Глава 29. Пайка металлов

29.1. Основные понятия и определения

Пайкой называют образование соединения с межатомными связями в результате нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации.

В качестве припоя при пайке используется металл или сплав с темпера турой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов. Для удаления оксидов с поверхности паяемого материала и припоя и предотвращения их образования в процессе пайки применяется вспомогательный материал, называемый паяльным флюсом. Свойство материалов образовывать паяное соединение при заданном режиме пайки называется паяемостью.

Растекание расплавленного припоя по паяемой поверхности и его взаимодействие с основным металлом условно протекают в три стадии.

1. Фронтальное перемещение припоя по поверхности металла характеризуется слабым взаимодействием припоя и основного материала; при по-вышоши температуры или по мере увеличения выдержки эта стадия переходит в следующую.

2. Локальное перемещение припоя и растворение паяемого металла в жидком припое характеризуются образованием легкоплавких структур (эвтектика твердых растворов с минимумом на кривой ликвидуса).

3. фронтальное растворение металла в припое характеризуется интенсивным] общим взаимодействием припоя с паяемым металлом.

Формирование конкретных структур в той или иной стадии определяется продолжительностью и температурой пайки, а также природой взаимодействующих металлов.

Наиболее прочные и пластичные паяные швы обеспечиваются при образовании твердых растворов, которые возникают при пайке металлов, обладающих общим типом кристаллических решеток и имеющих близкие значения межатомных расстояний.

Менее прочным является шов с эвтектической структурой. Такая структура образуется, если пайка осуществляется припоями эвтектического состава (ПОС61, ПСр72) или когда основной металл и металлы, входящие в состав припоя, недостаточно сходны по типу кристаллических решеток.

Отрицательно на прочность паяных швов влияет наличие хрупких интерметаллических соединений.

Процесс пайки металлов имеет много общего с процессом сварки плавлением. Однако пайка отличается от сварки следующими характерными особенностями.

1. Пайка производится при температуре ниже температуры плавления обоих или хотя бы одного из соединяемых металлов.

2. В процессе пайки между соединяемыми деталями в определенный момент находится жидкая металлическая прослойка припоя.

3. В отличие от сварки плавлением паяное соединение образуется не в результате непосредственного взаимодействия металлов соединяемых деталей, а вследствие взаимодействия припоя и основного металла.

4. Обязательным условием пайки являются смачивание паяемых поверхностей припоем, диффузия компонентов припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя и последующая кристаллизация жидкой прослойки.

Пайкой можно изготавливать сложные по конфигурации узлы и целые конструкции, состоящие из нескольких деталей, за один производственный цикл (нагрев), что позволяет рассматривать пайку (в отличие от сварки) как групповой метод соединения материалов и превращает ее в высокопроизводательный технологический процесс, легко поддающийся механизации и автоматизации.

Пайка уменьшает, а иногда полностью исключает остаточные напряжения и деформации. К числу очень важных преимуществ пайки следует отнести возможность соединения разнородных металлов, а также металлов с неметаллами. С помощью пайки можно получать неразъемные и разъемные соединения. Последнее очень важно в производстве радиоэлектронной аппаратуры, когда возникает необходимость демонтажа при настройке или замене дефектных приборов, установленных на печатной плате.

Возможность варьировать размеры соединяемых пайкой поверхностей (величины нахлестки) позволяет обеспечить равнопрочные с основном ме- таллом соединения. При

этом получается более благоприятная форм соединения с меньшей концентрацией напряжений, чем при контактной сварке.

Перечисленные выше преимущества пайки позволяют рассматривать ее как прогрессивный технологический процесс, находящий все более широкое, применение в производстве.

Физико-химическое взаимодействие расплавленного припоя с паяемым материалом, проявляющееся в растекании припоя или образовании мениска с краевым углом смачивания, называют смачиваемостью.

В момент полного термодинамического равновесия при условии отсутствия диффузии или химической реакции в системе твердое тело — жидкий припой — газ существует граница раздела всех трех фаз — твердой, жидкой, газообразной (рис. 29.1). Двугранный угол θ между плоскостью, касательной к поверхности припоя у границы смачивания, и смоченной припоем плоской поверхностью паяемого металла называют краевым углом смачивания. , Различают равновесный краевой угол, определенный в равновесной системе паяемый материал — припой, и неравновесный.

Условие равновесия системы (рис. 29.1) может быть представлено в виде равновесия векторов сил поверхностного натяжения в точке А:

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

где векторы, исходящие из точки *А*, — силы, характеризующие величины поверхностной энергии, приводящие к равновесию; $\sigma_{2,3}$—поверхностное натяжение между ; жидким припоем и твердым телом; $\sigma_{1,3}$ — поверхностное натяжение между твердым телом (основным металлом) и газом.

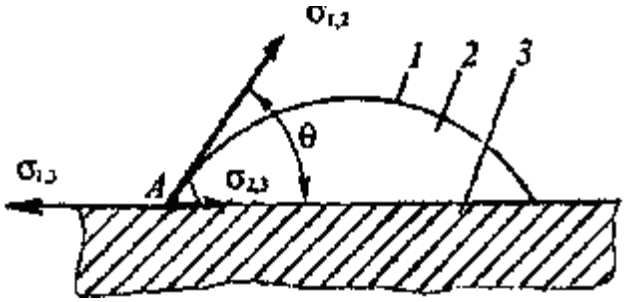

Рис. 29.1. Схема равновесия векторов сил поверхностного натяжения капли жидкости на поверхности твердого тела: *1*—газовая фаза; *2*—жидкость; 5—твердое тело

Обе эти силы действуют вдоль твердого тела, но в противоположных направлениях: $\sigma_{1,3}$ — сила приводящая к растеканию жидкости по поверхности металла, т. е. сила растекания и смачивания; $\sigma_{1,2}$ — поверхностное натяжение между жидким металлом и газом, действующее по касательной к поверхности жидкого металла. Эта сила, которая называется поверхностным натяжением и возникает в любой жидкости, стремится до минимума уменьшите поверхность капли припоя.

При отсутствии других сил поверхностное натяжение придало бы капле сферическую форму, так как из всех сил равного объема шар обладает минимальной поверхностью. Гравитационные напряжения и напряжения между жидкостью и окружающей средой обычно противодействуют этому поверхностному натяжению так, что жидкость принимает какую либо отличную от сферы форму.

Растекание и смачивание будут иметь место, если $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3} + \sigma_{1,2}\cos\theta$:

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

где cosθ характеризует смачивающую способность жидкости. Величина угла θ служит показателем смачивания металла жидким припоем. Двумя предельными состояниями этого является полное отсутствие смачивания, когда θ = 180°, и полное смачивание, когда θ = 0°. При 0°< θ < 180° имеет место частичное смачивание.

При* пайке существенная роль принадлежит капиллярным силам. Капиллярные явления в паяльном зазоре обусловлены в основном тем, что криволинейная поверхность

жидкости испытывает различное давление с вогнутой и выпуклой сторон. Если p_1 и p_2 — соответственно давления с вогнутой и выпуклой сторон поверхности жидкого припоя, то по первому закону капиллярности (Лапласа) имеем:

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

где $\sigma_{1,2}$ — поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой; R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхности. При малом диаметре капилляра свободная поверхность жидкости будет иметь форму сферы, тогда $R = (d/2)/\cos\theta$, где θ- краевой угол смачивания. Разность давлений $p_1 - p_2$ между вогнутой и выпуклой сторонами поверхности мениска может быть выражена через высоту столба жидкости над заданным уровнем и его плотность: $p_1 - p_2 = h\gamma g$, где γ — плотность жидкости. Тогда уравнение Лапласа примет вид:

$$h\gamma g = \sigma_{1,2}\left(\frac{\cos\theta}{d/2} + \frac{\cos\theta}{d/2}\right) = \frac{4\sigma_{1,2}\cos\theta}{d},$$

откуда высота подъема припоя в капилляре

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

В случае капиллярного течения припоя между двумя параллельными пластинками высоту подъема можно определить из тех же соотношений. Если учесть, что расстояние a между пластинами мало, а ширина пластин достаточно велика, то поверхность припоя в зазоре примет форму цилиндра, для которого $R_1 = a/\cos\theta$, а $R_2 = \infty$. После преобразования получим уравнение для круглого капилляра

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

откуда высота подъема припоя между пластинками

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

На заполнение жидким припоем зазора определенное воздействие оказывает состояние поверхности паяемых деталей. Припой лучше смачивает поверхность, если на ней имеется небольшая шероховатость, риски. Иногда риски, неглубокие канавки, наносят специально. Они служат дополнительными капиллярами. Однако шероховатость поверхности влияет на растекание припоев, химически слабо воздействующих с паяемым материалом. При наличии же значительного физико-химического взаимодействия между ними жидкий припой легко растворяет шероховатые выступы. Поэтому влияние шероховатости при пайке такими припоями на их растекание менее заметно.

29.2. Способы пайки

Современные способы пайки принято классифицировать по следующим независимым признакам: удалению оксидной пленки, кристаллизации паяного шва, получению припоя, заполнению зазора припоем, источнику нагрева, наличию давления на паяемые детали, одновременности выполнения паяных соединений.

Классификация способов пайки по указанным признакам приведена на рис. 29.2.

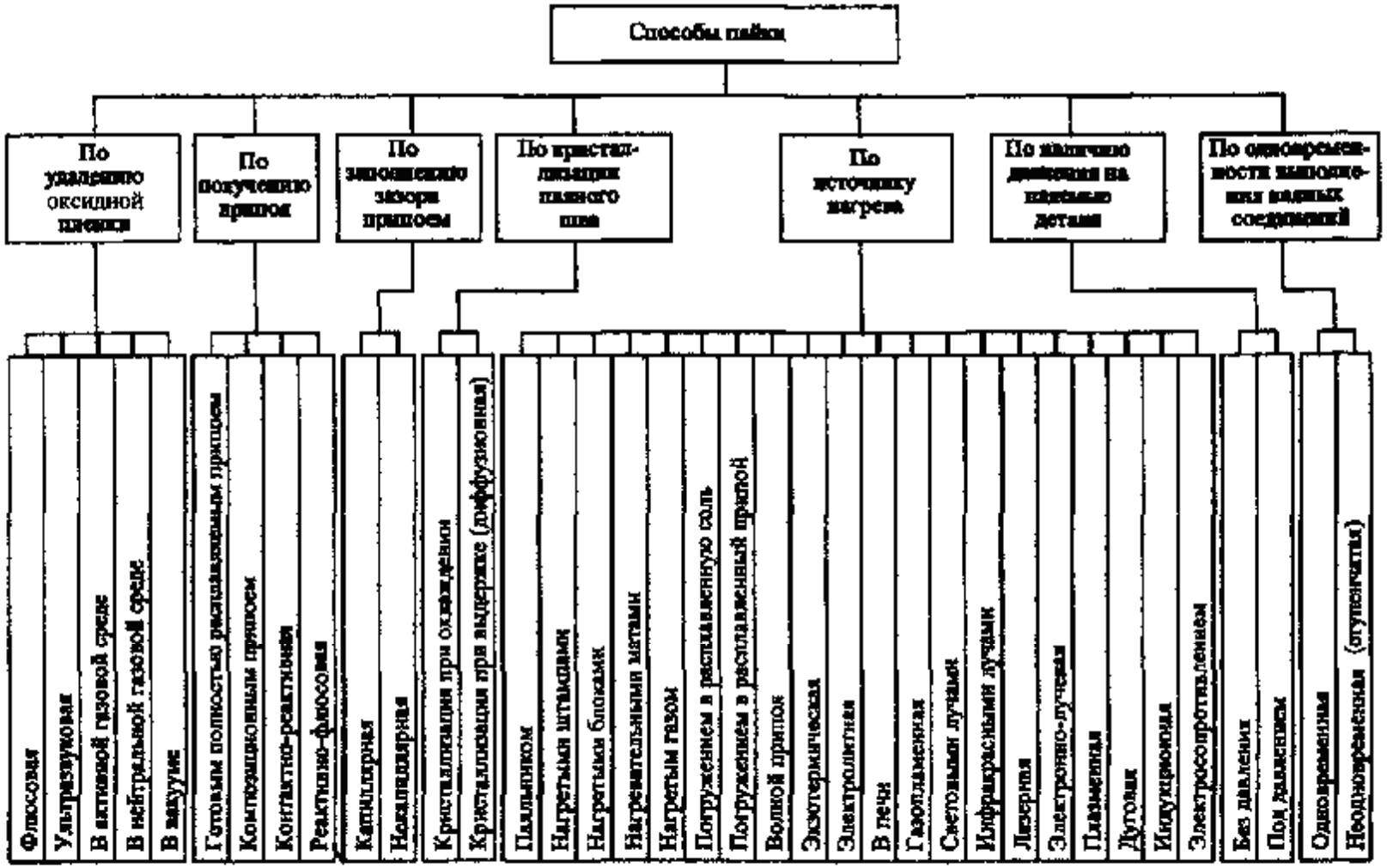

Рис. 29.2. Классификация способов пайки

Способы пайки по удалению оксидной пленки

Флюсовая пайка. Для обеспечения удаления оксидов с поверхности паяемых металлов и припоя, а также для предупреждения образования новых оксидов при нагреве в процессе пайки применяются паяльные флюсы. Пайка с применением флюса называется *флюсовой.* Флюсы могут быть твердыми (порошкообразные смеси различных солей), жидкими (водные растворы хлористых солей или спиртовые растворы органических соединении), а также газообразными. Интенсивность воздействия флюсов на оксидную пленку ограничена их температурным интервалом активности. Нижний предел этого интервала — минимальная температура, при которой флюс вступает во взаимодействие с оксидами. С повышением температуры активность флюса возрастает. По достижении максимальной температуры активность флюса значительно снижается из-за выгорания, испарения или улетучивания отдельных его компонентов.

Механизм воздействия флюса на оксиды металлов сложен, многообразен и включает в себя: растворение оксидной пленки основного металла и припоя во флюсе; химические взаимодействия флюса с оксидной пленкой, в результате чего образуются легкоплавкие шлаки; химическое взаимодействие флюса с основным металлом, в результате чего происходит постепенное разрушение оксидной пленки, отрыв ее от основного металла и перевод в шлак; восстановление оксидной пленки.

В реальных условиях пайки эти процессы зачастую взаимосвязаны или протекают параллельно.

Пайка в активной газовой среде. В качестве восстановительной газовой среды применяется водород или его заменители: оксид углерода, азотно-водородная смесь, получаемая посредством диссоциации аммиака при нагреве выше 535 °С:

$$2NH_3=N_2 + 3H_2$$

Восстановление оксидов идет по реакции

$$MeO + H_2 = Me + H_20$$

Необходимо отметить, что вследствие взрывоопасности водород применяют редко и, как правило, в печах малого размера.

Пайка в нейтральной газовой среде. В качестве нейтральных газовых сред используют аргон, гелий, азот. Инертные газы предохраняют паяемый металл и припой от окисления в процессе пайки. Если же в пространство печи или контейнера, в которых ведется пайка, аргон постоянно подавать под некоторым давлением, т. е. пайку вести в проточной нейтральной среде, то часть кислорода вместе с воздухом вытесняется и парциальное давле- ние его в контейнере или печи становится меньше. Тем самым создаются условия для непрерывного самопроизвольного распада оксидов—диссоциации.

Чтобы активизировать нейтральные газовые среды, в них часто добавляют газообразные флюсы: фтористый водород (HF), трехфтористый бор (BF_3) и другие, которые, взаимодействуя с оксидной пленкой, способствуют ее удалению. **Пайка в вакууме**. Бесфлюсовая пайка с применением разреженного газа при давлении ниже 10^5 Па называется пайкой в вакууме. При создании в печи или контейнере вакуума с определенной степенью разрежения парциальное давление кислорода становится ниже упругости диссоциации оксидов. Эти условия необходимы для диссоциации оксидов и предупреждения повторного окисления поверхностей паяемых деталей при нагреве в процессе пайки. В вакууме обычно паяют медь, никель, вольфрам, титановые сплавы, высоколегированные и жаропрочные стали. Сплавы, содержащие в своем составе значительное количество алюминия или хрома, при пайке в низком и среднем вакууме требуют дополнительного флюсования, так как оксиды алюминия и хрома очень устойчивы, имеют малое давление пара и начиняют испаряться при высоких температурах, близких к температурам их плавления.

Ультразвуковая пайка. Для удаления оксидов с поверхности некоторых металлов (например, алюминия) при низкотемпературной пайке применяют способ их ультразвукового разрушения. Он основан на свойстве упругих механических колебаний ультразвуковой частоты при прохождении через жидкости вызывать кавитацию. Ультразвуковые колебания создаются в расплавленном припое, нанесенном на паяемый металл специальным паяльником.

Способы пайки по кристаллизации паяного шва

Кристаллизация при охлаждении. Как правило, температура нагрева при пайке на 50-—100° выше температуры плавления припоя. При этой температуре вследствие взаимодействия основного металла и припоя образуется сплав в жидком состоянии, из которого формируется структура паяного шва. При окончании нагрева паяемые детали охлаждаются и начинается кристаллизация паяного шва.

На структуру и свойства паяного шва влияют не только физико-химические свойства образовавшегося в шве сплава, температура пайки, процесс диффузии, но и в значительной степени скорость охлаждения. Медленное охлаждение способствует образованию более равновесной структуры и, следовательно, прочного и пластичного паяного соединения.

Кристаллизация при выдержке (диффузионная пайка). Диффузионной называется такая пайка, при которой образование паяного соединения совмещено с изотермической обработкой. Изотермическая обработка обусловливает прохождение диффузии с целью направленного изменения свойств паяного соединения, в том числе посредством кристаллизации металла шва при температуре пайки, которая выше температуры солидуса припоя.

Скорость диффузии, как известно, зависит от коэффициента диффузии и концентрации диффундирующих элементов на границе раздела. Диффузионная пайка обеспечивает более гомогенный (однородный) состав паяного шва, позволяет повышать его прочность и пластичность из-за предотвращения образования интерметаллидных прослоек или растворения их в основном металле.

Способы пайки по получению припоя

Пайка готовым полностью расплавляемым припоем. Пайка, при которой используется заранее изготовленный припой, называется пайкой готовым припоем.

При печной и других видах групповой пайки готовый припой наносится в процессе сборки дозированными заготовками, представляющими собой кольца, изготовленные из проволоки, шайбы, штампованные из фольги или ленты, и т. д. При газопламенной пайке припой подается в зону шва с плавящегося конца прутка. При пайке паяльником припой наносится на паяемую поверхность с помощью облуженной части жала паяльника.

Пайка композиционным припоем. При этом способе пайки используется припой, содержащий в своем объеме наполнитель. Под наполнителем следует понимать материал, который применяется для образования в паяльном зазоре системы капилляров или для обеспечения специальных свойств паяного соединения. Применяются следующие типы припоев:

а) полученный спеканием порошка или волокон тугоплавкого материала с последующей пропиткой жидкой легкоплавкой фазой;

б) состоящий из порошка или волокон тугоплавких составляющих, смоченных легкоплавкой жидкой фазой;

в) состоящий из смеси порошков тугоплавких составляющих;

г) представляющий собой сетку, изготовленную из волокон металла-наполнителя и легкоплавкой составляющей припоя.

Контактно-реактивная пайка. Пайка, при которой припой образуется в результате контактно-реактивного плавления, называется контактно-реактивной. Она основана на способности некоторых металлов образовывать в месте контакта сплавы (эвтектики или твердые растворы), температура плавления которых ниже температуры плавления любого из соединяемых металлов. В ряде случаев, когда соединяемые металлы не образуют между собой подобного типа сплавы, используют промежуточную прослойку или наносят покрытие на соединяемые поверхности напылением, гальваническим или каким-либо другим способом.

При контактно-реактивной пайке детали необходимо сдавливать. Применение небольшого давления на первой стадии процесса создает лучший физический контакт между деталями, а также способствует выдавливанию избытка жидкой фазы. Вместе с избытками жидкости удаляются частицы оксидов, присутствие которых в паяном шве может отрицательно влиять на прочность соединения.

Реактивно-флюсовая пайка. Пайка, при которой припой образуется в результате разложения компонентов флюса, называется реактивно-флюсовой. Типичным примером такой пайки является пайка алюминия флюсом из хлорида цинка, основанная на способности алюминия вытеснять цинк из расплавленной соли при 400 °С:

$$3ZnCl_2 + 2Al = 2AlCl_3 + 3Zn$$

Образовавшийся цинк и является припоем, соединяющим детали из алюминия. В ряде случаев металл (продукт взаимодействия основного металла с флюсом) не является припоем. Он покрывает поверхность в месте пайки и улучшает смачиваемость дополнительным

припоем, который вводится в зазор. Так, с помощью флюса AgCl можно осуществить реактивно-флюсовое лужение (покрытие) титана серебром. Процесс идет по реакции

$$Ti + 4AgCl = TiCl_4 + 4Ag$$

При 350—400 °С хлорид титана в виде газа улетучивается с поверхности титана, разрушая при этом оксидную пленку $Ti0_2$, а восстановленное серебро покрывает чистую поверхность титана, которую затем можно подвергать пайке другими способами.

Способы пайки по заполнению зазора

Капиллярная пайка. Пайка, при которой расплавленный припой заполняет паяльный зазор и удерживается в нем преимущественно поверхностным натяжением, называется капиллярной. Капиллярные явления присущи почти всем способам пайки. Но проявляются они в основном тогда, когда между паяемыми деталями имеется перекрытие — нахлестка — и при сборке обеспечивается паяльный зазор. В каждом конкретном случае в зависимости от применяемого источника нагрева, паяемого металла, припоев и т. д. величина зазора определяется опытным путем, но для пайки наиболее распространенных металлов и используемых при этом припоев рекомендованы оптимальные величины паяльных зазоров.

Некапиллярная пайка. Пайка, при которой расплавленный припой заполняет зазор преимущественно под действием своей массы или прилагаемой к ней извне силы.

К некапиллярной пайке относится пайкосварка, при которой соединяемым кромкам заготовок придается форма, подобная разделке кромок при сварке плавлением.

Соединение деталей осуществляется приемами, характерными для сварки; только в качестве присадочного металла используется припой, т. е. металл или сплав, температура плавления которого ниже температуры плавления основного металла.

К некапиллярной пайке можно отнести и сваркопайку. Сваркопайкой называется пайка разнородных материалов, при которой более легкоплавкий материал локально нагревается до температуры, превышающей температуру его плавления, и выполняет роль припоя.

Способы пайки по источнику нагрева

Пайка в печи. Ее применение в производстве объясняется следующими факторами.

1. Высокой производительностью, которая обеспечивается возможностью пайки сложных изделий одновременно в нескольких местах или пайки большого числа однотипных изделий, загруженных в печь с помощью конвейера или других средств механизации.

2. Высокой стабильностью качества паяного соединения из-за возможности точного контроля температурных режимов пайки на любой стадии технологического процесса, а также создания контролируемой атмосферы при пайке (вакуум, восстановительная, инертная атмосфера).

3. Минимальными деформациями и остаточными напряжениями в паяных узлах в связи с равномерным нагревом и охлаждением их в процессе пайки.

Для пайки применяют печи с подогревом электросопротивлением, индукционные, газопламенные. Печи могут быть с воздушной атмосферой, контролируемой атмосферой (заполненные водородом, смесью водорода с азотом или оксидом углерода, диссоциированным аммиаком) или вакуумные.

В раде случаев более целесообразно создавать контролируемую атмосферу не во всем объеме печи, а в специальных контейнерах.

Индукционная пайка дает возможность осуществлять локальный нагрев, обеспечивая большую скорость нагрева места пайки и, следовательно, высокую производительность (это ее основное отличие от других типов пайки). Процесс индукционной пайки легко поддается автоматизации, а установки для нее без особых трудностей встраиваются в автоматизированные линии. Индукционный нагрев может производиться в любой атмосфере, в том числе в вакууме.

От лампового или машинного генератора ток высокой частоты подводится к охлаждаемому индуктору. В паяемой детали под воздействием переменного магнитного поля, образованного током, проходящим по индуктору, возникают мощные вихревые токи, разогревающие ее до необходимой температуры. Нагрев определяется мощностью генератора, расстояниием от индуктора по детали, а его глубина — частотой тока. Некоторые типы индукторов приведены на рис. 29.3.

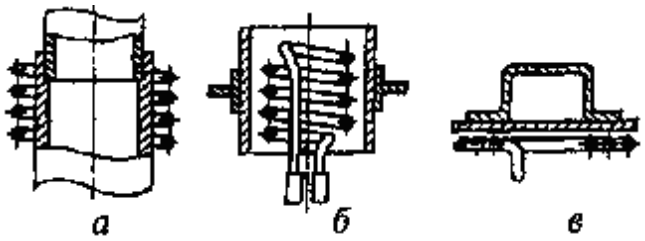

Рис. 29.3. Типы индукторов: *а* — наружный; *б*— внутренний; в — плоский

Наряду с перечисленными ранее преимуществами индукционный нагрев имеет ряд недостатков. Это прежде всего наличие деформаций и напряжений вследствие неравномерного нагрева при пайке, определенные трудности контроля за температурным режимом из-за высокой скорости нагрева, ограниченные возможности пайки крупногабаритных изделий, а также деталей сложной конфигурации.

Пайка электросопротивлением (рис. 29.4).

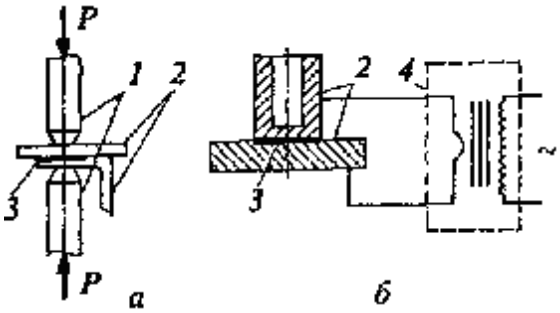

Рис. 29.4. Схема нагрева пайки методом электросопротивления: *а* — на контактных машинах; *б* — с использованием сварочных трансформаторов; *1* — электроды; *2* — детали; *3* — припой; *4* — трансформатор

Как видно из рисунка, при этом методе пайки можно использовать машины для контактной сварки (рис. 29.4, *а)* и сварочные трансформаторы (рис. 29.4, б). В обоих случаях нагрев осуществляется в результате выделения теплоты в месте контакта между деталями, где величина сопротивления максимальна.

Припой, размещенный между деталями в виде фольги или нанесенный предварительно на паяемые поверхности, плавится при нагреве, образуя паяное соединение.

К пайке электросопротивлением относится пайка с нагревом только одного электрода, теплота от которого передается за счет теплопроводности через деталь к месту расположения припоя. Этот метод нагрева применяется для пайки деталей малых толщин, в основном при изготовлении изделий элекгоонной техники.

Электролитная пайка. Электролитная пайка (рис. 29.5)

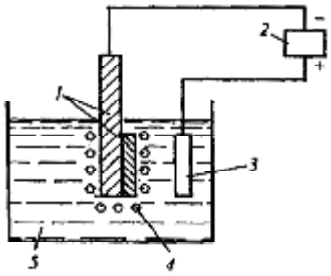

Рис. 29.5. Схема пайки в электролите: *1* — паяемые детали; *2* — источник тока; *3* — электрод; *4*—пузырьки водорода; *5*—электролит

Осуществляется при контакте паяемых деталей с водным электролитом, через который пропускается постоянный электрический ток. В качестве электролита используются 10—15%-ные водные растворы Na_2C0_3.

Электрический ток, проходя через электролит, разлагает его. Выделившийся на стенках паяемых деталей водород увеличивает сопротивление прилегающего к ним слоя, что вызывает нагрев деталей и плавление припоя. Этот метод применяется только при пайке деталей небольших размеров.

Пайка погружением. Существуют две основные разновидности пайки погружением в зависимости от среды, которая используется в качестве источника нагрева: *пайка погружением в расплавленную соль* и *пайка погружением в расплавленный припой.* В обоих случаях температура жидкой ванны на 30—50 °С выше температуры плавления припоя.

Как правило, состав соляной ванны подбирается таким образом, чтобы соли являлись флюсом для паяемого металла. Поэтому, выполняя роль теплоносителя и флюса, расплав солей при погружении в него деталей очищает их от оксидов и обеспечивает защиту от окисления в процессе пайки.

Пайка волной. Сущность этого процесса состоит в том, что подаваемый в специальное сопло механическим или магнитным способом и постоянно перемешиваемый припой образует над поверхностью ванны непрерывную волну. Детали, например радиоэлементы, установленные на печатной плате, вместе с ней перемещают над волной припоя. Касаясь припоя, выводы деталей запаиваются. Пайка волной припоя широко распространена в производстве печатного радиомонтажа.

Недостатком метода пайки погружением в расплавленный припой и волной является расходование большого количества припоя. Кроме того, при погружении деталей в припой неизбежно облуживание всей поверхности деталей. Для уменьшения расхода припоя на поверхности деталей, не подлежащих пайке, наносят различные покрытия, маски из эпоксидных смол, эмалей и другие минеральные и органические покрытия.

Пайка световыми лучами. При пайке световым лучом с помощью ламп обеспечивается нагрев с малой тепловой инерционностью. Так, для кварцевой лампы время достижения номинального энергетического потока с момента ее включения составляет 0,6 с. Достоинством нагрева световыми лучами является бесконтактный подвод энергии, в том числе через оптически прозрачные стенки. С их помощью можно паять на воздухе, в инертной среде, вакууме, а также нагревать магнитные и немагнитные материалы, в широких пределах регулировать температуру нагрева, визуально наблюдать за процессом пайки. В зависимости от типа лампы, ее мощности, подводимого к ней напряжения может быть получена температура от 1980 до 2930 ^{0}С.

Электронно-лучевая пайка. Электронно-лучевой нагрев применяется для локальной пайки, в том числе импульсной, пайки изделий электронной и радиотехнической промышленности, пайки деталей из тугоплавких металлов. Высокая концентрация электронного пучка существенно сокращает время нагрева и плавления припоя, что особенно важно при пайке чувствительных к нагреву тугоплавких металлов. Пайка может производиться как неподвижным сфокусированным лучом, так и сканирующим (совершающим, например, поперечные колебания). В качестве примера можно назвать пайку электронным лучом электрических выводов к контактным площадкам пленочных микросхем.

Электронно-лучевой нагрев эффективен при пайке металлокерамических узлов, сильфонных конструкций.

Лазерная пайка. Нагрев паяемых деталей с помощью лазера является весьма перспективным, особенно при пайке микроминиатюрных деталей, контактов и т. п. Лазерный нагрев в определенном отношении более универсален, чем электронно-лучевой: световой луч свободно проходит сквозь прозрачные преграды, не требуется электрического контакта с деталью, пайка возможна не только в вакууме, но и на воздухе или в защитной атмосфере. Высокая удельная тепловая мощность лазерного луча способствует испарению с поверхности припоя и основного металла оксидных пленок, что улучшает процесс пайки.

Газопламенная пайка. Для высокотемпературной пайки могут применяться газовые горелки, в которых тепловая энергия образуется в результате сгорания какого-либо горючего газа, например ацетилена C_2H_2, в струе кислорода.

Плазменная пайка. При использовании плазменных горелок пайка осуществляется плазмой, образуемой в плазматроне. Плазменная горелка позволяет за счет изменения силы тока, диаметра сопла регулировать в широких пределах как общее количество вводимой в детали теплоты, так и величину поверхности нагрева.

Пайка паяльником. С помощью паяльников производится пайка низкотемпературными припоями. Перенос теплоты в зону пайки осуществляется вследствие контакта рабочей части паяльника с паяемыми поверхностями.

Существует большое разнообразие паяльников, которые различаются способом нагрева, мощностью, формой. Они могут быть с периодическим и постоянным нагревом. Паяльники с периодическим нагревом по мере их охлаждения подогреваются от постоянного источника теплоты (пламени,
электрической дуги). Аккумулированная их массивной медной рабочей частью теплота расходуется на расплавление припоя и нагрев паяемых деталей. Обычно такие паяльники применяются при пайке и лужении крупногабаритных и массивных деталей.

Для бесфлюсового лужения алюминиевых сплавов, не содержащих магния, применяют специальный прибор, названный ультразвуковым паяльником (рис. 29.6), который имеет магнитостриктор *6*, излучающий колебания, передающиеся наконечнику *5*. Возбуждаемые в расплавленном припое колеблющимся наконечником кавитационные пузырьки *4* эффективно разрушают оксидные пленки *3*. Обмотка магнитостриктора подключается к высокочастотному генератору *1*, дающему импульсы с частотой 15—20 кГц.

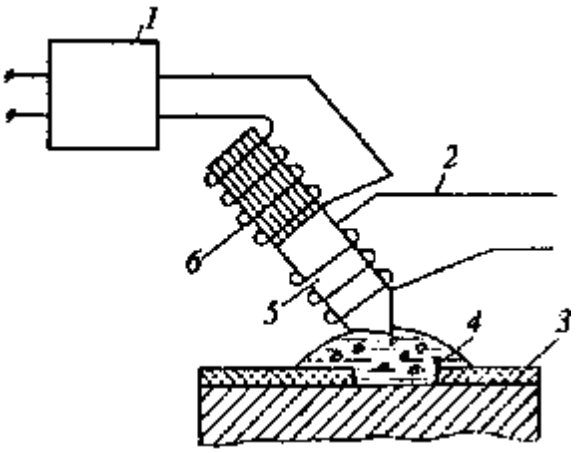

Рис 29.6. Схема ультразвукового паяльника

Наконечник нагревается спиралью *2*, через которую пропускается электрический ток. При лужении наконечник должен располагаться как можно ближе к поверхности детали, но не касаться ее. Наконечник паяльника изготавливается из стойкого к кавитационному разрушению серебряно-никелевого сплава.

Облуженные с помощью ультразвука детали можно паять обычным электрическим паяльником, без флюса, с применением оловянно-цинковых или оловянно-свинцовых припоев.

29.3. Технологический процесс пайки

Технологический процесс пайки включает комплекс выполняемых операций, основными из которых являются следующие: подготовка поверхностей под пайку; сборка деталей; укладка припоя, в ряде случаев нанесение флюса; пайка; обработка деталей после пайки.

Подготовка поверхности под пайку. Качество подготовки поверхности под пайку во многом определяет уровень и стабильность свойств паяного соединения. Существуют следующие основные способы очистки поверхности:

1) термический (горелками, отжигом в восстановительной атмосфере, в вакууме);

2) механический (обработка режущим инструментом или абразивом, гидропескоструйная или дробеструйная, галтовка);

3) химический (обезжиривание, химическое травление, электрохимическое травление, травление с ультразвуковой обработкой, комбинированное с обезжириванием и травлением).

Подготовка детали под пайку включает в себя также нанесение специальных технологических покрытий гальваническим или химическим способом, горячим лужением (погружением в расплавленный припой), с помощью ультразвука, плакированием, вжиганием, термовакуумным напылением. Указанные технологические покрытия наносят с различными целями:

а) для улучшения смачиваемости некоторых паяемых металлов расплав ленным припоем;

б) для защиты основного металла от испарения отдельных их компонентов в процессе пайки;

в) для предотвращения вредного взаимодействия припоя с основным металлом, приводящего к образованию хрупких структур;

г) в качестве припоя при контактно-реактивной пайке.

Укладка припоя. Часто сборка включает в себя нанесение припоя, укладку его в виде дозированных заготовок из проволоки или фольги. При размещении припоя необходимо учитывать условия пайки: расположение изделия в печи или другом нагревательном устройстве, режимы нагрева и охлаждения.

Массу припоя, необходимую для получения качественных соединений, определяют из соотношения

$$Q = 1{,}5\Delta h l \gamma,$$

где Δ — наибольший зазор в соединении при температуре пайки, м; h — высота или ширина соединения, м; l —протяженность соединения, м; γ — удельная плотность припоя, Н/м^3. Коэффициент 1,5 учитывает объем галтелей припоя и неизбежные технологические потери (угар, разбрызгивание).

Нанесение флюса. Иногда при сборке деталей под пайку требуется нанести флюс. Порошкообразный флюс разводят дистиллированной водой до состояния негустой пасты и наносят шпателем или стеклянной палочкой, после чего детали подсушивают в термостате при 70—80 °С в течение 30— 60 мин. При газопламенной пайке флюс подают на прутке разогретого припоя, при пайке паяльником — рабочей частью паяльника или вместе с припоем, в случае применения оловянно-свинцового припоя — в виде трубок, наполненных канифолью.

Пайка (нагрев места соединения или общий нагрев собранных деталей) выполняется при температуре, превышающей температуру плавления припоя, как правило, на 50—100 °С.В зависимости от температуры плавления применяемых припоев пайка подразделяется на высокотемпературную и низкотемпературную.

При низкотемпературной пайке нагрев в месте контакта паяемых материалов и припоя не превышает 450 °С, при высокотемпературной — превышает 450 °С.

Обработка после пайки включает в себя удаление остатков флюса. Флюсы, частично оставшиеся после пайки на изделии, портят его внешний вид, изменяют электрическую проводимость, а некоторые вызывают коррозию. Поэтому остатки их после пайки должны быть тщательно удалены.

Остатки канифоли и спиртоканифольных флюсов обычно коррозии не вызывают, но если по условиям эксплуатации изделий требуется их удалить, то изделие промывают

спиртом, спиртобензиновой смесью, ацетоном.

Агрессивные кислотные флюсы, содержащие соляную кислоту или ее соли, тщательно отмывают последовательно горячей и холодной водой с помощью волосяных щеток.

29.4. Особенности пайки материалов

Пайка конструкционных сталей. Особенности технологии пайки определяются количеством содержащегося в них углерода и легирующих элементов. В зависимости от этого выбираются флюсы, назначаются способы и режимы пайки.

Углеродистые и низколегированные стали. Пайка сталей этого класса не вызывает особых трудностей и может осуществляться всеми известными способами: в печи, погружением в расплавленные соли, нагревом токами высокой частоты, газопламенной горелкой и паяльником. Подготовка поверхности, подлежащей пайке, заключается в зачистке напильником, шкуркой и обезжиривании в горячих щелочных растворах.

Для высокотемпературной пайки низколегированных и малоуглеродистых сталей применяют медь, латуни, медно-цинковые припои. Серебряные припои из-за дефицитности серебра применяют редко, в строго обоснованных и экономически оправданных случаях.

Флюсы, используемые для пайки сталей, содержат в своем составе буру, борный ангидрид, фтористые соли.

При низкотемпературной пайке углеродистых и низколегированных сталей применяют оловянно-свинцовые припои, пайка ведется паяльником, а в качестве флюса — раствор хлорида цинка или активированный спиртовой раствор канифоли.

Высоколегированные стали. Пайка этих сталей осложняется наличием на их поверхности термически и химически стойких оксидов хрома, титана и других легирующих элементов. Указанные оксиды ухудшают смачиваемость паяемых поверхностей припоями. Поэтому для пайки высоколегированных коррозионностойких сталей газопламенной горелкой используют активные флюсы.

Оксидная пленка, содержащая Cr_2O_3, на коррозионностойкой стали восстанавливается в водородной среде при температуре около 1200 °С.

Низкотемпературная пайка коррозионностойких сталей осуществляется оловянно-свинцовыми припоями с флюсом, представляющим собой раствор канифоли в спирте с добавкой ортофосфорной кислоты. После пайки во избежание коррозии остатки флюса следует удалить.

Жаропрочные стали на своей поверхности также имеют трудноудаляе-мые оксидные пленки хрома, титана и ряда других элементов, входящих в состав сталей. Поэтому при пайке применяют высокоактивные флюсы, водородную атмосферу с добавками фтористых соединений. Для лучшего удаления оксидов хрома во флюсы вводятся тетраборат и фториды. Пайка жаропрочных сталей, как и коррозионностойких, может производиться в защитной атмосфере аргона, гелия с использованием одновременно и флюсов.

Пайка титановых сплавов. Процесс пайки титановых сплавов сопряжен с рядом трудностей, обусловленных их физико-химическими свойствами, прежде всего высокой химической активностью. Указанное свойство титановых сплавов требует при пайке обеспечения хорошей защиты металла от взаимодействия с воздухом, а также надлежащей подготовки под пайку. По тем же причинам непригодна при пайке газовая защита, содержащая водород или азот. Допустим лишь вакуум или аргон повышенной чистоты.

Процесс пайки осложняет высокая химическая стойкость оксида, покрывающего поверхность деталей. Для его удаления применяют химическое травление в водном растворе азотной и плавиковой кислот (для небольших по толщине пленок) и в водном растворе $HCl \cdot HNO_3$ и NaCl или HCl и HF (при большом слое окалины). Часто используют

механическое удаление оксидных пленок опескоструиванием, зачисткой наждачной бумагой, а также стальными щетками и т. п.

При выборе припоя и режимов технологического процесса пайки необходимо учитывать способность титана образовывать хрупкие интерметал-лидные соединения, отрицательно влияющие на прочностные характеристики паяного шва, почти со всеми элементами, входящими в состав припоев. С серебром титан образует интерметаллид менее хрупкий, чем с остальными металлами. Поэтому чаще всего для пайки применяют припои на основе серебра.

Для повышения прочности и пластичности паяных соединений, повышения однородности паяного шва проводят диффузионную пайку титана или диффузионный отжиг. За счет диффузионного отжига удается получить прочность паяных соединений из титана, близкую к прочности основного металла.

В ряде случаев, особенно при пайке низкотемпературными припоями Sn—Pb, поверхность титана под пайку покрывают металлами, улучшающими его смачиваемость. К таким металлам относят прежде всего никель, а также серебро, медь, олово. Покрытие осуществляется гальваническим путем, погружением деталей в расплавленный металл, например олово, нагретое до 700—750 °С.

Высокотемпературная пайка титана по покрытиям осуществляется с флюсами, которые обычно используют для пайки меди, никеля, серебра, спиртоканифольным бескислотным или спиртоканифольным, активизированным солянокислым диэтиламином.

Пайка алюминия, магния и их сплавов. Процесс пайки указанных металлов и сплавов на их основе осложняют тугоплавкие оксидные пленки на их поверхности, обладающие высокой химической устойчивостью и не удаляющиеся при пайке в высоком вакууме (до 0,1 МПа) и в восстановительных газовых средах.

Для очистки поверхности деталей из алюминия и его сплавов от оксидов применяют механическую зачистку и травление в 10—15%-ном растворе едкого натра при 60 °С. С целью предупреждения последующей коррозии

детали промывают в холодной воде, тщательно смывая остатки едкого натра, а затем обрабатывают в 20%-ном растворе азотной кислоты. Промытые в горячей и холодной воде детали просушивают. Оксидная пленка на магниевых сплавах удаляется травлением в водном растворе хромового ангидрида (20—30 *кг/м*^{3}) при 60—70 ^{0}*С*. Повышая концентрацию этого раствора, можно снизить температуру травления до 30 °С. После травления детали промывают в горячей, а затем в холодной воде. Временной интервал между травлением и пайкой не должен превышать 24 ч, иначе толщина вновь образующейся оксидной пленки будет недопустимой.

Высокотемпературная пайка алюминия осуществляется всеми известными способами нагрева: газопламенным, индукционным, в печах, погружением в расплавленные соли.

Контактно-реактивная пайка в вакууме (1 МПа) и в газовых средах позволяет соединять алюминий через прослойку кремния, меди, серебра. Флюсы в таких случаях не применяются. Перспективным методом бесфлюсовой высокотемпературной пайки алюминия является пайка в атмосфере паров магния, создаваемой в вакууме (1 МПа). Атмосфера паров магния (вследствие большой химической активности магния к кислороду) не только восстанавливает оксидную пленку $A1_20_3$, но и служит средой, которая защищает поверхность основного материала от окисления в процессе пайки.

Детали из магниевых сплавов паяют паяльниками, горелками, индукционным нагревом, в расплавленных флюсах, в печах с контролируемой атмосферой (аргон, аргон с азотом, азот), в вакууме.

Низкотемпературная пайка магния осуществляется по предварительно нанесенному покрытию из меди, никеля или серебра. В таком случае припой выбирается применительно к металлу покрытия, например оловянно-свинцовый.

1. В печах с контролируемой атмосферой азота, аргона или в вакууме пая

ют изделия из магния контактно-реактивным способом. Для этого поверхность под пайку покрывают слоем металла (меди, никеля), который образует с магнием легкоплавкую эвтектику при 450—600 ^{0}C. С целью повышения стойкости магниевых сплавов против коррозии поверхность их после пайки часто анодируют. При определении оптимальных режимов пайки магниевых сплавов необходимо иметь в виду, что при 300—400 *"С* происходит разложение гидридов оксида магния, что приводит к образованию пористости.

Пайка меди и ее сплавов. Пайка меди и основных ее сплавов — латуней, бронз и медно-никелевых сплавов — может быть осуществлена почти всеми видами пайки при использовании обширной номенклатуры припоев и флюсов. Каждый из указанных выше материалов имеет свои характерные особенности, которые влияют на технологию пайки, выбор режима, оборудования и т. д.

Пайка тугоплавких металлов. Тугоплавкие металлы относятся к разряду труднопаяемых высокотемпературными припоями. Трудности пайки обусловлены следующими особенностями их физико-химических свойств. Тугоплавкие металлы обладают повышенной химической активностью при высоких температурах, особенно по отношению к кислороду, цирконий — к водороду и азоту.

2. Тугоплавкие металлы склонны к собирательной рекристаллизации при нагреве до высоких температур, особенно заметно проявляющейся у молибдена и вольфрама.

3. Тугоплавкие металлы, особенно цирконий, при пайке образуют с компонентами припоя хрупкие интерметаллидные соединения, которые ухудшают пластические свойства металлов.

Низкотемпературная пайка указанных металлов применяется очень редко и осуществляется оловянно-свинцовыми припоями с канифолесодержащими активированными флюсами по предварительно нанесенному никелевому покрытию.

Высокотемпературная пайка вольфрама нежелательна, так как при температуре выше 1300—1400 °С он рекристаллизуется, теряет прочность, становится хрупким. В этом случае перспективной является пайка при низкой температуре с последующей диффузионной термообработкой. Применяют припои на основе никеля, титана, палладия и др.

Пайка разнородных металлов. При выборе припоев, способов нагрева, типов соединения необходимо учитывать:

1) степень различия физических свойств материалов и коэффициентов теплового расширения, теплопроводности и температуры плавления;

2) особенности химических свойств — наличие оксидов, их химическую стойкость, окисляемость и активность по отношению к таким газам, как азот, водород;

3) смачиваемость различными припоями;

4) возможность и условия образования интерметаллидных прослоек.

При пайке конструкций из разнородных металлов неизбежно происходит изменение паяльного зазора из-за разности коэффициентов термического расширения. При большем коэффициенте термического расширения соединительный зазор, охватывающий детали, при нагреве может увеличиться настолько, что припой вытечет или не поднимается по капилляру. Если же деталь с большим коэффициентом термического расширения располагается внутри, то зазор при температуре пайки может уменьшиться и слой припоя окажется тонким, что приведет к разрушению при охлаждении или возникновению внутренних напряжений. Для предотвращения разрушения паяных соединений из материалов с разными коэффициентами линейного расширения следует применять припой, обладающий повышенной пластичностью, компенсирующей разницу в указанных свойствах, например припои на основе индия или чистый индий.

В тех случаях, когда припой плохо смачивает один из паяемых материалов или образует с ним хрупкие соединения, на него наносят покрытие галь-
ваническим или химическим методом, облуживанием, осаждением из газовой фазы,

которое и обеспечивает пайку.

Пайка металла с неметаллами, например с керамикой, ферритом, производится по предварительно металлизированной поверхности.

29.5. Конструирование паяных соединений

Конструктивное оформление паяных изделий определяется условиями их эксплуатации, регламентированными техническими условиями. В свою очередь, эксплуатационные параметры паяных изделий, динамическая прочность, герметичность и вакуумная плотность, электрическая проводимость, коррозионная стойкость, работоспособность при высоких и отрицательных температурах и т. д. определяют выбор основных материалов, припоев и флюсов.

Элемент паяного изделия, включающий паяный шов и прилегающие к нему участки паяемых металлов, представляет собой паяное соединение. Тип паяного соединения, его конструктивные параметры зависят от требований к прочности изделия, его массе, а также от характера нагрузок и направлений их действия.

Детали во избежание смещения при пайке должны быть зафиксированы друг относительно друга.

Типовые паяные соединения, встречающиеся в плоских паяных конструкциях, — это соединения внахлестку, встык, в тавр, в угол (рис. 29.7, *а, б, в, и)*. Предпочтительно применение соединения внахлестку, так как за счет увеличения частичного перекрытия взаимно параллельных поверхностей деталей (нахлестки) достигается его равнопрочность с основным металлом.

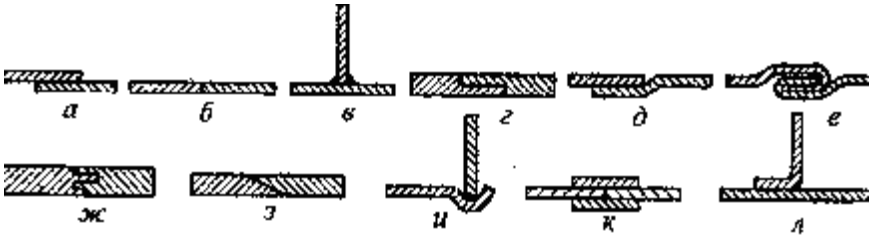

Рис. 29.7. Типы паяных соединений

Соединения встык и в тавр (рис. 29.7, *б, в)* применяются крайне редко, так как равнопрочности они не обеспечивают и используются лишь в тех случаях, когда конструкция не может быть выполнена иначе.

Некоторые другие соединения, характерные для пайки труб и стержней, приведены на рис. 29.8.

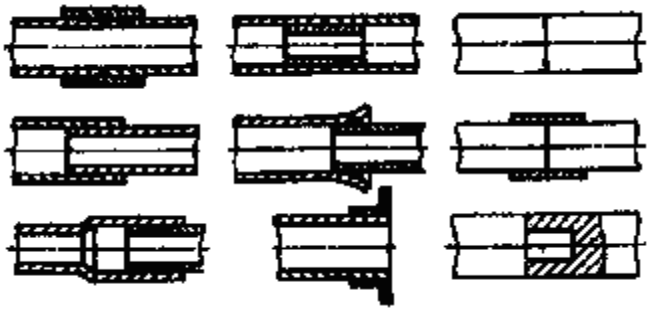

Рис 29.8. Примеры паяных соединений труб и стержней

В связи с тем, что паяный шов, как правило, имеет пониженную пластичность, следует так проектировать соединения, чтобы он не находился в зоне концентратора напряжений.

Прочность паяного шва в значительной степени зависит от расстояния между паяными поверхностями (паяльного зазора). Устанавливаемая величина паяльных зазоров, в свою очередь, находится в прямой зависимости от физико-химических свойств

паяемых материалов и припоев.

При слишком малом зазоре припой может не заполнить паяный шов и прочность соединения, таким образом, будет ослаблена. При очень большом зазоре капиллярные силы перестают действовать, в шов не затечет достаточного количества припоя и прочность соединения также будет понижена. Зависимость предела прочности паяного соединения при срезе от величины зазора показана на рис. 29.9.

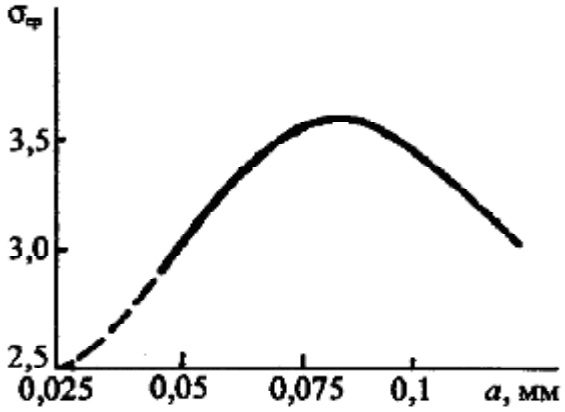

Рис. 29.9. Предел прочности паяного соединения в зависимости от величины зазора (припой — ПОС-61, основной металл — латунь)

В паяемых конструкциях всегда возникают собственные напряжения. Они являются результатом неравномерного нагрева, фазовых и структурных изменений в металле, разных значений коэффициентов линейных расширений припоя, основного металла, а при пайке разнородных металлов — результатом разницы их коэффициентов линейных расширений. Эти напряжения вызывают деформации укорочения или изгиба конструкции после пайки, снижают прочность соединении, могут стать причиной разрушений при вибрационных нагрузках.

Одним из средств уменьшения внутренних напряжений является последующая термообработка. Она, естественно, является неэффективной для паяных конструкций из разнородных металлов, так как внутренние напряжения возникают вновь. В этом случае снизить величину внутренних напряжений можно рациональным проектированием соединений (исключением концентраторов, применением в конструкциях согласованных по коэффициенту линейного теплового расширения материалов, увеличением толщины в зоне пайки металлической детали, расположенной снаружи).

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность процесса пайки и каковы его особенности по сравнению со сваркой?
2. По каким признакам и как классифицируются современные способы пайки?
3. Каковы основные этапы технологического процесса пайки?
4. В чем заключаются особенности пайки сталей, алюминиевых, магниевых, медных, титановых сплавов, тугоплавких металлов и разнородных материалов?
5. Каковы различия в подходе к конструированию паяных и сварных соединений, чем они обусловлены?