в нормали Н101-54, утвержденной Советом Министров СССР.

Аммиак	0,02	Серная кислота и серный ангидрид	0,002
Ацетон	0,2	Серный ангидрид (сернистый 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_2O_5	0,005	Дихлорэтан	0,05
Оксид 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

При выплавке припоев и флюсов плавильщик должен пользоваться труднозагорающейся одеждой и темными очками, предохраняющими глаза от действия лучистой энергии и брызг металла и солей. Помещение, в котором производится плавление припоев и флюсов, должно иметь приточно-вытяжную вентиляцию.

Перед введением в расплавы металлов и солей они должны быть подогреты до полного удаления влаги. В противном случае за счет резкого парообразования в момент введения компонентов,

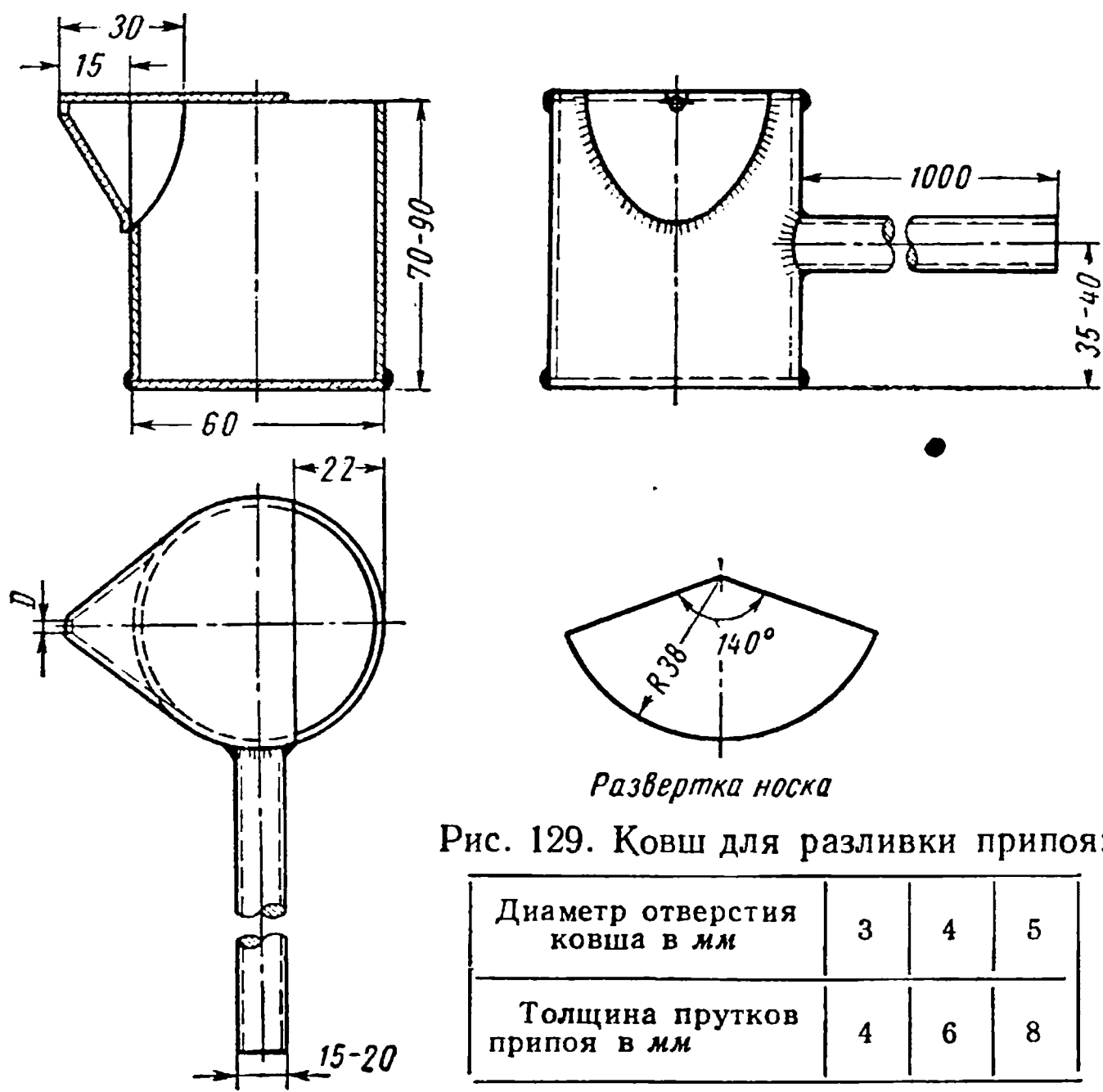


Рис. 129. Ковш для разливки припоя:

Диаметр отверстия ковша в мм	3	4	5
Толщина прутков припоя в мм	4	6	8

содержащих влагу, возможен выброс или разбрызгивание расплавленных металлов и солей. При плавлении гигроскопичных флюсов ложка-шумовка или стержень, которые употребляются для перемешивания расплава и удаления шлака перед погружением в расплав, должны подогреваться с целью удаления влаги с их 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 введения указанных компонентов сплав нельзя перегревать, так как это вызывает усиление их испарения. При разливке припоев и флюсов, во избежание взрывов, изложницы или формы для припоев должны быть чистыми и подогреты до полного удаления влаги. Разливка должна вестись ковшом с длинной рукояткой. Чертеж ковша для разливки припоев приведен на рис. 129.

§ 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, гидropескоструйные установки, дробеструйные камеры. Очистка сухим песком вызывает профессиональные заболевания, поэтому законодательством по охране труда она запрещена. Очистительные установки необходимо располагать в отдельных помещениях, которые должны быть оборудованы мощной вытяжной вентиляцией с очистным устройством. Если камера установлена в помещении

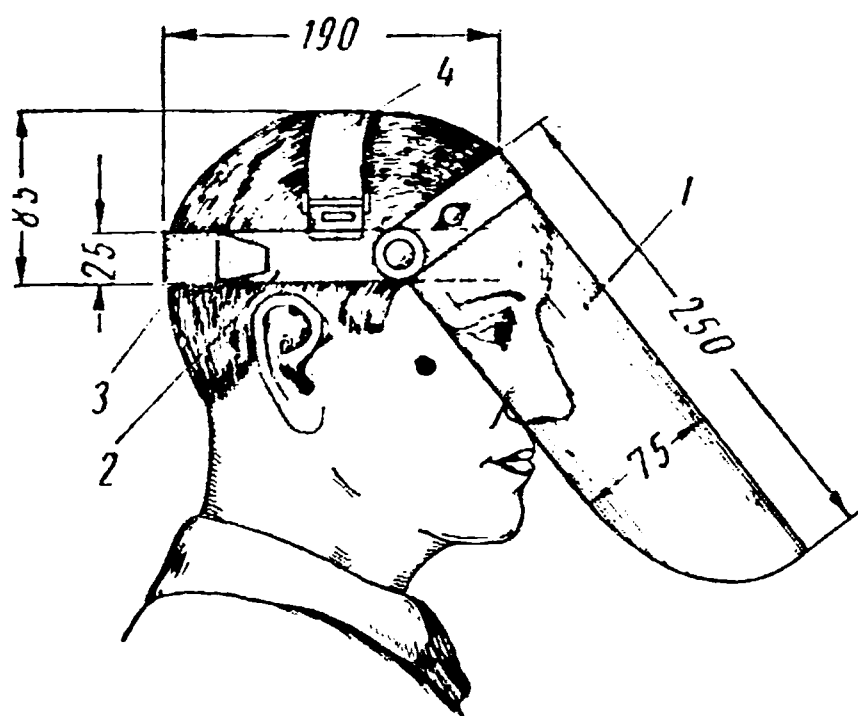


Рис. 130. Общий вид защитного экрана

цеха, то необходимо обеспечить соответствующее уплотнение ее двери и люков, исключающее возможность попадания пыли в общее помещение. При применении травления заготовок травильное отделение необходимо также располагать в отдельном помещении. Работать с кислотами и щелочами необходимо в резиновых перчатках и кислотостойкой одежде. Лицо необходимо защищать от брызг защитными очками или экраном из целлулоида или органического стекла. Общий вид защитного экрана показан на рис. 130. Экран 1 укреплен шарнирно на налобной дуге 2 из алюминия. Положение экрана и крепление на голове осуществляется кожаным 4 и резиновым 3 ремнями.

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, как бензол и газолин, огнеопасны и ядовиты, поэтому применения их необходимо избегать. Пары трихлорэтилена и тетра-

хлорэтилена 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, после этого только 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 оловянно-свинцовыми припоями контакт с ними, а также с паяными деталями приводит к загрязнению свинцом кожи рук и одежды работающих. Концентрация свинца в воздухе на рабочих местах паяльщиков может достигать $0,98 \cdot 10^{-6} \text{ н/м}^3$ ($0,1 \text{ мг/м}^3$). Поэтому в цехах с большим объемом пайки необходимо проведение профилактических мероприятий. Для участков пайки и монтажа, сопровождающегося пайкой, следует отводить отдельные помещения. Рабочие поверхности оборудования необходимо покрывать легкообмываемыми материалами, стационарные места пайки необходимо 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 за счет сгорания загрязнений, имеющихся на поверхности паяемых деталей, или при нагреве флюсов и припоев. Все эти испарения загрязняют атмосферу, поэтому необходимо постоянно следить за этим и применять меры для их удаления. Наиболее вредны испарения галоидных флюсов, особенно содержащих фториды. Все склянки с флюсами, содержащими соединения фтора, должны иметь наклейки с указанием мер предосторожности при их применении.

Нельзя допускать образования ядовитых паров или пыли кадмия, свинца и цинка, что усиливается, 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 опасным является включение пострадавшего в электрическую цепь сразу к двум фазам. Через организм человека в этом случае протекает ток 220 или 380 в, что может повлечь смертельный исход.

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

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

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

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

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

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

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

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 должны быть очищены от загрязнений. Для предупреждения выброса расплавленных солей детали перед погружением необходимо подогреть до полного удаления влаги. В случае прорыва тигля под ним должен быть предусмотрен сток солей в аварийный сборник. Над каждой ванной должна быть предусмотрена местная вентиляция.

• При применении пайки погружением в расплавленные припои 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 безопасной работы при эксплуатации оборудования и производстве паяльных работ является четкая организация труда и соблюдение правил техники безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. М., Гостехиздат, 1947.
2. Алов А. А. Основы теории процессов сварки и пайки. М., Машгиз, 1964.
3. Алов А. А. и др. К вопросу о природе процессов сварки и пайки. «Сварочное производство», № 12, 1956.
4. Апухтин Г. И. Технология пайки монтажных соединений в приборостроении. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
5. Архаров В. Н. и др. Детали структуры окалины и их значение в процессе высокотемпературного окисления железа и стали в связи с проблемой жаростойкости. В сб. «Исследования по жаропрочным сплавам», т. II, АН СССР, М., 1957.
6. Асиновская Г. А. Газопламенная пайка металлов. М., Машгиз, 1955.
7. Брукер Х. Р. и Битсон Е. В. Пайка в промышленности. М., Оборонгиз, 1957.
8. Бугаков В. З. Диффузия в металлах и сплавах. Л.—М., Гостехтеориздат, 1949.
9. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т. 1 и 2, М., Физматгиз, 1959.
10. Гельд П. В. и др. Роль поверхностных явлений в процессах восстановления окислов. Труды УПИ. Сб. 49, Свердловск, Metallurgizdat, 1954.
11. Герцрикен С. Д., Дехтяр И. Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. Физматгиз, 1960.
12. Гошин С. А. и др. Полуавтомат для пайки зубков. «Сварочное производство» № 6, 1961.
13. Губин А. И. и Китаев А. М. Сварка и пайка тонкостенных трубопроводов. М., Машиностроение, 1964.
14. Губин А. И. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. М., Машиностроение, 1964.
15. Гуревич Е. С. Пайка металлов мягкими припоями с применением нового флюса ЛТИ. Л., ЛДНТП, 1954.
16. Данков П. Д. и др. Окисные пленки на металлах. «Изв. АН СССР, ОХН», № 5, 1942.
17. Долгов Ю. С. Оборудование и технология пайки. М., изд-во НТО Машпром, 1962.
18. Еременко В. Н. Титан и его сплавы. Киев, изд-во АН УССР 1960.
19. Есенберлин Р. Е. Пайка металлов в печах с газовой средой. Л., Машгиз, 1962.
20. Есенберлин Р. Е. Пайка металлов. Л., Машгиз, 1959.
21. Есин О. А. и Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Свердловск—Москва, Metallurgizdat, 1962.
22. Зайт В. Диффузия в металлах. М., изд-во Иностран. литерат., 1958.
23. Закатов А. Ф. Современные достижения в применении ультразвука для пайки материалов. М., ВИНТИ, 1959.
24. Иванова Л. В. и др. Флюсы Ф54А, Ф59А и Ф61А для пайки алюминия мягкими припоями. Л., ЛДНТП, 1959.

25. Каневский Я. М. Пайка алюминия и его сплавов с абразивным лужением легкоплавкими припоями. М., ЦИТЭИН, 1961.
26. Кубашевский О. и Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М., изд-во Иностран. литерат., 1955.
27. Кузнецов В. Д. Кристаллы и кристаллизация. М., Гос. изд-во техн.-теорет. литерат., 1954.
28. Лакедемонский А. В., Хрянин В. Е. Справочник паяльщика. М., Машгиз, 1963.
29. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов. М., Машгиз, 1959.
30. Лоцманов С. Н. К вопросу о пайке алюминия и его сплавов. Изд-во академии им. Н. Е. Жуковского, 1946.
31. Лоцманов С. Н. и др. Современные достижения и задачи в области пайки металлов и других материалов. В сб. «Пайка металлов в производстве и перспективы ее развития». М., МДНТП, 1962.
32. Люди русской науки. Сб. под ред. акад. С. И. Вавилова. М.—Л., изд-во Огиз, 1948.
33. Менделеев Д. И. Основы химии. Т. II, М.—Л., Госхимиздат, 1947.
34. Меттер И. Физическая природа кавитации и механизм кавитационных повреждений. Успехи физ. наук, т. XXXV, вып. 1., 1948.
35. Назаров С. Т. Методы контроля качества сварных соединений. М., Машиностроение, 1964.
36. Николаев Г. А. Сварные конструкции. М., Машгиз, 1962.
37. Нормирование расхода материалов в машиностроении. Справочник под ред. В. В. Валетова. Т. I, М., Машгиз, 1961.
38. Обреимов И. В. Молекулы и кристаллы, В сб. «Глазами ученого», изд-во АН СССР, 1963.
39. Попов А. С. Приготовление шлифов паяных соединений для микроструктурного исследования. «Заводская лаборатория», № 4, 1959.
40. Рыбаков Б. А. Ремесло древней Руси. Изд-во АН СССР, 1948.
41. Руководство по пайке металлов. Пер. с англ. Под ред. С. Н. Лоцманова, Оборонгиз, 1960.
42. Рустем С. Л. Оборудование и проектирование термических цехов, М., Машгиз, 1962.
43. Сланский А. и Воллман Я. Капиллярная пайка. Пер. с чешск. под ред. З. В. Никифоровой. М., Машгиз, 1963.
44. Спай стекла с металлом. Пер. с англ., под ред. Р. А. Нилендера. М., изд-во «Советское радио», 1951.
45. Томашев Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. Изд-во АН СССР, 1960.
46. Третьяков П. Н. К истории племен Верхнего Поволжья в первом тысячелетии н. э., «Вестник АН СССР» № 5, 1941.
47. Фролов В. В. Явления смачивания металлических поверхностей расплавленными металлами. В сб. «Защита металлов от коррозии и образование накипи». М., Машгиз, 1953.
48. Хансен М. и Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. I и II. М., Металлургиздат, 1962.
49. Хауффе К. Реакции в твердых металлах и на их поверхности. Ч. I, М., изд-во Иностран. литерат., 1962.
50. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. Пер. с англ. М., Машгиз, 1962.
51. Яновский И. И. и др. О снижении внутренних напряжений при пайке пластинок твердого сплава. — «Вестник машиностроения», № 5, 1960.
52. Ясногородский Н. З. Нагрев металлов и сплавов в электролите. М., Машгиз, 1949.
53. Beaton E. V. Brazing in Controlled Atmospheres and in vacuo. — «British Welding Journal», 5, N 4, 1958.
54. Brooks D. Brazing Titanium to Titanium and to Steels. — «Metal Treatment», 21, N 111, 1954.

55. Donnelle R. G., Slaughter G. M., The Brazing of Graphite. — «Welding Journal», 41, N 5, 1962.
 56. Keel C. G. Über die Zerstörungsfreie Qualitätsprüfung von Lötverbindungen. — «Z. Schweis—Stechnik», 53, N 6, 1963.
 57. Lucas A. Ancient Egyptian materials and industries. London, 1948.
 58. Lüder Erich. Zur Geschichte der Löttechnik. — «Die Technik», 5, N 3, 1950.
 59. Metcalfe A. G. Reaktive Brazing — a Hew Joining Method. — «Metal Progress», 83, N 5, 1963.
 60. Milner D. R. A Survey of the Scientific Principles Related to Wetting and Spreading. — «British Welding Journal», 5, N 3, 1958.
 61. Platinum Alloys for Brazing Tungsten. M. H. S. — «Platinum Metals Rev.», 7, N 2, 1963.
 62. Rudy J. F., Necheles R. M., Schwartzbart H. Quartz — Lamp Radiant Brazing of Titanium—Alloy Honeycomb Sandwich panels. — «Welding Journal», 38, N 4, 1959.
 63. Silman H., Stein W. Non—Corrosive Soldering Fluxes. — «Metal Industry», 62, N 20, 1943.
 64. Zimmerman K. F. Mechanisiertes Hartlöten. — «Z. Schweissttechnik», 53, N 8, 1963.
 65. Missiles, Design and Development, 6, № 12, 1960.
-

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Аргон 49
Азот 49, 50
Аммиак 50, 51

Б

Бор 22
— трехфтористый 53, 54

В

Водород 50
Вакуум 54
Восстановление окислов 58—66

Г

Газовые среды (атмосферы) 48
— нейтральные атмосферы 49
— активные атмосферы 50—54
— атмосфера экзотермическая 51
— — эндотермическая 52
Гелий 49
Горелки 210

Д

Диссоциация окислов 55
Диффузия и растворение при пайке
99—106
— в паяных швах 106—113
Деформации в паяных конструкциях
138—142
Дефекты паяных изделий 215

З

Заготовки для пайки 230

К

Классификация методов пайки 11
— способов пайки 16
Капиллярный зазор 10
— течение припоев 10, 87—98
Кристаллизация при пайке 113—118
Конструирование паяных изделий 119,
123
Коэффициенты линейного расширения
140
Контейнеры 192
Контроль качества паяных изделий 215
— методы и оборудование 217

— — — — методом просвечивания
лучами Рентгена 219
— — — — без разрушения 218
— — — — пневмоиспытанием 218
— — — — гидроиспытанием 218
— — — — теченскателем 218
— — — — ультразвуком 221
— — — — методом разрушения 221—
225
— — — — магнитным методом 220
— — — — методом металлографиче-
ского исследования 225
— — — — методом коррозионных
испытаний 228

М

Методы пайки 11, 12
Микроструктуры паяных швов 109—
117

Н

Напряжения в паяных конструкциях
138—142

О

Окисные пленки 20, 27—31
— — удаление 20
— — — флюсом 20
— — — в газовых средах 21
— — — физико-механическими спо-
собами 22
— — — самофлюсующими припоями
22
— — состав 22
— — схема роста 23
— — законы роста 24—31
Обработка деталей после пайки 160
Оборудование для пайки 143
— — — в вакууме 189
— — — индукционной пайки 195
— — — сопротивлением 201
— — — погружением 204
— — — радиационной пайки 209
— — — горелками 210
Организация паяльных работ 229

П

Пайка 10
— история 5
— применение 6, 7

- преимущества 8, 9
- перспективы развития 8, 9
- особенности 10
- определение 10
- «твердая» 11
- «мягкая» 11
- методы 11
- капиллярная 12
- диффузионная 12
- контактно-реактивная 13
- реактивно-флюсовая 14
- способы 15, 16
- в печах 15, 151
- индукционная 15, 153
- сопротивлением 17
- погружением в расплавленные соли 17, 155
- в электролите 17
- погружением в расплавленный припой 17, 156
- волной припоя 18
- радиационная 18, 158
- горелками 18, 159
- паяльниками 19, 159
- термитная 20
- электронагревательными матами 20
- нагретыми блоками 20
- Пайка—сварка 14
- Паяльники 19, 212
 - периодического нагрева 19, 212
 - с электронагревом 19, 213
 - ультразвуковые 19, 214
 - абразивные 19, 214
- Прочность паяных изделий 130—142
 - — соединений в зависимости от величины зазора 130, 131
 - — — в зависимости от температуры 132, 134
- Подготовка поверхностей деталей к пайке 144
- Печи для пайки 182
 - — — с ручной подачей 183
 - — — с роликовым подом 184
 - — — с ленточным конвейером 186
 - — — в вакууме
- Процессы пайки 150
- Припой 10
 - медь 71
 - медно-цинковые 72
 - медно-марганцовые 74
 - медно-фосфористые 75
 - серебряные 76
 - серебряно-медные 77
 - системы серебро—медь—цинк 78
 - для пайки жаропрочных сталей и сплавов 79
 - для пайки алюминия и его сплавов 80

- для пайки магниевых сплавов 82
- оловянно-свинцовые 84
- на основе свинца 85
- кадмиевые 86
- индиевые 86
- висмутовые 87

Р

Расчет паяных соединений на прочность 135
 Рабочее место паяльщика 229

С

Соединение плоских элементов 120

- стержневых и трубчатых элементов 121
- криволинейных элементов 122

 Смачивание припоем 87, 92—98
 Сборка деталей и узлов перед пайкой 146, 231
 Способы пайки 15—20

- удаления окисной пленки 20—22
- размещения припоев при сборке под пайку 129

 Схема получения диссоциированного аммиака 193

- очистки аргона и гелия 194

Т

Технология пайки 143

- — меди и ее сплавов 162
- — конструкционных сталей 164
- — высоколегированных сталей 164
- — нержавеющей сталей 165
- — никеля и его сплавов 166
- — чугуна 167
- — инструментальных сталей 168
- — твердых сплавов 168
- — титана и его сплавов 170
- — тугоплавких металлов 172
- — бериллия 175
- — алюминия и его сплавов 176
- — магниевых сплавов 179
- — металлов с неметаллическими материалами 180

 Техническое нормирование пайки 232—238
 Техника безопасности при пайке 242

- — при изготовлении припоев и флюсов 239

У

Установка для создания вакуума 190

- — приготовления контролируемых атмосфер 193

Ф

- Флюсы и их роль в процессе пайки 31, 32
- основа 32, 33
 - активные компоненты 32—35
 - классификация 35
 - составы 35—43
 - для пайки углеродистых сталей 36
 - — — легированных сталей 37
 - — — нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов припоями на медной и никелевой основах 37

- — — сталей и медных сплавов серебряными припоями 38
- — — алюминиевых и магниевых сплавов 39
- — — сталей и медных сплавов легкоплавкими припоями 41—42
- механизм действия 43—48

Э

Эксплуатация оборудования 244

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Теоретические основы пайки металлов	10
Основные понятия	10
Окисные пленки и процессы их удаления при пайке	22
Процессы образования паяного шва	70
Глава II. Конструирование и прочность паяных изделий	119
Конструирование паяных изделий	119
Прочность паяных изделий	130
Глава III. Технология пайки и оборудование	143
Общие принципы технологии пайки	143
Технология пайки различных материалов	162
Оборудование для пайки	182
Глава IV. Контроль качества, техническое нормирование и техника безопасности	215
Контроль паяных изделий	215
Организация паяльных работ	229
Техника безопасности	238
Литература	246
Предметный указатель	249

Сергей Николаевич Лоцманов и Иван Егорович Петрунин
ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

Редактор издательства Т. Е. Черешнева
Технические редакторы: Г. В. Смирнова, Л. П. Гордеева
Корректор Ж. Л. Суходолова Переплет художника А. Г. Сорензон

Сдано в производство 29/IX 1965 г.	Подписано к печати 29/IV 1966 г.	Т-05687
Тираж 20 000 экз.	Печ. л. 15,75	Бум. л. 7,88 Бумага типографская № 2
Уч.-изд. л. 16,0	Формат 60×90 ¹ / ₁₆	Темплан 1966 г. № 36 Цена 71 коп. Зак. 644

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ», Москва, Б-66, 1-й Басманный пер., 3

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Мойсеенко, 10