

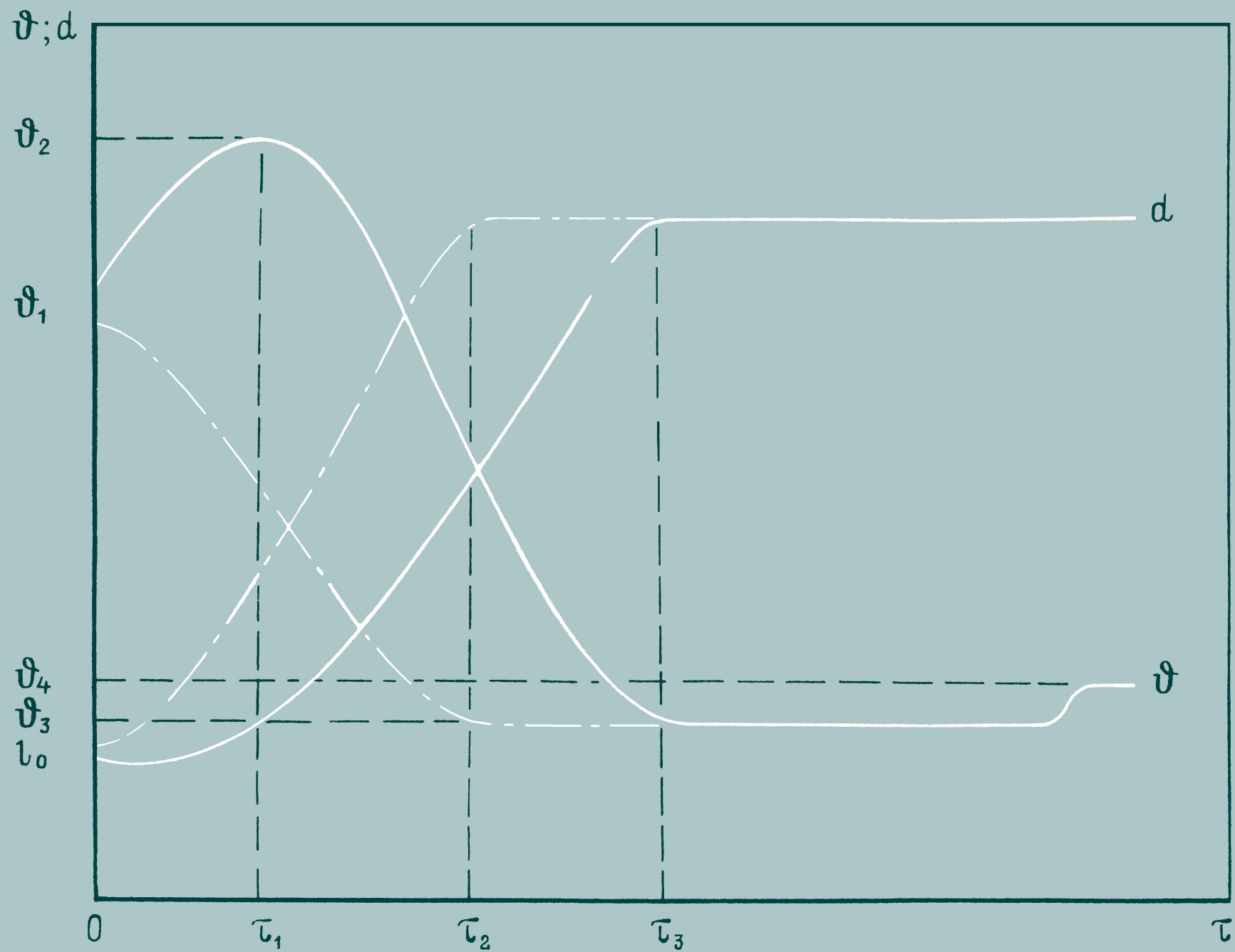
ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

С.В.Лашко, Н.Ф.Лашко

---

# ПАЙКА металлов





**С.В.Лашко, Н.Ф.Лашко**

---

# **ПАЙКА металлов**

**4-е издание,  
переработанное и дополненное**



**МОСКВА**  
**« МАШИНОСТРОЕНИЕ »**  
**1988**

ББК 34.643  
Л32  
УДК 621.791.3

Рецензент д-р техн. наук Н. А. КЛОЧКО

**Лашко С. В., Лашко Н. Ф.**

Л32 Пайка металлов.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1988.—376 с.: ил.

ISBN 5-217-00268-9

Изложены основные сведения о технологии и технологическом процессе пайки, ее способах, материалах для пайки, конструктивных факторах паяемых соединений и изделий, влияющих на их свойства и качество, и физико-химической совместимости материалов при пайке, термическом режиме и цикле пайки, технологии пайки алюминия, меди, титана и сплава на их основах, сталей, чугуна и разнородных металлов. В четвертом издании (3-е изд. в 1977 г.) даны основы проектирования технологии пайки изделий, обеспечивающего высокое их качество и эффективность производства.

Для инженерно-технических работников, конструирующих паяемые изделия, использующих пайку, занимающихся разработкой и изготовлением припоев, флюсов и паяльного оборудования.

Л  $\frac{2704060000-250}{038(01)-88}$  250—88

ББК 34.643

ISBN 5-217-00268-9 © Издательство «Машиностроение», 1988

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивное развитие прикладных и фундаментальных исследований в области пайки за последние 30 лет определило объем, содержание и изложение книги «Пайка металлов» в первом, втором, третьем изданиях.

Первое издание книги, выпущенное в 1959 г., отвечало настоятельной необходимости в научно обоснованной систематизации опыта пайки, начиная с ее терминологии, конструкционных особенностей паяных соединений, технологических и вспомогательных материалов, технологии и технологических процессов. Такая необходимость стимулировалась переходом пайки из стадии ремесла в стадию организованного производства, обусловленным интенсивным развитием новых отраслей машино- и приборостроения. Первое издание книги было переиздано в КНР и в США.

В связи с особенно интенсивным развитием научных основ пайки в последующие годы во втором издании существенное внимание было уделено наиболее важным аспектам теории процессов формирования паяных соединений; вопросы же оснащения процесса пайки специально не рассматривались.

Впоследствии некоторые вопросы теории и технологии пайки, в том числе контактные металлургические процессы при пайке, дополнительно были освещены авторами в книгах [14, 15].

В третьем издании книги «Пайка металлов» впервые была рассмотрена система технологии пайки, объединяющая собственно пайку как процесс соединения, а также напайку, распайку, припайку и контактно-реактивную резку, для которых характерно контактное плавление паемого материала. Третье издание книги в 1978 г. было переиздано на английском и испанском языках издательством «Мир».

За годы, прошедшие с момента написания третьего издания книги «Пайка металлов», произошло интенсивное совершенствование теории и технологии пайки.

Важнейшим направлением теоретических исследований в области пайки, позволяющим управлять и оптимизировать элементы технологии, является изучение металлургических контактных процессов взаимодействия на границе паемого металла и жидкого припоя, а также на границе с прокладками и покрытиями, флюсами и газовыми средами. В отличие от сварки плавлением, при которой

происходит автономное плавление материала при его нагреве выше температуры ликвидуса, при пайке происходит плавление паяемых материалов в контакте между собой и с твердыми прослойками (контактно-реактивная пайка), в контакте твердых прослоек с газами или парами легкоиспаряющихся элементов (контактная твердогазовая пайка), в контакте с жидким припоем (контактное твердожидкое плавление). Такие виды контактного плавления при пайке обуславливают известные ее преимущества, связанные с возможностью общего нагрева изделия, что позволяет эффективно управлять термическим циклом и режимом пайки, а следовательно, и качеством паяных соединений и существенно повышать производительность технологического процесса пайки.

В связи с этим в четвертом издании в первой главе книги авторы сочли целесообразным выделить основные понятия пайки, используемые в последующих главах, а в других — включить новые сведения о технологических и вспомогательных материалах, способах пайки, контактных металлургических процессах и паяемости важнейших металлов и сплавов машиностроения, полученные в последнее десятилетие.

В связи с возрастающим значением гибких производственных систем для современного производства в книгу введена глава об основах автоматизированного проектирования технологии пайки изделий.

Назначение книги — помочь широкому кругу инженерно-технических работников в области сварочного производства, проектирующих, изготавливающих и ремонтирующих паяные изделия, изготавливающих технологические, вспомогательные материалы и оснащение для пайки, правильно оценить ее преимущества и особенности среди других процессов получения неразъемных соединений с тем, чтобы более эффективно использовать пайку в современном производстве и правильно ориентироваться в потоке информации в этой области.

## ВВЕДЕНИЕ

Превращение древнего ремесла — пайки в один из важнейших технологических процессов современного производства произошло благодаря современной научно-технической революции. Бурное развитие техники в различных отраслях промышленности обусловило широкое ее применение, и в первую очередь в машиностроении и электронике и электротехнической промышленности. Это связано с тем, что пайка, как процесс формирования соединений материалов, осуществляется при температурах ниже температуры начала плавления паяемого материала и характеризуется возможностью автоматического ее регулирования, так как во многих случаях на границе паяемого материала и жидкого припоя устанавливается состояние локального равновесия, являющегося основой такого регулирования. При сварке плавлением и в твердой фазе значительно труднее реализовать локальное равновесие. Вследствие этого технология пайки существенно отличается от технологии сварки плавлением и сварки давлением и требует специальных технологических и вспомогательных материалов и оснащения.

В настоящее время пайка наряду со сваркой является одним из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений в современном производстве. Важнейшее достоинство пайки — формирование паяного шва при температуре ниже температуры автономного плавления соединяемых металлов. Это обстоятельство дает возможность вести процесс в условиях общего нагрева и позволяет:

- осуществлять групповую пайку и широкую ее механизацию и автоматизацию, что обеспечивает высокую производительность процесса в крупносерийном и массовом производстве;

- получать соединения в скрытых и малодоступных местах изделий, изготавливать тонкостенные изделия с большой плотностью паяных соединений и их объемным расположением за один нагрев, повышать коэффициент использования материала и снижать металлоемкость изделий;

- соединять детали не только последовательно по контуру шва, как при сварке плавлением, но и одновременно, в том числе по поверхности, что обуславливает возможность варьирования прочности паяных соединений и конструкции изделий;

- ограничиваться при пайке давлениями на порядок меньшими, чем при сварке давлением;

- соединять разнородные металлические и неметаллические материалы и с большей разностенностью деталей, чем при сварке плавлением;

выбирать температуру процесса в зависимости от необходимости сохранения механических свойств материалов изделия после пайки, возможности совмещения нагрева под пайку с термообработкой и выполнения ступенчатой пайки;

обеспечивать плавность галтельных участков шва, а следовательно, высокую прочность и надежность их в условиях вибрационных и знакопеременных нагрузжений;

разъединять детали и сборочные единицы путем распайки при температуре ниже температуры автономного плавления паяемого материала и ремонтировать изделия в полевых условиях.

Особо важное значение имеют вопросы обеспечения равнопрочности паяных соединений. Как известно, препятствиями для достижения равнопрочности паяных соединений в ряде случаев являются более низкая прочность и пластичность большинства припоев по сравнению с паяемым металлом, литая структура в шве, высокое химическое сродство компонентов припоев с основой или компонентами паяемого материала, приводящее к росту прослоек химических соединений, развитие в паяном соединении диффузионной пористости, слабая активность газовых сред и флюсов при температуре пайки, нетехнологичность конструкции паяемых соединений и изделий, развитие остаточных паяльных напряжений в элементах и паяных соединениях и др. Однако потенциальные возможности повышения прочности паяных швов достаточно велики в связи с малым объемом литого металла в паяном соединении, развитием новых способов пайки и в первую очередь диффузионной пайки, достижениями в области интерметаллидного упрочнения сплавов в литом состоянии.

Появившиеся в последние годы возможности в области повышения пластичности и прочности припоев до значений, близких к теоретическим [при отсутствии в них ликвации и зерен в результате быстрого охлаждения ( $10^6$  °C/с)], указывают на принципиальную возможность повышения прочности шва также путем регулирования скорости охлаждения.

Известные данные по космической металлургии, при отсутствии гравитации, подтвердили возможность безликвационного формирования слитка, что также указывает на пути повышения прочности паяных соединений, например в условиях пайки в космосе. Успешное применение интерметаллидного упрочнения литейных сплавов специальным легированием и термообработкой новых припоев для пайки показывает перспективность и этого направления.

Переход от понимания процессов образования соединения при пайке к управлению качеством паяных соединений возможен лишь при учете быстро возрастающей информации в области теории, технологии и техники пайки, что требует системного подхода и переработки такой информации для автоматизированного проектирования технологии и технологических процессов, что необходимо в нынешних условиях разработки и внедрения гибких автоматизированных систем в современном производстве.

# Глава 1

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

### 1. ПАЙКА, ЕЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Пайкой называется образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации (ГОСТ 17325—79).

При пайке автономного плавления паяемого материала не происходит, так как процесс осуществляется при нагреве до температуры ниже температуры его солидуса. Однако паяемый металл контактирует с припоем в ином агрегатном (жидком) состоянии. При этом паяемый металл и припой, имеющие химическое сродство, представляют неравновесную систему, так как на их границе существует градиент концентраций и энергии. Поэтому процессы взаимодействия материалов при пайке связаны с обменом веществом и передачей энергии, происходящими специфическим образом. Такое взаимодействие базируется на взаимодополняющих феноменологических (макроскопических) и микроскопических методах анализа. Важнейшим феноменологическим методом анализа при этом является термодинамика.

Переход термодинамической системы паяемый материал — припой из весьма неустойчивого лабильного в более стабильное или метастабильное состояние происходит необратимо и состоит из двух стадий: активируемой и самопроизвольной неактивируемой. Энергетическим стимулом первой активируемой стадии перехода системы в более стабильное состояние при постоянном давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$  служит непрерывное увеличение потенциальной энергии активации на границе двух фаз за счет кинетической энергии, а второй неактивируемой стадии — непрерывное уменьшение термодинамического изобарного потенциала системы (диффузионная стадия).

Переход из одного равновесного состояния в другое с преодолением энергии активации  $Q$  происходит через особые неравновесные состояния — активируемые состояния атомов. По гипотезе Аррениуса в 1889 г. для газов, распространенной для твердых и жидких тел В. А. Левичем, в единице объема активируются не все  $N$  атомов, а лишь те  $N_0$ , которые при температуре  $T_0$  обладают избыточной энергией  $Q: n_0 = Ne^{-Q/RT}$ , где  $R$  — газовая постоянная. Энергия активации  $Q$  — это потенциальная энергия, которая увеличивается за счет кинетической энергии системы,

особенно при эндотермических процессах (например, плавлении). При передаче кинетической энергии в термически активируемом процессе порциями потенциальная энергия также увеличивается в виде флуктуаций. Таким образом, активируемое состояние является переходным (промежуточным состоянием) с повышенной потенциальной энергией. Оно возможно не только при поглощении теплоты (эндотермических реакциях), но и при деформации. Активируемые состояния возникают при фазовых переходах первого рода [9].

К фазовым переходам первого рода относятся фазовые превращения однокомпонентных систем, объем которых при температуре  $T_0$  и давление  $p_0$  изменяется скачком и одновременно происходит выделение или поглощение теплоты. К ним относятся равновесные переходы из одного агрегатного состояния в другое, полиморфные превращения, связанные с изменением температуры и давления в процессах диффузии, образования зародышей новых фаз при кристаллизации и распаде твердых растворов и др. Самопроизвольные фазовые переходы первого рода и их изменения по второму закону термодинамики стимулируются условиями  $dS > 0$  и  $dz \leq 0$  при постоянных давлении  $p$  и температуре  $T$ , где  $S$  — энтропия;  $z$  — термодинамический (изобарный) потенциал.

К фазовым переходам второго рода относятся равновесные превращения однофазовой системы, при которых температура  $T_0$  и давление  $p_0$  и первые частные производные  $z$  равны нулю, но вторые частные производные изменяются скачком (например, температурный коэффициент объемного расширения и сжимаемость).

Фазовый переход первого рода происходит самопроизвольно в результате конечных флуктуаций местной и общей энергии (энергии активации) на границе контактирующих материалов. При этом степень активации атомов поверхностного слоя жидкой фазы более высокая, чем степень активации атомов контактирующей с ним твердой фазы, вследствие большей подвижности атомов в жидком состоянии.

Наиболее известны две формы движения (процессов) и фазовых переходов (превращений): диффузионное и бездиффузионное. При диффузионных формах движения и фазовых переходов спонтанное перемещение атомов и вакансий происходит статистически, с обменом местами. Такие переходы характерны для контакта веществ в одинаковом агрегатном состоянии. При бездиффузионном движении или переходе перемещение атомов происходит кооперативно (коллективно) за один акт или последовательно за несколько актов, без обмена атомов и вакансий на расстояния, не превышающие межатомные. Следовательно, при контакте паяемого материала с припоем, находящихся в различном агрегатном состоянии, процессы их взаимодействия должны развиваться в две стадии: сначала должна наступить кинетическая (бездиффузионная) активируемая стадия, а потом диффузионная стадия. При этом более равновесное состояние такой системы при смачивании

основного материала жидким припоем, вероятнее всего, может быть достигнуто при преодолении относительно высокой энергии активации  $BC$  системы (рис. 1) в результате расплавления твердого металла по кинетическому режиму, т. е. практически по бездиффузионному механизму. Поэтому продуктом первой активирующей стадии должна быть жидкая фаза [14, 15]. Только после этого может наступить диффузионная стадия растворения, т. е. переход атомов паяемого металла из прилегающего к нему расплавленного на первой стадии слоя в остальной объем жидкой фазы (припоя). По расчетам А. А. Шебзухова, бездиффузионный этап пайки готовым припоем имеет длительность  $\sim 0,01$  с. Такой вариант контактного плавления твердых кристаллических веществ в контакте с жидким веществом с тем же типом связи (например, металлом), в отличие от контактно-реактивного плавления двух твердых веществ, был назван контактным твердожидким плавлением [14, 15], в контакте с паром — твердогазовым плавлением.

Вследствие контактного плавления металлических деталей при пайке могут изменяться их форма, размеры и состояние материала. В связи с этим чисто физический разъем паяемого соединения, аналогичный, например, развинчиванию, разъему механических соединений с прокладками, невозможен. Возможны лишь распайка, разъединение по шву в результате плавления при нагреве выше его температуры солидуса, после чего нельзя получить детали в состоянии, аналогичном исходному, так как изменено состояние паяемого металла в местах, смоченных припоем и подвергнутых нагреву при пайке, а также изменены форма и размеры детали. Поэтому паяные соединения деталей не являются разъёмными, т. е. такими, форма, размеры, состояние и шероховатость материала которых после разъема не изменяются.

Как известно, под технологией понимают совокупность способов и приемов получения и обработки материалов, заготовки, сборочной единицы или изделия. Последовательность осуществления операций и переходов называется технологическим процессом. Технологический процесс пайки состоит из операций подготовки поверхности паяемого материала и припоя, сборки, собственно пайки, обработки паяного изделия после пайки и контроля качества. В технологическом процессе операции до и после пайки определяются выбранной ее технологией и зависят от конструкции и назначения паяемого изделия, состава и свойств паяемого, технологического и вспомогательного материалов.

Способы пайки объединяют в группы по классификационным признакам: формированию паяного шва (СП1), удалению оксид-

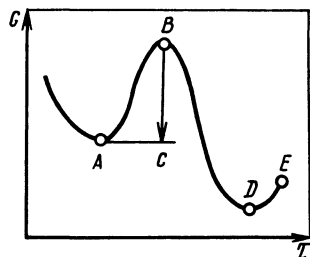


Рис. 1. Схема изменения изобарно-изотермического потенциала при активируемых переходах равновесных и неравновесных систем

ной пленки (СП2), по источнику нагрева (СП3), осуществлению давления на детали (СП4) и по одновременности выполнения паяемых соединений изделия (ГОСТ 17349—79) с соответствующим оснащением, состоящим из нагревательного оборудования и инструмента, оснастки, средств механизации, автоматизации и роботизации. К приемам операции пайки относятся: температурный режим пайки (ТРП), термический цикл пайки (ТЦП), способ введения припоя и контактных прослоек, флюсовых и газовых средств, приложения давления и др.

## **2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ПАЙКИ**

Для осуществления пайки прежде всего необходимы припой, его физический контакт с паяемым металлом в жидком состоянии и физико-химическое взаимодействие между ними при заполнении зазора в процессе нагрева по термическому циклу с последующей кристаллизацией паяного шва. В соответствии с этим классификационными признаками первой группы способов пайки (СП1) являются метод получения и полнота расплавления припоя, способ заполнения паяльного зазора припоем и условия кристаллизации паяного шва.

Припой может быть изготовлен заранее (готовый припой), а может образоваться в процессе пайки в результате контактно-реактивного плавления (контактно-реактивный припой), контактного твердогазового плавления (контактный твердогазовый припой), в результате высаживания жидкого металла из компонентов флюса (реактивно-флюсовый припой). В соответствии с этим различают контактно-реактивную пайку, контактную твердогазовую пайку и реактивно-флюсовую пайку.

Появление в технике крупногабаритных тонкостенных узлов с большой площадью пайки все более затрудняло возможность сборки деталей с равномерными капиллярными зазорами между криволинейными поверхностями, что приводило к развитию непропаев, снижению высоты поднятия припоя в зазорах (вертикальных и наклонных) и др. В связи с этим получила развитие композиционная пайка — пайка с композиционным припоем, состоящим из наполнителя и легкоплавкой составляющей, в частности, металлокерамическим припоем.

По характеру затекания припоя в зазор различают капиллярную (ширина зазора  $< 0,5$  мм) и некапиллярную (ширина зазора  $\geq 0,5$  мм) пайку. При капиллярной пайке припой заполняет зазор самопроизвольно под действием капиллярных сил.

При некапиллярной пайке использована возможность поднятия жидкого припоя в зазорах под действием гравитации, отрицательного давления в некапиллярном зазоре (при откачке воздуха из зазора), магнитных и электромагнитных и других внешне приложенных сил.

После заполнения зазора припоем паяный шов затвердевает в процессе охлаждения изделия (кристаллизация при охлаждении). При температуре выше температуры солидуса припоя процесс кристаллизации шва может происходить и в результате отвода депрессата или легкоплавкой составляющей припоя из шва (диффузионная пайка).

Жидкий припой смачивает только чистую поверхность паяемого металла. В связи с этим при формировании паяного соединения необходимы условия, обеспечивающие физический контакт паяемого материала и жидкого припоя при температуре пайки. Осуществление такого контакта возможно в местах удаления с поверхности металла оксидных пленок. Удалить оксидные пленки при пайке и осуществить физический контакт конструкционного материала ( $M_k$ ) с припоем ( $M_n$ ) можно с применением паяльных флюсов или без них. В последние годы высокие требования по коррозионной стойкости паяных соединений и стремление к сокращению времени технологических операций привели к расширению применения способов бесфлюсовой пайки. Флюсовая пайка наряду с этим остается во многих случаях также широко применяемым процессом. По физическим, химическим и электрохимическим признакам, определяющим процесс удаления оксидов с поверхности основного металла и припоя при пайке, способы пайки объединены в группу СП2.

Способы пайки по источнику нагрева объединены в группу СП3. К способам пайки этой группы, применяемым ранее (паяльником, горелкой, электросопротивлением, в печи, погружением в расплавы флюса или припоя, индукционному, электролитному), добавились новые с использованием источников нагрева в виде света, лазера, теплоты химических реакций, потока ионов в тлеющем разряде, инфракрасного излучения, волны припоя, электронного луча, теплоты конденсирования паров и др.

Различают низко- и высокотемпературную пайку. За граничную температуру этих способов принята температура 450 °С. Целесообразность такого деления обусловлена тем, что технологические, вспомогательные материалы и оснащение для низкотемпературной и высокотемпературной пайки обычно существенно отличаются. Классификационным признаком четвертой группы способов пайки СП4 является отсутствие при фиксированном зазоре или наличие давления на паяемые детали с целью обеспечения заданной величины паяльного зазора (прессовая пайка).

Классификационным признаком пятой группы способов СП5 служит одновременность или неодновременность выполнения паяных соединений изделия.

Технологическая классификация способов пайки базируется в основном на альтернативности их признаков [12, 16]. На рис. 2 дана технологическая классификация способов пайки (ГОСТ 17349—79). В наименование способа пайки конкретного изделия должны войти по одному или несколько наименований способов из

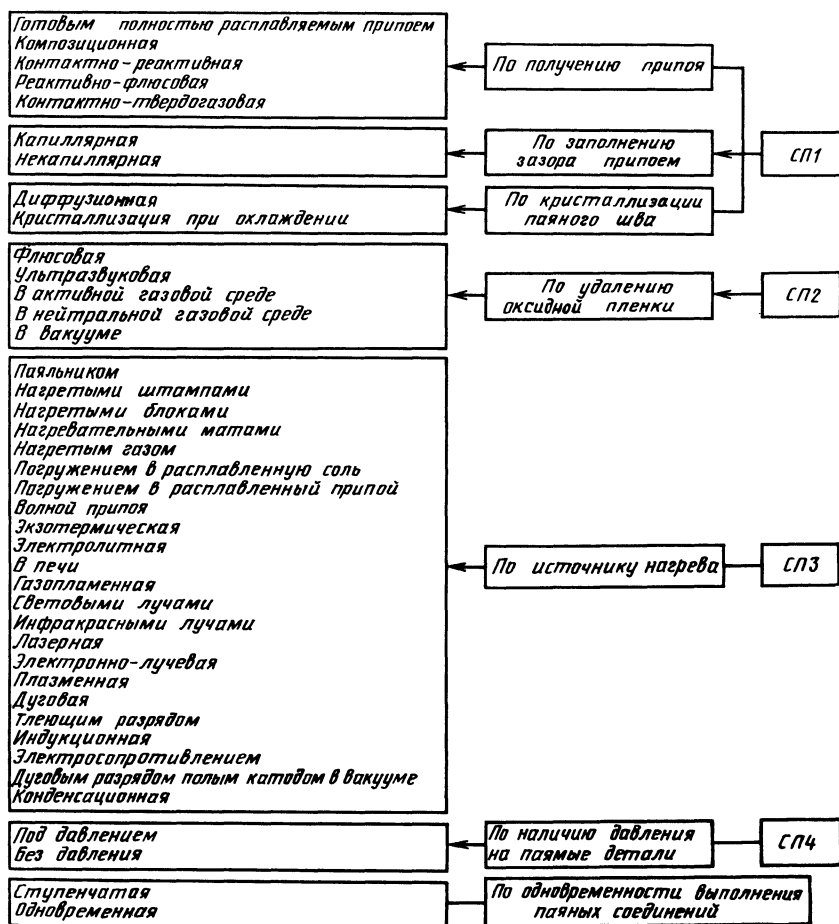


Рис. 2. Технологическая классификация способов пайки

каждой группы и в том же порядке, в каком они перечислены на рис. 2. Например, «контактно-реактивная капиллярная диффузионная печная пайка в вакууме под давлением».

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРИ ПАЙКЕ

К технологическим материалам при пайке относятся такие, компоненты которых входят в состав образующегося паяного соединения,— припой и контактные или барьерные покрытия.

По ГОСТ 17325—79 припой называют материал для пайки и лужения с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов. К вспомогательным материалам относятся такие, компоненты которых непосредственно не входят в состав

образующегося паяного соединения, но участвуют в его образовании. К ним относятся паяльные флюсы, активные и инертные газовые среды, вещества, ограничивающие растекание припоя (стоп-материалы), и др.

Припои подразделяют на две группы — готовые и образующиеся при работе.

**Готовые припои.** Наиболее широкое применение при пайке нашли готовые припои. Готовые припои классифицируют по следующим признакам (ГОСТ 19250—73): по величине их температурного интервала плавления; степени расплавления при пайке; основному или наиболее дефицитному компоненту, способности к самофлюсованию; способу изготовления и виду полуфабрикатов (рис. 3).

Температурный интервал плавления припоя — важнейший классификационный признак. Такой интервал ограничен температурой начала (солидус) и конца (ликвидус) плавления припоя. По температуре конца расплавления припои разделяют на пять классов: особолегкоплавкие ( $t_{пл} \leq 145^\circ\text{C}$ ); легкоплавкие ( $145^\circ\text{C} < t_{пл} \leq 450^\circ\text{C}$ ); среднетплавкие ( $450^\circ\text{C} < t_{пл} \leq 1100^\circ\text{C}$ ); высокоплавкие ( $1100^\circ\text{C} < t_{пл} \leq 1850^\circ\text{C}$ ); тугоплавкие ( $t_{пл} \geq 1850^\circ\text{C}$ ).

Число различных припоев, разработанных к настоящему времени, весьма велико и продолжает непрерывно увеличиваться, что обусловлено повышением требований, предъявляемых к механическим и служебным свойствам паяных соединений, и необходимостью улучшения паяемости существующих и новых материалов.

**Классификация готовых припоев по степени их автономного расплавления.** По степени автономного расплавления при пайке

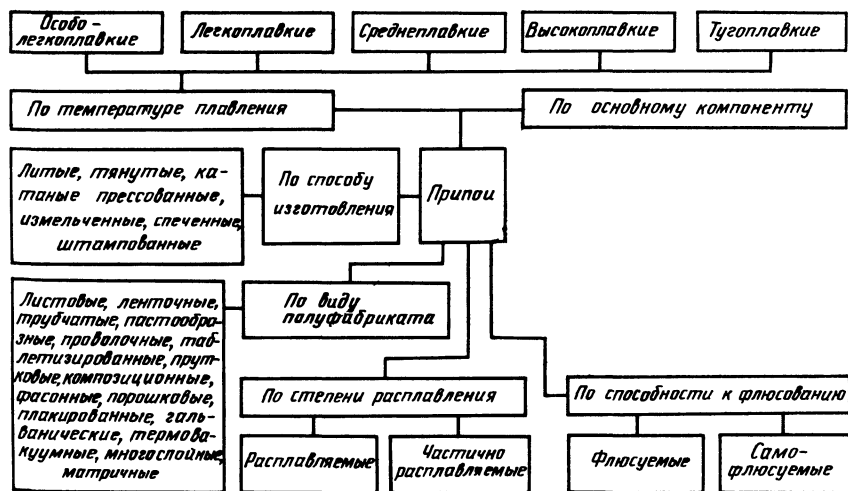


Рис. 3. Классификация готовых припоев

припои подразделяют на полностью и частично расплавляемые. Ранее применяли главным образом припои полностью расплавляемые при пайке. Исключение составляли припои, применяемые в стоматологической технике, и частично расплавляемые припои с широким интервалом затвердения, которые использовали главным образом при абразивной пайке.

В 60-е и последующие годы получили развитие неоднородные, частично расплавляемые припои, состоящие из легкоплавкой части припоя и твердого наполнителя, не плавящегося автономно при температуре пайки. Такие припои в соответствии с современной классификацией металлических материалов называют композиционными.

Наполнитель композиционных припоев чаще всего представляет собой порошок, перемешанный с порошком легкоплавкой части припоя. При пайке таким припоем сцепление частиц наполнителя в шве и шва с паяемым металлом возникает в результате взаимодействия последнего с жидкой частью припоя и ее кристаллизации, а также в результате спекания наполнителя между собой и с паяемым металлом. Ранее композиционный припой такого типа был условно назван металлокерамическим, а пайка металлокерамической, так как при ней имеют место процессы спекания, аналогичные процессам в порошковой металлургии [15].

В композиционных припоях другого вида наполнитель может состоять из проволоки, сетки, стержней, волокон. При этом легкоплавкая часть припоев может быть скомпонована с наполнителем путем равномерного их перемешивания, прессования, штамповки, спекания или иметь вид порошка из частиц наполнителя, предварительно смоченных легкоплавкой составляющей припоя (армированные припои).

**Припои, образующиеся при пайке.** К этой группе относятся контактно-реактивные припои, получающиеся при контактно-реактивном плавлении паяемого материала с контактными прокладками или покрытиями или последних между собой; контактные твердогазовые припои, образующиеся в результате плавления паяемого металла, контактных прокладок или покрытий в парах металлов или неметаллов, находящихся в атмосфере печи; реактивно-флюсовые, образующиеся в результате вытеснения металлов из компонентов реактивных флюсов.

*Контактно-реактивные припои* получают между паяемыми разнородными металлами или между паяемым металлом, прокладками, покрытиями, если они или их основы образуют эвтектики либо непрерывный ряд твердых растворов с минимальной температурой плавления ниже температуры пайки (слоистые припои). Контактно-реактивное плавление металлов происходит через несплошности в их оксидных пленках и развивается только при достаточном содержании в эвтектике или твердом растворе каждого из контактирующих металлов.

Для слоистого контактно-реактивного припоя в виде фольги

существенное значение имеет соотношение объемов контактирующих слоев, которое должно быть таким же, как в эвтектике (или в твердом растворе с минимальной температурой плавления), а расположение прослоек должно обеспечивать контакт реагирующих материалов. Если один из контактирующих элементов имеет повышенную упругость испарения, то его лучше помещать между прослойками других металлов, имеющих относительно меньшую упругость испарения в условиях пайки.

Использование хрупких припоев системы Ni—Cr—В в виде пластичной нихромовой фольги, насыщенной с поверхности бором, также обеспечивает достаточно высокую пластичность припоя при сборке.

*Контактные твердогазовые припои* получают в результате плавления соединяемых металлов, металлических прокладок, покрытий, компактных кусков, отличающихся по составу от паяемого материала и взаимодействующих с парами элементов, с которыми они образуют эвтектики или твердые растворы с минимальной температурой плавления (ниже температуры пайки).

*Реактивно-флюсовые припои* образуются в результате восстановления металлов из компонентов флюсов или диссоциации одного из них. Возможность восстановления металлов из флюсов определяется термодинамическими условиями предпочтительного протекания реакций, в результате которых свободная энергия системы изменяется на возможно большую величину.

*Классификация припоев по величине температурного интервала их плавления.* Способность припоев к растеканию и затеканию в зазор улучшается с уменьшением их температурного интервала плавления. При пайке припоями с широким температурным интервалом плавления предварительная укладка их у зазора не всегда допустима из-за опасности втягивания легкоплавкой части припоя в зазор. При этом более тугоплавкая часть припоя образует у зазора «королек», не расплавляющийся при пайке. Вследствие этого свойства паяных соединений могут существенно отличаться от ожидаемых, а образование королька у зазора может приводить к ухудшению товарного вида и удорожать обработку после пайки. Припои с узким температурным интервалом плавления плохо удерживаются в сравнительно широких капиллярных зазорах, но лучше затекают в узкие зазоры. При пайке изделий с большой площадью спая или вертикальными зазорами с предварительной укладкой в них припоя лучше использовать припои с широким температурным интервалом плавления, а при некапиллярных зазорах — композиционные.

*Классификация припоев по основному компоненту.* К числу металлических припоев, содержащих более 50 % одного из компонентов, относятся припои оловянные, кадмиевые, цинковые, магниевые, алюминиевые, медные, кобальтовые, никелевые, марганцевые, золотые, палладиевые, платиновые, титановые, железные, циркониевые, ниобиевые, молибденовые, ванадиевые и др. При

близком содержании некоторых компонентов припой называют по этим основным компонентам, например, оловянно-свинцовые, медно-никелево-марганцевые и др. При содержании одного или нескольких легирующих компонентов, являющихся редкими или драгоценными металлами, припой иногда называют по этим компонентам, например, серебряный, золотой и др., хотя содержание их в припое может составлять несколько процентов.

*Классификация припоев по способности к самофлюсованию.* Существуют припои, которые могут выполнять также функции флюсов. Припои, обладающие свойствами самофлюсования, должны содержать легирующие элементы-раскислители с сильным химическим сродством к кислороду. Эти элементы должны способствовать растекаемости и смачиваемости припоем паяемого металла. Продукты раскисления, образующиеся при взаимодействии такого припоя с паяемым металлом, должны легко удаляться из шва, в частности, для этого температура плавления их должна быть ниже температуры пайки. К элементам-раскислителям относятся литий, калий, натрий, фосфор, цезий, бор и др.

Припои, легированные этими элементами и способные к самофлюсованию в инертной газовой среде или на воздухе, называют самофлюсующими в отличие от остальных припоев, при пайке которыми необходимы флюсы, вакуум или активные газовые среды.

*Классификация припоев по способу изготовления и виду полуфабриката.* Многообразие паяных конструкций и способов пайки, конструкционных металлов и припоев с различными свойствами и необходимость их совместимости в производстве стимулировали развитие различных способов изготовления полуфабрикатов припоев. Старые традиционные припои в виде чушек (для пайки погружением в расплавленный припой), в виде зерен и литых прутков при многих способах пайки и типах конструкций современных изделий оказались не всегда удобными. Перед пайкой для предварительной укладки у зазора или в зазор необходимы припои в виде листов, лент, фольги, проволоки. Однако вследствие низкой пластичности многих припоев получение их в таком виде способами обработки давлением (прокатки, протяжки) невозможно. Если компоненты таких припоев способны к образованию эвтектики, то из них изготавливают путем прокатки многослойную фольгу, а путем протяжки многослойную проволоку из пластичных составляющих припоя.

Припои в виде многослойных листов нашли применение в электронике и радиотехнике. В процессе изготовления таких листов припоев, хрупких в литом состоянии, целесообразно менее пластичные составляющие помещать между более пластичными составляющими припоя, чтобы при прокатке края наружных листов сваривались, образуя герметичный пакет, предотвращающий выдавливание наружу внутренней хрупкой составляющей; образующийся при прокатке между листами вакуум способствует прочному сращиванию слоев припоя.

Другой способ получения пластичных листов из составляющих хрупкого припоя заключается в том, что на пластичную фольгу одного из компонентов припоя, например никелевую фольгу, наносят смесь порошков остальных компонентов, например железа, бора, кремния, хрома и др., смешанных со связкой — метилцеллюлозой. Толщина слоя такой пасты, наносимой на фольгу никеля, составляет 20 % общей ее толщины. После сушки, прокатки с обжатием на ~33 % и сглаживания прокаткой, нагрева в восстановительной атмосфере при температуре 954 °С и прокатки до толщины 0,1 мм получают пластичную фольгу. При нагреве до температуры пайки и плавлении фольги получается припой Ni—Fe—Si—B—Cr (Пат. 34765228 США, МКИ<sup>3</sup> кл. 29—182) требуемого состава.

Изготовление фольги из некоторых припоев, имеющих пониженную пластичность в литом состоянии, например припои Cu—Mn—Ni—Li, возможно прокаткой из жидкого состояния с последующей прокаткой полученных листов до требуемой толщины входную, с промежуточными отжигами. Ленту малопластичных припоев иногда получают распылением стальной стружки или прокаткой из порошка с последующим спеканием.

Получение листа припоя из жидкого состояния возможно не только прокаткой, но также путем нагрева до расплавления и сдавливания затвердевающих мелких капель припоя пуансоном.

При необычной форме соединяемых деталей или стесненном монтаже, например радиотехнических схем, при необходимости механизации и автоматизации процессов сборки и пайки, для снижения отходов припоя используют литые заготовки припоя требуемой формы. Такие заготовки представляют собой фасонные отливки в виде сеток, колец, пластин различной формы, которые получают, например, литьем в кокиль или по выплавляемым моделям.

Малопластичные припои можно применять в виде точеных колец. При этом по наружной стороне разрезных колец припоя круглой или другой формы для уменьшения расхождения стыкуемых концов во время нагрева при пайке проводят обкатку роликом с пирамидальными выступами, что обеспечивает образование в заготовке напряжений сжатия (по данным Д. Е. Фута).

Припои могут быть использованы в виде порошков. Применение порошков припоев позволяет снизить трудоемкость и стоимость их изготовления. Для многих порошковых припоев после их изготовления необходима активация поверхности частиц путем нагрева в атмосфере водорода или в вакууме ниже температуры их солидуса. Порошки припоев получают следующими способами: механическим измельчением (в том числе в шаровых мельницах с чугунными шарами); в вибрационных и вихревых мельницах; путем распыления (раздува) жидкого припоя в струе пара, воды или газа и т. п. Порошки припоев, полученные распылением в среде инертного газа, например аргона, имеют сферическую форму, не

загрязняются нежелательными примесями и не имеют оксидных пленок на поверхности. Однако для конструкций многих типов применение припоев в виде порошков нетехнологично при сборке.

Для современного производства в связи с механизацией и автоматизацией процессов более удобны припои в виде паст, а также прессованных или формованных заготовок из смеси порошка припоя и связки. Пасты обычно представляют собой тонкие смеси (10—100 мкм) металлических компонентов в виде порошков и связующих нейтральных веществ (связок), испаряющихся при пайке. Для нанесения паст применяют пневматические дозирующие устройства, иногда с электрическими системами управления, в том числе реле времени, встроенным в автомат [50].

Применение паст облегчает внесение припоя при сборке, позволяет точно дозировать состав и количество припоя, количество флюса, а при хороших адгезионных свойствах пасты обеспечивать фиксацию деталей без сборочных приспособлений. Применение паст обеспечивает также полное улетучивание материала связки, исключает высыхание и изменение химического состава смеси при длительном хранении.

Из порошков изготавливают и прессованные заготовки. Обычно такие заготовки, имеющие внешнюю форму, подогнанную к контуру сопряженных паяемых поверхностей, укладывают предварительно в зазор между деталями. Для обеспечения высокой чистоты поверхности такие заготовки получают горячим прессованием, после чего на них наносят плотный слой пластмассового покрытия и упаковывают в защитные чехлы. Температурный интервал плавления таких припоев (по В. Вунху) не должен превышать 85 °С во избежание ликвации припоя при медленном нагреве.

По данным Г. А. Асиновской, для изготовления таблеток и закладных деталей не пригодны порошки со сферической формой частиц. Для этого необходимы порошки с частицами неправильной формы, получаемые при распылении струи жидких припоев струей воды.

В качестве связки при изготовлении паст из порошков могут быть использованы многие вещества, испаряемые при нагреве без остатка: вода и ее смеси с флюсом ПВ 209; акриловая смола, растворенная в растворителе Р-5; полистирол, растворенный в летучем растворителе — ксилоле или лигроине (нафте). При этом 20—25 % связки составляют гранулы полистирола. В готовую связку вводят чистый порошок припоя, например меди, размерами частиц не крупнее 200 мкм. Перед пайкой необходима сушка детали с нанесенной пастой в течение 15—20 мин. Однако такая связка может загораться. По данным Л. А. Гржимальского и Ю. Ф. Сидохина, в качестве связки можно использовать раствор лака в ацетоне. При пайке до температуры 1150 °С возможна диффузия углерода из связки в паяемый металл.

В качестве связки при изготовлении формованных заготовок припоя в виде кольца из порошка хрупкого припоя используют

боросиликатное неорганическое стекло с добавками флюсующего вещества.

Для облегчения работы шприцевых дозирующих устройств, имеющих пасту из высокоплавких припоев, применена связка, имеющая состав (об. %): 85—91 полибутилена; 3—5 соединений из группы полиметилэфира этиленгликоля и просто этиленгликоля; 5—10 воды; 0,5—1,0 твердой акриловой смолы из низших сополимеров эфиров акриловой и метакриловой кислот (Пат. 3475442 США, МКИ<sup>3</sup> кл. 260—296).

В некоторых случаях необходимо применять неэлектропроводный порошок припоя. Подобный порошок из меди и оловянно-свинцовых припоев может быть изготовлен в виде частиц диаметром 5—500 мкм путем покрытия их слоем диэлектрического органического флюса с температурой плавления ниже температуры плавления припоя, образующего сплошные электроизоляционные покрытия, адгезионно удерживающие частицы припоя на паяемой поверхности. Для этой цели наиболее пригодны полимерные органические флюсы, например канифоль.

В 80-х годах была разработана новая технология получения фольги из хрупких припоев путем быстрого охлаждения их из жидкого состояния со скоростью  $\sim 10^6$  °C/с. Такие условия охлаждения достигаются:

1) распылением жидкого припоя на водоохлаждаемый барабан;

2) подачей струи припоя в зазор площадью 5—70 мм<sup>2</sup> между валками, вращающимися со скоростью  $\geq 0,2$  м/с, с последующей обработкой фольги в нейтральной или восстановительной среде при температуре 300—500 °C;

3) подачей струи припоя на один или два медных валка, вращающихся со скоростью  $\geq 0,2$  м/с (толщина фольги 15—70 мкм).

Такие фольги припоев достаточно пластичны и складываются «на себя» с нулевым радиусом без излома; в структуре припоя в аморфном (стеклообразном) состоянии может находиться 100—50 % металла. Расстекловывание и переход в хрупкое состояние происходит при достаточно высокой его температуре ( $\sim 0,5 t_{пл}$ ) и не влияет на температурный интервал плавления припоя. При этом фольга остается химически гомогенной и плавится равномерно. Таким способом в США была получена лента фольги припоев системы Ni—Cr—В—С, которая предназначалась для бесфлюсовой пайки в сухом водороде, инертном газе или вакууме при зазоре шириной 0,100 мм и была применена для пайки лопаток с ободом (Пат. 4250223 США МКИ<sup>3</sup> кл. 428/606 В 22 Г 5/00).

В табл. 1 приведены данные о пластичных фольгах припоев на основе меди и никеля.

Припой ВCuP1—ВCuP7, № 4—7 получают в виде фольги путем сверхбыстрого охлаждения.

Эти материалы имеют формулу  $TX_j$ , где  $T$  — переходной металл, а  $X$  — элемент из группы Р, В, С, Al, Si, Sn, Gl, In, Be, As;

Т а б л и ц а 1. Пластичные фольги из хрупких медных припоев для пайки меди и ее сплавов (Пат. 1206282 ВНР, МКИ<sup>3</sup> кл. 49 h 35/14)

| Марка или номер припоя | Состав припоя (остальное Cu), % | Температура, °C |         | Структура             |
|------------------------|---------------------------------|-----------------|---------|-----------------------|
|                        |                                 | плавления       | пайки   |                       |
| 1                      | 10—30 Ni, 15—20 P               | 670—820         | —       | Аморфная              |
| 2                      | 4—10 P                          | —               | —       | Кристаллическая       |
| 3                      | 4,5—5,5 P, 14,5—15,5 Ag         | —               | —       | Мелкодисперсная       |
| B CuP-1                | 5 P                             | 710—924         | 788—927 | Аморфная              |
| B CuP-2                | 7,2 P                           | 710—793         | 732—843 | То же (не менее 50 %) |
| B CuP-3                | 6 P, 5 Ag                       | 643—813         | 712—816 | То же                 |
| B CuP-4                | 7,2 P, 6 Ag                     | 643—718         | 691—788 | »                     |
| B CuP-5                | 5 P, 15 Ag                      | 643—802         | 704—816 | »                     |
| B CuP-6                | 7 P, 2 Ag                       | 643—788         | 732—816 | »                     |
| B CuP-7                | 6,7 P—5 Ag                      | 643—771         | 704—816 | »                     |
| 4                      | 15 P, 10 Ni *                   | 632—677         | —       | »                     |
| 5                      | 18 P, 10 Ni *                   | 632—690         | —       | »                     |
| 6                      | 20 P, 20 Ni *                   | 629—814         | —       | »                     |
| 7                      | 18 P, 30 Ni *                   | —               | —       | »                     |
| 8                      | 8 Si                            | —               | —       | Аморфная              |
| 9 *                    | 9,6 Ni, 9,7 Sn, 7 Si            | 595—635         | —       | »                     |
| 10 *                   | 9,9 Ni, 4 Sn, 7,8 Si            | 610—645         | —       | »                     |
| 11 *                   | 5,7 Ni, 9,7 Sn, 7 Si            | 591—637         | —       | »                     |

\* Атомная доля, %.

*i* — атомная доля элемента 70—87 %; *j* — атомная доля элемента 13—30 %. Все эти материалы ранее изготавливали в виде порошков.

Припой № 8 получен в стеклообразном состоянии при конденсации из паров.

Временное сопротивление разрыву соединений из меди, паяных встык припоем № 5 в виде фольги, толщиной 0,002—0,004 мм в печи (в диссоциированном аммиаке) при температуре 732 °C, составляет 158,5 МПа (временное сопротивление припоя 52,8 МПа). Перед пайкой припой укладывают в сборочный зазор.

Скорость охлаждения припоев при изготовлении должна быть весьма большой. Для припоев системы Ni—Cr—Fe—Si—В скорость охлаждения  $\sim 5,5 \cdot 10^5$  °C/с ( $10^5$ — $10^6$  °C/с).

Припои, не содержащие Si и В, применяют для пайки входных направляющих аппаратов, готовых панелей и колец с готовым уплотнением [31] из стали, легированной кремнием и алюминием. Припои системы Ni—Si по смачиваемости никелевых сплавов превосходят припои системы Ni—P—Cr. Такого типа припои без бора выгоднее для пайки тонкостенных изделий.

Припои на никелевой основе систем Ni—Cr—Fe—Si—Co—В; Ni—Cr—Si—Fe—В; Ni—Si—В; Ni—P; Ni—Cr—Fe—Mo—Co—В; Ni—Cr—В при подаче их в виде струи на быстровращающийся

валок получают в виде фольги толщиной 25—60 мкм (Пат. 4314661 США, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 35 8/30).

Никелевые хрупкие припои в виде пластичной фольги со смешанной структурой, состоящей из смеси метастабильной фазы с аморфной структурой, получаемой при закалке со скоростью охлаждения  $10^5$ — $10^6$  °С/с, могут быть борированы путем нанесения на них амина бора при температуре 70 °С. Атомная доля образующихся в фольге боридов составляет 2—25 %. Бориды Ni, Fe, Co распадаются при температуре пайки и не препятствуют отведению бора в основной металл — литейный никелевый жаропрочный сплав. Обычно нанесение бора не рекомендуют из-за образования весьма стабильных боридов W, Mo, Ta, Al, Ti, Nb, не распадающихся при температуре пайки (Пат. 4160854 США, МКИ<sup>3</sup> кл. 428/607 Г 16 В 5/08).

### Вспомогательные материалы при пайке и их классификация.

К вспомогательным материалам при пайке относятся флюсы, газовые среды для нанесения стоп-материалов покрытий (рис. 4).

Флюсом называют неметаллическое вещество, предназначенное для удаления адсорбированного кислорода или оксидной пленки с поверхности паяемого металла и припоя и для предотвращения ее образования при пайке на воздухе, для изменения поверхностного натяжения жидкого припоя. Реактивные флюсы служат также источниками компонентов легкоплавкого припоя или покрытия при пайке.

Активность флюса, т. е. его способность флюсовать, зависит от его состава и температуры пайки. Поэтому важнейшей характеристикой паяльного флюса является его температурный интервал активности.

По мере нагрева состав флюса может изменяться, так как в нем могут развиваться процессы испарения, разложения и окисления его компонентов, химического взаимодействия их между собой.



Рис. 4. Классификация вспомогательных материалов для пайки:

$M_k$  — паяемый материал;  $M_n$  — припой

На границе с паяемым металлом возможно взаимодействие флюса с оксидной пленкой и паяемым металлом или компонентами паяемого сплава, процессы восстановления тяжелых металлов из компонентов флюса. Интенсивность и полнота протекания таких процессов зависят от температуры и времени.

Активность жидкого флюса и его защитная функция реализуются только при покрытии им поверхности паяемого металла, так как смачивание жидким припоем, растекание и затекание его в капиллярный зазор при пайке происходит только по офлюсованной поверхности. Поэтому равномерное смачивание паяемого металла жидким флюсом является одним из важнейших условий обеспечения высокого качества паяного соединения.

Флюсы классифицируют по следующим признакам: 1) температурному интервалу активности; 2) механизму действия на оксидную пленку; 3) агрегатному состоянию при поставке.

По температурному интервалу активности различают флюсы для низко- и высокотемпературной пайки. Температурный интервал активности у флюсов для низкотемпературной пайки находится не выше  $450^{\circ}\text{C}$ , а для высокотемпературной пайки — выше  $450^{\circ}\text{C}$ .

По характеру воздействия на оксиды различают флюсы электрохимического, химического, растворо-химического и защитного действия. Флюсы защитного действия предохраняют паяемый металл или припой, очищенные перед пайкой, от оксидов, от повторного окисления в процессе хранения.

К флюсам электрохимического действия относятся гигроскопичные хлоридные флюсы для низкотемпературной пайки и хлоридно-фторидные флюсы для высокотемпературной пайки алюминия и его сплавов.

Как показали исследования, боридно-хлоридные флюсы, применяемые для пайки сталей и медных сплавов, относятся к флюсам растворо-химического действия. Вероятно, к этому же классу принадлежат: боратно-хлоридные и боратно-фторидные флюсы, используемые для пайки сталей и никелевых сплавов.

К флюсам для низкотемпературной пайки с выраженным электрохимическим действием относятся неорганические флюсы хлоридного типа, состоящие из слабодиссоциирующего растворителя и активатора. В качестве растворителя для них используют воду, спирты, а в качестве активатора — соляную кислоту и хлориды тяжелых металлов. Другие кислоты, такие, как  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и др., не пригодны для этой цели.

Флюсы, восстанавливающие металл из оксидов по химической реакции, относятся к флюсам химического действия.

К флюсам преимущественно химического действия относятся органические флюсы для низкотемпературной пайки. Однако органические флюсы, активированные хлоридами, также приобретают электрохимическое действие.

Неорганические флюсы могут быть как низкотемпературными,

так и высокотемпературными. Важнейшими характеристиками флюсов являются температурно-временная область их активности и временной интервал сохранения активности при температуре пайки материала конструкции.

Защита пяемого материала и жидкого припоя в месте пайки от непосредственного контакта их с кислородом воздуха, а также восстановление металлов из оксидов возможны также с помощью инертных газовых сред, активных газовых сред и вакуума.

Важнейшей характеристикой инертных газовых сред и вакуума при пайке металла с выбранным припоем является температурный интервал восстановимости в них оксидов, а активных газовых сред — температурный интервал активности.

К вспомогательным материалам для пайки относятся также вещества — стоп-материалы, используемые при подготовке поверхности конструкционного материала и наносимые на паяемый материал в местах, где нежелательно смачивание пяемого металла жидким припоем. Такие вещества подразделяют на стоп-пасты и покрытия, наносимые, например, гальваническим методом, путем распыления или пульверизацией.

#### 4. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЯ

По определению пайки, ее температура  $t_{\text{п}}$  должна быть ниже температуры солидуса пяемого металла  $t_{\text{с м}}$ , но выше температуры солидуса  $t_{\text{с п}}$  или ликвидуса  $t_{\text{л п}}$  припоя.

Температурный режим пайки определяется характеристическими температурами: минимальной температурой  $t_{\text{мин}}$ , максимальной температурой  $t_{\text{мак}}$ , рабочей температурой  $t_{\text{п}}$ , при которой происходит изотермическая выдержка при пайке, а также температурным интервалом, в котором обеспечивается получение качественного паяного соединения  $t_{\text{мак}} - t_{\text{мин}}$ . Рабочая температура пайки обычно находится внутри температурного интервала, ограниченного температурами  $t_{\text{мак}}$  и  $t_{\text{мин}}$ .

К числу важных характеристических температур паяного соединения относится температура его распайки  $t_{\text{рп}}$ . Во всех случаях температура эксплуатации паяного изделия  $t_{\text{э}}$  должна быть ниже температуры распайки  $t_{\text{рп}}$  соединения, а последняя ниже температуры солидуса пяемого металла  $t_{\text{с м}}$ :

$$t_{\text{э}} < t_{\text{рп}} \leq t_{\text{с м}}.$$

Равенство  $t_{\text{рп}} = t_{\text{с м}}$  может быть достигнуто, как правило, только после диффузионной пайки. Если паяемый металл паять припоем, слабо с ним взаимодействующим, то  $t_{\text{рп}} \geq t_{\text{с п}}$ . Если компоненты пяемого металла и припоя образуют диаграммы состояния с непрерывным рядом твердых растворов с повышающейся температурой солидуса, то  $t_{\text{рп}} > t_{\text{с п}}$ . При ограниченных твердых

растворах или образовании непрерывного ряда твердых растворов с минимумом  $t_{\text{pcп}} \leq t_{\text{c п}}$ .

С учетом приведенных соотношений и ввиду того, что  $t_{\text{c п}} < t_{\text{c м}}$  для случая, когда припой при пайке образует с паяемым металлом сплавы с температурой солидуса ниже температуры солидуса припоя, справедливо неравенство

$$t_3 < t_{\text{pcп}} \leq t_{\text{c п}} \leq t_{\text{c м}}.$$

Когда припой и паяемый металл образуют в шве сплав с температурой солидуса выше температуры солидуса припоя, то

$$t_3 < t_{\text{c п}} < t_{\text{pcп}} \leq t_{\text{c м}}.$$

Равенство  $t_{\text{pcп}} = t_{\text{c п}}$  соответствует случаю, когда сплав, образующийся в шве, имеет температуру солидуса ту же, что и припой (при отсутствии взаимодействия между паяемым материалом и припоем *A* и *B* или при образовании между ними эвтектик или перитектик, не отличающихся заметно по температуре плавления от температуры плавления припоя). Поэтому в общем случае температура пайки  $t_{\text{п}}$  может быть и выше и ниже температуры распайки  $t_{\text{п}} \geq t_{\text{pcп}}$ , а  $t_3 < t_{\text{п}}$ .

Следовательно, зависимость между характеристическими температурами паяного соединения, паяемого металла и пайки в общем виде должна быть

$$t_3 < t_{\text{pcп}} \leq t_{\text{c п}} < t_{\text{c м}}.$$

Однако такие ограничения температуры пайки хотя и необходимы, но еще недостаточны. Очевидно, что к последнему условию должны быть добавлены другие условия.

Температурный интервал пайки  $\Delta t_{\text{п}}$  должен находиться в температурном интервале активности флюса  $\Delta t_{\text{ф}}$  при контакте его с паяемым металлом и припоем или в интервале температур, при котором возможно активирование паяемой поверхности в вакууме, инертных или активных газовых средах ( $\Delta t_{\text{в}}$ ,  $\Delta t_{\text{и}}$ ,  $\Delta t_{\text{га}}$ ):

$$\Delta t_{\text{п}} \subset t_{\text{в}}; \Delta t_{\text{п}} \subset \Delta t_{\text{и}}; \Delta t_{\text{п}} \subset t_{\text{га}}; \Delta t_{\text{п}} \subset \Delta t_{\text{ф}}.$$

Качество паяного изделия существенно зависит не только от свойств паяных соединений, но и от того, как изменяются свойства паяемого (основного) материала под действием нагрева при пайке и материала деталей собранного изделия, не подвергаемых непосредственно пайке, но нагреваемых в процессе ее выполнения. Ухудшение свойств конструкционного материала, прежде всего механических и коррозионных, под действием нагрева в процессе пайки связано с его структурными изменениями, происходящими при этом: снятием эффектов наклепа или нагартовки и термической обработки, ростом зерна и изменения состояния сплава по границам зерен, старением или отпуском, пережогом.

При нагреве холоднодеформированного металла до температуры  $0,2t_{\text{пл}}$  идет первая стадия снятия наклепа или нагартовки —

возврат или отдых; при этом вакансии перемещаются к границам зерен с межузельными атомами, что приводит к уменьшению количества дислокаций и снижению микронапряжений в металле и, следовательно, к понижению прочности и повышению пластичности металла.

При нагреве слабдеформированных железа, алюминия и их сплавов до температуры  $\sim 0,3t_{пл}$  наступает вторая стадия возврата — полигонизация; при этом формируется ячеистая структура, являющаяся следствием образования субзерен с угловыми границами, и пластичность металла еще более повышается.

При нагреве слабо холоднодеформированных металлов в интервале температур  $0,3—0,5 t_{пл}$  в местах наибольшей концентрации дислокаций (на границах старых деформированных зерен) зарождаются и растут новые равновесные зерна (первичная рекристаллизация). При достаточной выдержке или при дальнейшем повышении температуры текстурированная структура металла заменяется равноосными зернами рекристаллизованной структуры. Все это приводит к снижению прочности и к дальнейшему повышению пластичности металла.

Величина рекристаллизованного зерна зависит от степени деформации, температуры и времени рекристаллизации зерна исходного размера. Максимальный размер зерна характерен для рекристаллизации металла, подвергнутого деформации с критической степенью 3—15 %. При этом в металле при рекристаллизации образуется ограниченное число зародышей рекристаллизованных зерен.

Дальнейшее повышение степени деформации приводит к росту числа центров рекристаллизованных зерен по степенному, а повышение температуры нагрева — по экспоненциальному закону. При дальнейшем повышении температуры рост зерен вследствие усиления диффузионных процессов резко возрастает.

Температура рекристаллизации сильно деформированных чистых металлов, по правилу А. А. Бочвара, составляет  $0,3—0,4 t_{пл}$ , а у сплавов и сталей она существенно выше ( $0,4—0,5 t_{пл}$ ). Данные о такой температуре для сплавов могут быть определены по их диаграммам рекристаллизации, представляющим зависимость температуры начала и конца этого процесса от степени деформации при заданной длительности нагрева, или по трехмерным диаграммам рекристаллизации, представляющим зависимость средней площади зерна от степени деформации и температуры.

У таких металлов, как молибден и хром, рекристаллизация приводит к снижению их пластичности при нормальной температуре и предела ползучести при повышенных температурах.

Уже после первичной рекристаллизации изменяются также электрическое сопротивление, удельный объем, термоЭДС и другие физические свойства металлов и сплавов, приближаясь к таковым для отожженного состояния.

Собирабельная рекристаллизация характеризуется дальнейшим ростом зерен, возникающих в результате первичной рекристаллизации. При этом происходит аномальный рост крупных зерен, уменьшение общей длины границ зерен, понижение поверхностной энергии металла, образование тройных стыков зерен под углом  $120^\circ$ . Собирабельная рекристаллизация протекает тем интенсивнее, чем выше температура нагрева. Включения дисперсных фаз тормозят первичную и собирабельную рекристаллизацию. При еще более высокой температуре нагрева металлов и сплавов может получить развитие вторичная рекристаллизация, при которой происходит аномальный рост некоторых крупных зерен и образование разнотеренной грубой структуры металла.

Изменение коррозионной стойкости и разупрочнение состаренных или закаленных сплавов при нагреве происходят в результате искусственного ( $> 20^\circ\text{C}$ ) или естественного ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) распада пересыщенных твердых растворов. Такой распад осуществляется прерывисто (локально) или непрерывно (однородно).

Изменение состояния металлов и сплавов по границам зерен может быть следствием перегрева или пережога. При перегреве в металлах и сплавах образуется крупнокристаллическая структура, в результате чего ухудшаются их механические, особенно динамические свойства. К перегреву не склонны наследственно мелкозернистые стали, содержащие 0,03—0,04 % Al или 0,1—0,4 % Ti, но склонны стали с наследственно крупным зерном. Структурные изменения материала при перегреве могут быть устранены последующей нормализацией в сплавах, не испытывающих фазового наклепа.

Пережог сплавов независимо от их исходного состояния наступает вследствие оплавления или окисления границ зерен при нагреве их вблизи температуры солидуса, что существенно снижает их пределы прочности, усталости, пластичность и вязкость.

Пережог в сталях и сплавах протекает в три стадии. На первой стадии происходит обогащение границ зерен легирующими элементами. На второй стадии по границам зерен возникают пустоты без признаков окисления металла. На третьей стадии происходит окисление границ зерен. Исправление структуры конструкционных материалов после пережога возможно только после первой его стадии путем последующей гомогенизации и отжига. Структурные изменения на второй и третьей стадиях пережога — неустраняемый дефект.

Температурный интервал пайки  $\Delta t_{\text{п}}$  должен находиться вне интервалов запрещенных температур для паяемого металла  $\Delta t_{\text{з м}}$  и припоя  $\Delta t_{\text{з п}}$ ;  $\Delta t_{\text{п}} \geq \Delta t_{\text{з м}}$ ;  $\Delta t_{\text{п}} \geq t_{\text{з п}}$ .

К запрещенным относятся и температурные интервалы (при достаточно длительном нагреве или медленном охлаждении), в которых паяемый металл претерпевает структурные или фазовые изменения, недопустимо ухудшающие свойства паяного соединения или изделия в целом (механические, коррозионные и др.).

Кроме того, температурный интервал пайки должен находиться вне температурных интервалов развития диффузионной пористости ( $\Delta t_{\text{пор}}$ ), охрупчивания паяемого металла в контакте с жидким припоем ( $\Delta t_{\text{охр}}$ ) и ниже температуры начала недопустимого развития химической эрозии ( $t_{x \text{ э}}$ ), роста прослоек химических соединений ( $t_{x \text{ с}}$ ):  $\Delta t_{\text{п}} \geq \Delta t_{\text{пор}}$ ;  $\Delta t_{\text{п}} \geq \Delta t_{\text{охр}}$ ;  $\Delta t_{\text{п}} < \Delta t_{x \text{ э}}$ ;  $\Delta t_{\text{п}} < t_{x \text{ с}}$ .

Вследствие того что развитие физико-химических процессов взаимодействия паяемого металла с припоем, флюсом, газовой средой происходит во времени, температурный интервал пайки зависит от длительности контакта конструкционного материала  $M_k$  и припоя  $M_{\text{п}}$ : при малой длительности контакта этот интервал может смещаться в область более высоких температур, а при увеличении времени контакта — в область более низких температур. Следовательно, температурный интервал пайки в известной степени зависит от времени пайки.

Временной режим пайки характеризуется длительностью нагрева до температуры пайки  $\tau_1^{\text{н}}$ , длительностью пайки  $\tau_2^{\text{п}}$ , длительностью охлаждения  $\tau_3^{\text{охл}}$ , длительностью нагрева выше температуры ликвидуса припоя. Общее время пайки

$$\tau_{\text{п}} = \tau_1^{\text{н}} + \tau_2^{\text{п}} + \tau_3^{\text{охл}}.$$

В общем случае продолжительность выдержки  $\tau_2^{\text{п}}$  при температуре пайки  $t_{\text{п}}$  должна быть меньше продолжительности отжига паяемого металла  $\tau_{\text{отж}}^{\text{н}}$ ; недопустимого роста прослойки химических соединений по границе шва  $\tau_{\text{хс}}^{\text{н}}$ ; недопустимого развития химической эрозии  $\tau_{\text{хэ}}^{\text{н}}$  в паяемом металле; недопустимого роста зерна паяемого металла  $\tau_{\text{р д}}^{\text{н}}$ . Следовательно,  $\tau_{\text{п}}^{\text{н}} < \tau_{\text{отж}}^{\text{н}}$ ;  $\tau_{\text{п}}^{\text{н}} < \tau_{\text{хс}}^{\text{н}}$ ,  $\tau_{\text{п}}^{\text{н}} < \tau_{\text{хэ}}^{\text{н}}$ ,  $\tau_{\text{п}}^{\text{н}} < \tau_{\text{р д}}^{\text{н}}$  и т. д. Продолжительность выдержки при температуре диффузионной пайки должна быть достаточной для протекания диффузионных процессов в паяемом металле и паяном шве — для рассасывания хрупких интерметаллидных включений, «залечивания» пор, гомогенизации шва  $\tau_2^{\text{п}} \geq \tau_{\text{диф п}}^{\text{н}}$ .

На качество паяного соединения существенно влияет также скорость нагрева изделия и припоя до рабочей температуры пайки ( $t_{\text{п}}/\tau_{\text{п}}^{\text{н}}$ ). Слишком медленный нагрев паяемого металла может способствовать недопустимому изменению его структуры и свойств. Слишком медленный нагрев припоя может привести к изменению его состава в результате, например, испарения, окисления компонентов или расплавления и вытекания из него легкоплавких составляющих, а следовательно, и к изменению температурного интервала плавления припоя и свойств соединения. При слишком быстром нагреве появляется опасность возникновения недопустимых термических деформаций в паяемых, особенно тонкостенных деталях.

Скорость охлаждения после пайки ( $t_{\text{п}}/\tau_3^{\text{охл}}$ ) может существенно влиять на пластичность и прочность металла паяного шва, особенно при его закалке или при образовании в нем упорядоченных твердых растворов и неравновесном распаде их, а также

при возникновении внутренних растягивающих напряжений и деформаций тонкостенных элементов в паяном изделии. Поэтому

$$t_n/\tau_3^{\text{охл}} \leq v_{\text{кр}}.$$

К температурно-временным характеристикам режима пайки относятся средняя скорость нагрева до рабочей температуры пайки и средняя скорость охлаждения до температуры 20 °С. В некоторых случаях при необходимости обеспечения определенной скорости нагрева или охлаждения на отдельных участках кривой термического цикла пайки может быть указана их средняя скорость.

Режим давления при пайке характеризуется:  $\tau_0^p$  — длительностью до начала приложения давления;  $\tau_1^p$  — длительностью нарастания давления до заданной величины;  $\tau_2^p$  — длительностью приложения максимального давления  $p_{\text{max}}$ ;  $\tau_3^p$  — длительностью снижения давления и, наконец, общим временем приложения давления:  $\tau_n = \tau_1^p + \tau_2^p + \tau_3^p$ . При отсутствии стабильного по времени режима пайки момент приложения давления может быть задан по температуре.

## 5. ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПАЙКИ ИЗДЕЛИЯ

Технологический процесс пайки изделия состоит из ряда операций и переходов, посредством которых в определенном порядке он может быть осуществлен. Определяющей при этом является операция пайки; подготовительные операции процесса обеспечивают проведение этой операции; финишные операции процесса обеспечивают требуемые геометрические, механические и коррозионные характеристики паяных соединений и изделий.

Для обеспечения физического контакта паяемого материала с жидким припоем необходима прежде всего операция подготовки их поверхностных слоев перед пайкой: предварительное удаление жиров, масел, грязи, окалины и толстых неметаллических, в том числе оксидных пленок, образовавшихся в процессе химико-термической обработки, которые не могут быть удалены при пайке с помощью флюсов или активных газовых сред.

Неметаллические пленки можно удалять механически и химически путем травления деталей перед пайкой в специальных растворах. Для химического удаления неметаллических пленок могут быть использованы травление, нейтрализация остатков травителя, сушка.

Составы травильных растворов и режим травления зависят от состава паяемого металла и припоя.

Последовательность технологических операций при подготовке паяемых поверхностей для различных материалов приведена в табл. 2.

Таблица 2. Последовательность выполнения операций при подготовке к пайке конструкционных материалов

| Обрабатываемый металл, сплав  | Последовательность выполнения операций   |
|---|--|
| Чугун   | 1 → 2 → 4 → 5 → 6 → 7 → 10 → 7 → 11 → 7 → 13 → 15  |
| Углеродистые, низко- и среднеуглеродистые, коррозионностойкие стали   | 3 → 15 → 1 → 2 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 6 → 7 → 10 → 7 → 10 → 7 → 12 → 7 → 13 → 6 → 7 → 14 → 7 → 6 → 15 |
| Никелевые сплавы  | 1 → 2 → 3 → 4 → 6 → 7 → 8 → 6 → 7 → 10 → 14 → 7 → 15   |
| Медь и ее сплавы  | 3 → 4 → 6 → 7 → 10 → 7 → 13 → 6 → 7 → 14 → 7 → 15  |
| Бериллиевые бронзы  | 3 → 4 → 6 → 7 → 8 → 6 → 7 → 10 → 7 → 15  |
| Алюминий и его сплавы   | 1 → 2 → 3 → 4 → 6 → 7 → 10 → 6 → 7 → 11 → 7 → 15   |
| Титан и его сплавы  | 1 → 2 → 3 → 4 → 6 → 7 → 8 → 6 → 7 → 10 → 7 → 11 → 7 → 14 → 7 → 15                                    |
| Магниевого сплавы   | 3 → 4 → 6 → 7 → 9 → 6 → 7 → 10 → 7 → 15  |
| Молибденовые сплавы   | 3 → 4 → 6 → 7 → 10 → 7 → 14 → 7 → 15   |
| ПРИМЕЧАНИЕ. 1 – механическая зачистка; 2 – обдувка сжатым воздухом; 3 – обезжиривание органическими растворителями; 4 – химическое обезжиривание; 5 – электрохимическое обезжиривание; 6 – промывка в горячей воде; 7 – промывка в холодной воде; 8 – разрыхление окислов; 9 – удаление старой оксидной пленки; 10 – травление; 11 – снятие травильного шлама; 12 – осветление; 13 – пескоструйное; 14 – нейтрализация; 15 – сушка. |  |

Механическая зачистка паяемой поверхности перед травлением производится лишь при необходимости снятия химически трудноудаляемых оксидных пленок. Такая зачистка обеспечивает требуемую шероховатость поверхности, что улучшает растекание и затекание расплавленного припоя в зазор. Однако при этом трудно дозировать слой удаляемого паяемого материала. Ручная очистка напильниками, шаберами, абразивными инструментами — малопродуктивный процесс и поэтому применяется в основном в единичном производстве. После ручной механической очистки обработанные поверхности обычно обезжиривают путем протирки бязевыми салфетками, смоченными в бензине, ацетоне или спирте.

Более производительна механическая очистка металлическими щетками, которую рекомендуется применять для подготовки поверхностей паяемых деталей из алюминия, магния и сплавов на их основе; жидкостно-абразивная обработка, при которой оксидные пленки и заусенцы удаляются в результате трения поверхностей обрабатываемых деталей с кусками абразива при их перемешивании в специальном барабане. Эти способы широко применяют для очистки мелких деталей со свободным доступом к паяемым поверхностям.

Наиболее эффективен и экономичен метод гидропескоструйной очистки поверхностей, применяемый для удаления окислов, других загрязнений после термообработки,ковки,штамповки, а также в случаях, когда нельзя применить травление или когда возникают трудности в удалении травильного шлама [22].

Металлопескоструйную и дробеструйную обработку осуществляют металлическим порошком из стали или чугуна, а также литой и колотой чугунной и стальной дробью или стальной дробью, рубленной из проволоки. Лучшая очистка достигается металли-

ческим песком, изготовленным из того же материала, что и обрабатываемая деталь.

Очистке металлическим песком и дробью подвергают детали с параметром шероховатости поверхности  $Rz \geq 1,25$  мкм. Этот способ непригоден для гофрированных и тонкостенных (толщина до 0,8 мм) деталей.

Обработанные детали обдувают сжатым воздухом для удаления остатков металлического песка. Метод непригоден для поверхности деталей из алюминия, магния и их сплавов.

Обезжиривание относят к химическим методам очистки и применяют для удаления остатков различных смазок и других жировых загрязнений [22].

Химическому обезжириванию подвергают детали сложной конфигурации, с точными размерами, внутренними полостями и глубокими отверстиями.

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

Для исключения наводороживания материала процесс ведут при переменной полярности — вначале в режиме катодной, затем анодной обработки.

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

Очистку паяемых поверхностей от эмульсий, минеральных масел и консервационных смазочных материалов осуществляют органическими растворителями — трифтортрихлорэтаном, дихлорэтаном, трихлорэтаном, трихлорэтиленом, — хорошо растворяющими жировые загрязнения, легко поддающимися регенерации. Эти растворители не воспламеняются на воздухе, поэтому обезжиривание можно вести при повышенных температурах, что ускоряет и улучшает очистку поверхности; для трифтортрихлорэтана очистка возможна в парообразной фазе. Поскольку указанные растворители ядовиты, обработку ведут на специальном оборудовании.

Обезжиривание возможно также этиловым спиртом, ацетоном, бензином, уайт-спиритом и смесью уайт-спирита и смывки СД (СП) в соотношении 1 : 1.

В зависимости от конфигурации и габаритов обрабатываемого изделия обезжиривание осуществляют одним из следующих способов: струйным, ультразвуковым, дождеванием, заливкой, прокачкой, окунанием, протиркой, в парах растворителя.

Окунание удобно для мелких деталей. Детали, закрепленные в специальных приспособлениях или помещенные в сетчатый контейнер, обезжиривают прополаскиванием в ваннах с моющим средством. При этом должно быть не менее двух ванн: одна — для

предварительного обезжиривания, другая — для окончательного. Детали сложной конфигурации лучше обезжиривать струйным методом в закрытых установках, исключающих выход паров в помещение. Моющее средство подают под давлением через сопловое устройство.

Дождевание — разновидность струйного метода с малым напором моющего средства — применяют для обработки наружных поверхностей деталей. Внутренние полости деталей целесообразно обезжиривать путем заливки. Обезжиривание осуществляют либо путем заливки всего объема внутренней полости моющим средством с последующей выдержкой, либо путем частичного заполнения внутренней полости с последующим вращением, барботажем, кантованием или прополаскиванием.

Методом прокачки моющего средства рекомендуется обезжиривать детали большого объема и с отверстиями. Моющее средство подают под давлением.

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

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

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

Метод химического травления высокопроизводителен и эффективен в условиях массового и крупносерийного производства. Метод непригоден для деталей сложной конфигурации, имеющих острые кромки, щелевые зазоры и замкнутые полости, из которых трудно удалить остатки травильных растворов, а также деталей, имеющих отдельные участки поверхности из неметаллических материалов или с защитными покрытиями. Поверхность детали перед травлением следует очистить от смазочных материалов и жировых загрязнений.

Для замедления растворения металла в кислотах и предотвращения вредного действия выделяющегося водорода в составы травителей вводят различные присадки типа 4М, КС, ЭКП или ингибиторы И-1-А, И-1-6, ПБ-5, уникол, катапин, уротропин.

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

Коррозионную стойкость травленых поверхностей деталей обеспечивают пассивированием. Поверхность коррозионно-стойких сталей, прошедших травление в растворах, содержащих азотную и фтористоводородную кислоты, не пассивируют.

Промывка — промежуточная операция технологического процесса подготовки паяемых поверхностей, проводимая после обезжиривания, травления, снятия травильного шлака, нейтрализации. Сушка — заключительная операция данного процесса. Для промывки применяют воду без специальной бактериологической очистки (техническая вода), а также прозрачную воду без посторонних примесей (артезианская и речная). Вода, предварительно использованная для других целей, для промывки непригодна.

Для промывки особо ответственных деталей применяют обессоленную воду с жесткостью не более 1,8 моль/л.

После завершения всех операций технологического процесса подготовки поверхности перед пайкой детали сушат в сушильных шкафах или чистым сжатым воздухом, нагретым до 50—60 °С. Чистоту сжатого воздуха проверяют не реже одного раза в смену обдувом в течение 20—30 с листа белой фильтровальной бумаги, расположенного на расстоянии 10 мм от выхода струи воздуха. На бумаге после обдува не должны появляться влажные или масляные пятна и грязь.

На растекание и затекание припоя в зазор может существенно влиять шероховатость паяемой поверхности основного материала. Поэтому при подготовке перед операцией пайки необходимо обеспечатить требуемую степень шероховатости участков паяемого металла и оптимальное направление рисков, образующихся при этом. При укладке припоя в зазор шероховатость паяемой поверхности влияет значительно меньше.

Для улучшения растекания припоя, взаимодействия паяемого металла и припоя, повышения механических свойств, коррозионной стойкости паяного соединения, а в некоторых случаях для ограничения растекания припоя по паяемой поверхности и предотвращения нежелательного взаимодействия его с паяемым металлом на последний предварительно наносят технологические или барьерные (защитные) покрытия. Операция нанесения покрытий также входит в подготовку поверхности паяемого металла перед пайкой и может быть выполнена разными способами: термовакuumным, гальваническим, ионным, плакированием и др.

Существенное значение имеет правильное закрепление припоя и соединяемых деталей, внесение флюса, ограничение слишком интенсивного растекания припоя с помощью специальных стоп-материалов. Поэтому в число операций подготовки к пайке может входить и термообработка паяемого металла или изделия с целью уменьшения или устранения растягивающих напряжений неравномерной структуры.

После пайки важнейшими технологическими операциями являются удаление остатков флюсов, зачистка соединения от наплывов припоя, обработка резанием изделия и его термообработка.

Контроль качества паяных соединений определяется характером работы изделия и его служебными свойствами: механическими, герметичностью, вакуум-плотностью, электросопротивле-

нием, коррозионной стойкостью, стойкостью против термоударов, перегрузок и др., характеризующих условия эксплуатации изделия. Лучшим методом контроля качества паяных соединений изделия следует считать испытание последних в эксплуатационных условиях или в условиях, имитирующих их в течение заданного срока наработки.

Неразрушающие методы контроля качества базируются на обнаружении дефектов паяных соединений и оценке степени их опасности для изделия в условиях эксплуатации. Весьма важен визуальный контроль посредством осмотра паяного соединения.

## 6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ ПАЯЕМЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИЗДЕЛИЙ

К конструкционным факторам паяемых соединений, определяющим качество и функциональные свойства изделия, относятся их тип, паяльный зазор, ширина нахлестки, шероховатость паяемой поверхности, радиус галтельного участка, угол скоса.

Для обеспечения эксплуатационных характеристик паяного изделия прежде всего необходимы высокое качество и надежность паяного соединения, которые при неблагоприятных условиях могут стать «слабым звеном» паяной конструкции. При этом важнейшую роль играет правильный выбор типа паяного соединения и совместимость его с технологическим процессом, т. е. со способом пайки, технологическими и вспомогательными материалами и его оснащением.

Тип паяного соединения определяется расположением соединяемых деталей. При расположении деталей внахлестку поверхность спая параллельна их осевой линии (рис. 5).

Пересекающиеся детали могут быть запаяны втавр или в угол. При этом поверхность спая располагается под углом к осевой линии деталей или параллельно одной из них и перпендикулярно к другой.

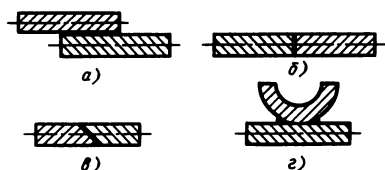
Соприкасающиеся детали паяют вдоль линии касания или в точке соприкосновения. Поверхность спая во всех рассматриваемых типах соединений может быть плоской или криволинейной.

**Соединения внахлестку, встык и вскос деталей, продолжающих одна другую.** Соединение пайкой деталей, продолжающих одна другую, получило особенно широкое применение.

Косостыковое соединение (переходное между соединением встык и соединением внахлестку) применяют главным образом

Рис. 5. Схемы паяных соединений различных типов:

а — внахлестку; б — встык; в — косостыковое, г — соприкасающееся



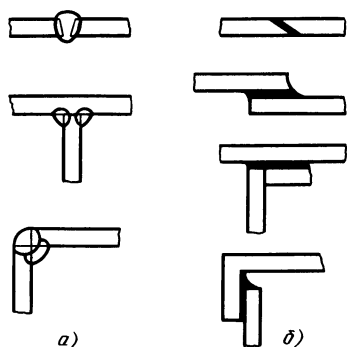


Рис. 6. Конструктивные особенности соединений основных типов при сварке (а) и при пайке (б)

в тех случаях, когда требуется увеличить прочность шва при стыке; оно более прочно, чем стыковое, из-за большой поверхности шва, но технологически сложнее и используется редко.

В изделиях, подвергающихся в процессе изготовления после пайки изгибу и штамповке или работающих при больших статических нагрузках, а также в условиях ударных нагрузок или сильной вибрации, стыковые паяные швы, как правило, не рекомендуются; лучше работает нахлесточное соединение.

При конструировании паяных соединений нельзя копировать элементы сварных соединений (рис. 6). Паяные швы могут быть замкнутыми и незамкнутыми. Из трубчатых соединений с замкнутым швом чаще других применяют телескопические, представляющие собой нахлесточные соединения труб разного диаметра: по внутренней поверхности трубы большего диаметра и по внешней поверхности трубы меньшего диаметра (рис. 7).

Соединения с незамкнутыми паяными швами, у которых основная часть поверхности спая плоская, называют пластинчатыми (рис. 8).

Соединение вскос обычно применяют при пайке труб и листов толщиной более 1 мм, а также при пайке боковых стенок сосудов с вставленными днищами. Длина напуска в зависимости от толщины листа приведена ниже.

|                             |       |     |       |     |        |
|-----------------------------|-------|-----|-------|-----|--------|
| Толщина листа, мм . . . . . | 1—1,5 | 2—3 | 3,5—5 | 5—8 | 8,5—13 |
| Напуск, мм . . . . .        | 10    | 15  | 20    | 25  | 30     |

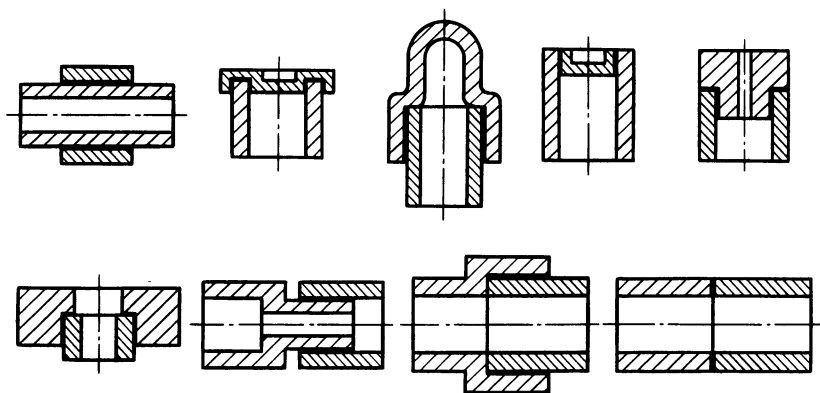


Рис. 7. Конструкции телескопических паяных соединений

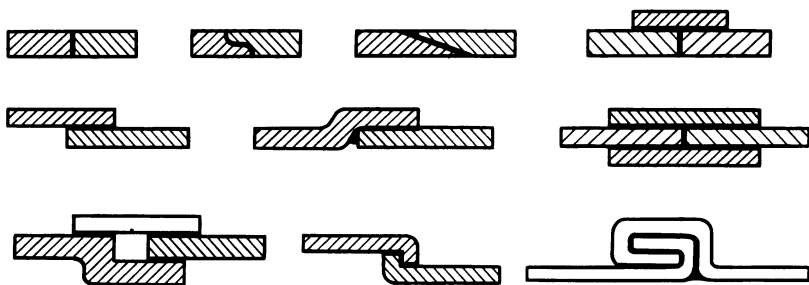


Рис. 8. Конструкции пластинчатых паяных соединений

В практике телескопические паяные соединения получили наиболее широкое применение (соединения из фланцев или втулок с трубами, втулок со стержнем, труб с заглушками, компенсаторов и т. д.).

В трубчатых соединениях следует избегать пайки встык. Рекомендуется пайка внахлестку, позволяющая увеличить прочность соединения, и применять выточки для уменьшения концентрации напряжений в нем, особенно при эксплуатации в условиях воздействия ударных нагрузок (см. рис. 7).

Для предотвращения кольцевого коробления и утяжек при пайке труб с фланцами шайба фланца должна быть большей толщины, чем стенка трубки; при пайке тонкостенных сосудов толщина обечайки должна быть больше толщины доннышек.

**Соединения в угол и втавр пересекающихся деталей.** Соединения в угол и втавр применяют сравнительно редко. Прочность таких соединений в значительной степени зависит от пластичности паяного шва, модуля упругости паяемого металла и формы поверхности шва. При хорошей пластичности паяного шва и относительно малом модуле упругости паяемого металла достаточно плавный галтельный участок паяного шва в таких соединениях обеспечивает благоприятное перераспределение напряжений при изгибе.

Как в пластинчатых и трубчатых соединениях, при пайке втавр и в угол прочность возрастает с увеличением площади спая. Соединения типа 1, 2, 5 и 6 (рис. 9) малопрочны и применяются редко. Соединения типа 1 применяют, например, в ребристых радиаторах

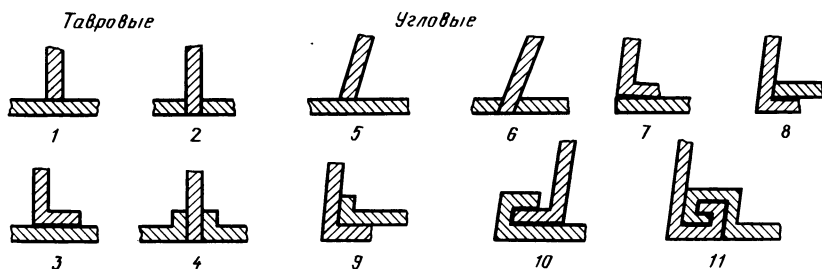


Рис. 9. Типы тавровых и угловых паяных соединений

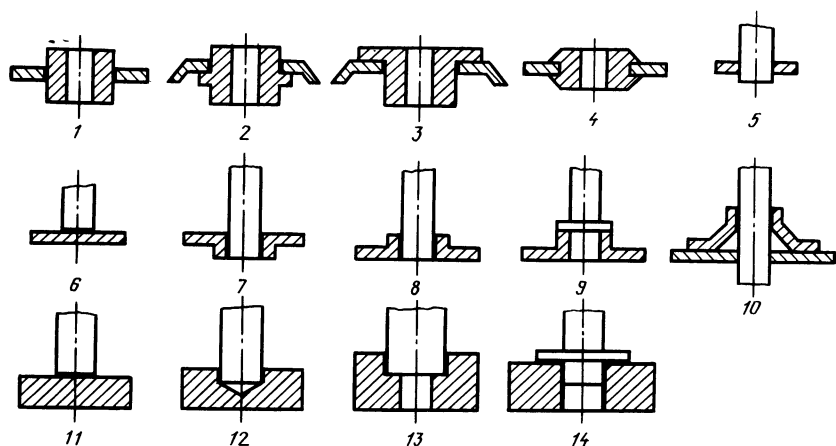


Рис. 10. Примеры правильного и неправильного конструирования паяных соединений

и в сотовых конструкциях. Соединения 3, 4, 7—11 более прочны, так как поверхность шва у них больше.

При пайке пересекающихся труб или прутков с листами или плитами получаемые соединения 1, 5, 6, 11 (рис. 10) малопрочны. Подобные соединения с большой площадью паяного шва 2—4, 7—10, 12—14 более прочны.

**Соединения соприкасающихся деталей.** Если паяемые детали касаются по линии или в точке, зазор в разных местах неодинаков и изменяется от капиллярного до более широкого (рис. 11). Зазор заполняется только в капиллярной части с образованием галтельных участков паяного шва при переходе в некапиллярную часть. Такие соединения допустимы при конструировании изделий, швы которых работают на сжатие или при небольших нагрузках.

К конструкционным факторам паяемых изделий относятся их внешняя форма ( $\Phi$ ), габариты ( $\Gamma$ ), масса ( $M_c$ ), толщина стенки по

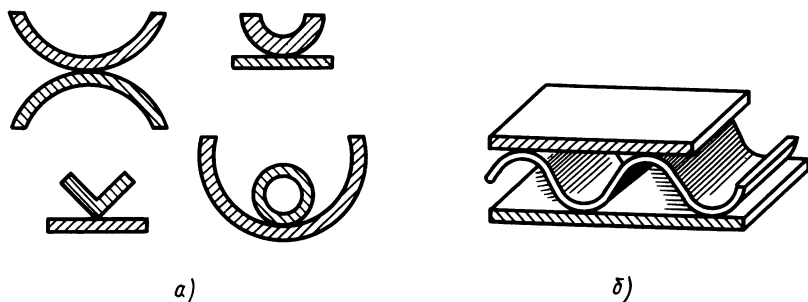


Рис. 11. Типы паяных соединений при касании паяемых деталей:  
а — типичные соединения, б — элемент конструкции из обшивки и гофра

месту пайки, а также геометрия спаев (в точке, по линии, поверхности); замкнутость поверхности или линии спаев, число спаев в изделии; место и плотность их расположения, площадь спаев, ее расположение (на поверхности или внутри изделия), угол наклона зазоров к горизонту при пайке.

## 7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПАЙКИ

Технологическое оснащение пайки включает нагревательное оборудование, инструмент, оснастку и средства механизации, автоматизации и роботизации. Оборудование должно прежде всего обеспечить возможность реализации выбранного термического цикла пайки изделия и быть наиболее экономичным.

Исходной информацией при этом служат технические требования к готовому изделию, план выпуска изделий и сроки их изготовления, технические возможности технологического оснащения.

Современное паяльное производство характеризуется многообразием применяемого нагревательного оборудования, большая часть его заимствована из других видов производства. При этом заимствованное оборудование используется либо непосредственно, либо дорабатывается с учетом конструктивных особенностей паемых изделий, конструкционного материала, технологии изготовления, технологического процесса пайки, характера производства.

К первой группе оборудования с общим нагревом относят электротермические установки (печи и нагревательные ванны), установки со сканирующим электронным лучом, оптическим нагревом и для пайки волной припоя. Во вторую группу оборудования с локальным нагревом входят паяльники, газопламенные горелки, паяльные лампы, плазменные горелки, установки с нагревом электросопротивлением и посты индукционной пайки.

Такое разделение условно, поскольку не всегда можно провести четкое разграничение между указанными группами оборудования. Например, пайку нескольких составных частей малогабаритного изделия можно осуществить путем одновременного нагрева всех соединений с использованием оборудования второй группы. И наоборот, оборудование первой группы можно применять для раздельного нагрева каждого места пайки.

По способу преобразования электрической энергии в тепловую и подвода теплоты к нагреваемому объекту электротермические установки подразделяют на электроустановки сопротивления и индукционные нагревательные установки. В установках электросопротивления теплота выделяется в проводниках при прохождении по ним электрического тока. При этом проводники могут быть твердые и жидкие. К установкам с твердыми проводниками относятся электропечи сопротивления и установки инфракрасного нагрева, а к установкам с жидкими проводниками — электрические ванны.

**Электропечи.** Печи сопротивления — наиболее распространен-

ный вид нагревательного оборудования, применяемого в производстве паяных изделий. Печи сопротивления разделяют по следующим основным признакам [22]:

1) по роду работы и конструктивным признакам — на печи периодического (камерные, шахтные и колпаковые) и непрерывного (конвейерные, толкательные и карусельные) действия;

2) по атмосфере в рабочем пространстве — на печи с окислительной (воздушной) средой, с контролируемыми (защитными или восстановительными) атмосферами и вакуумные;

3) по рабочей температуре — на низкотемпературные (до 450 °С), среднетемпературные (до 1100 °С) и высокотемпературные (до 1600 °С).

В электропечах периодического действия паяемое изделие через загрузочное отверстие (окно) помещают в рабочее пространство, в котором изделие, как правило, неподвижно в течение нагрева и выдержки при температуре пайки. Выгружают изделие из печи через то же отверстие.

Камерные печи просты по конструкции, универсальны и позволяют варьировать параметры температурно-временного режима пайки в широких диапазонах. К недостаткам камерных печей относятся трудность обеспечения равномерного нагрева по всему объему рабочего пространства и создания в печи газовой среды заданного состава при кратковременных режимах пайки, сложность механизации загрузки и выгрузки.

Печи с конвективной теплоотдачей снабжены вентиляторами, создающими принудительную циркуляцию газового теплоносителя в рабочем пространстве.

Печи, рассчитанные на работу с контролируемыми атмосферами и в вакууме, полностью герметизированы.

В электропечах непрерывного действия паяемые изделия с помощью транспортирующего устройства передвигаются от загрузочного окна к разгрузочному, нагреваясь до заданной температуры. Печи непрерывного действия имеют большую производительность и их сравнительно просто компоновать в поточные и автоматические линии.

Печи, как правило, имеют несколько тепловых зон с самостоятельным регулированием температуры, что позволяет с достаточной точностью выдерживать различные графики нагрева изделия. Обычно протяженность тепловой зоны составляет 1,5—2 м, но при необходимости получения точной температуры на небольшом участке размеры зон уменьшают до 1 м. Температура в зонах колеблется в пределах 10—15 °С. В случае необходимости печи комплектуют камерами охлаждения. В зависимости от скорости охлаждения камеры охлаждения конструктивно могут быть выполнены с водоохлаждаемыми стенками, с водоохлаждаемыми стенками и вентиляторами, с обрызгиванием изделия (допустимо при работе в воздушной атмосфере), с футерованными стенками (без нагревателей или с ними).

Печи непрерывного действия рассчитаны на работу в окислительной (воздушной) и контролируемых атмосферах. В последнем случае камеры нагрева и охлаждения выполнены герметичными, для чего они снабжены загрузочными и разгрузочными шлюзовыми камерами.

По типу транспортирующего устройства электропечи непрерывного действия подразделяют на конвейерные и карусельные.

Конвейерные печи применяют для пайки мелких и средних изделий массового и крупносерийного производства. По плоскости перемещения изделий печи бывают горизонтальные и вертикальные. Вертикальные печи занимают меньшую площадь, однако не нашли широкого применения вследствие неравномерности распределения температуры по высоте печи, необходимости устройств для крепления изделий и сложности обслуживания, хотя они и удобны для пайки однотипных изделий.

Преимущество карусельных печей заключается в возможности использования их при высоких температурах, так как несущая часть подины может быть выполнена керамической, а рабочая камера печи не имеет металлических деталей, ограничивающих температуру нагрева.

В карусельных печах можно нагревать изделия сложной конфигурации без поддонов, что не всегда возможно в конвейерных печах. Недостатки карусельных печей заключаются в трудности механизации и неудобстве использования их в поточных линиях из-за того, что загрузочные окна расположены рядом.

Для пайки в контролируемых атмосферах используют печи, оконные проемы которых снабжены пламенной завесой.

Вакуумные электропечи подразделяют на садочные и методические.

Садочные печи, как правило, предназначены для единичного или серийного производства. В таких печах изделие в течение всего цикла остается неподвижным, а его загрузку и выгрузку осуществляют через одно окно.

Методические печи предназначены для массового производства; в них паяемое изделие в процессе пайки перемещается непрерывно или дискретно от загрузочного окна к разгрузочному. Существует также группа печей полунепрерывного действия, представляющих собой соединения нескольких камер, через которые последовательно проходит паяемое изделие. К подобному соединению относятся, например, сочетания камер загрузки, предварительного нагрева, рабочей и охлаждения. В этих печах, как и в методических, загрузку и выгрузку осуществляют через вакуумные шлюзы, но перемещение изделия здесь всегда дискретно.

По рабочей температуре вакуумные печи разделяют на среднетемпературные (1100—1200 °С) и высокотемпературные (> 1200 °С), а по остаточному давлению в рабочей камере — на низковакуумные (до 13,3 Па), средневакуумные (13,3—1,33 ×

$\times 10^{-1}$  Па), высоковакуумные ( $1,33 \cdot 10^{-2} - 1,33 \cdot 10^{-4}$  Па) и сверхвысоковакуумные (ниже  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па). За основной параметр садочных печей приняты размеры рабочего пространства, а методических — размеры прохода вакуумных технологических затворов шлюзовых камер.

Главное требование, предъявляемое к футеровке вакуумных печей, — хорошая способность к дегазации. Поэтому в этих печах широко применяют экранную теплоизоляцию; в случае использования огнеупорных и теплоизоляционных материалов число экранов сводят до минимума. В печах с рабочим давлением до  $1,33 \cdot 10^{-1}$  Па допустимо применение керамической футеровки, а с давлением  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па и ниже используют металлическую экранную изоляцию.

Для обеспечения длительной и надежной работы нагревателей из тугоплавких металлов необходимо, чтобы при нагреве давление в печи постоянно поддерживалось не выше  $1,33 \cdot 10^{-1} - 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па, а величина натекания была минимальной.

В паяльном производстве среди садочных печей наибольшее распространение получили камерные, шахтные и колпаковые печи.

При пайке в обычных муфельных печах изделие помещают в металлический контейнер, внутри которого создают вакуум. К контейнеру подсоединяют откачную систему. Поскольку в контейнере, кроме паемого изделия, нет других предметов, требующих обезвоживания, он может быть откачан быстро и до высокого вакуума. Однако муфельные печи работают при сравнительно низких температурах ( $800 - 1100$  °С); прочность разогретого муфеля невелика. Кроме того, при высоких температурах увеличивается диффузия воздуха через сварные швы и стенки муфеля.

**Электронагревательные ванны.** Для нагрева изделий под пайку путем теплопередачи от нагретых жидкостей — масла, расплавленных солей и щелочей применяют электронагревательные ванны. В паяльном производстве наибольшее распространение получили соляные ванны цилиндрической или прямоугольной формы с внешним или внутренним обогревом. Внутренний обогрев осуществляется электродными или трубчатыми электронагревателями (ТЭН). По рабочей температуре соляные ванны подразделяют на ванны с температурой до 650, 850, 1300 °С.

Электронагревательные ванны обладают следующими преимуществами перед печами сопротивления: 1) высокой равномерностью нагрева изделий вследствие значительно большей теплопроводности жидкости по сравнению с теплопроводностью газов; 2) высокой скоростью нагрева изделия благодаря высоким значениям коэффициента теплоотдачи от жидкости к металлу; 3) большой производительностью; 4) защитой изделий от окисления; изделия в процессе нагрева и выдержки изолированы от воздушной среды и при извлечении из ванны покрыты тонким слоем соли или флюса.

К недостаткам нагрева в электронагревательных ваннах следует отнести: 1) большой удельный расход электроэнергии из-за повышенных тепловых потерь зеркалом ванны; 2) необходимость непрерывной эксплуатации из-за сложности и длительности разогрева до рабочего состояния; 3) тяжелые и вредные условия труда; 4) необходимость очистки изделий от соли или флюса; 5) большой расход соли или флюса и необходимость предварительной сушки их перед загрузкой.

Ванны с внутренним обогревом по сравнению с ваннами с внешним обогревом меньше по габаритам, имеют меньшие тепловые потери и меньший удельный расход электроэнергии. Кроме того, для селитровых ванн внутренний обогрев более безопасен, так как при этом менее вероятен перегрев дна ванны из-за загрязнения нижних слоев селитры. Недостаток такого обогрева состоит в малом сроке службы нагревательных элементов вследствие эрозии трубчатого кожуха нагревателя при высоких температурах. Более экономичен электродный нагрев, так как при этом имеется возможность передвигать электроды по мере сгорания, что увеличивает срок их службы. Одновременно конструкция таких электродов обеспечивает электромагнитную циркуляцию соли в ванне. Соляные ванны питаются через понижающий трансформатор.

**Индукционные нагревательные установки.** Такие установки могут быть разделены на четыре группы.

1. По частоте питающего тока различают установки промышленной частоты, питающиеся от сети 50 Гц непосредственно или через специальные понижающие трансформаторы; установки повышенной частоты (500—10 000 Гц), питающиеся от электромашиных преобразователей частоты.

2. По принципу действия установки могут быть методические и садочные. В методических установках изделие нагревается по мере его продвижения через индуктор. Электрические параметры этих установок в процессе работы не изменяются. В методических установках при неизменном темпе движения обеспечивается воспроизводимость режима пайки всех изделий, последовательно проходящих через индуктор. В садочных установках все участки изделия, помещенного в индуктор, нагреваются до заданной температуры одновременно. Электрические параметры этих установок в процессе нагрева изделия могут меняться в зависимости от изменения физических характеристик изделия при повышении их температуры.

Для серийного и массового производства однотипных изделий, подвергаемых пайке, целесообразно применять печи методического действия, которые по сравнению с садочными имеют более высокую производительность, более полную загрузку источника питания во времени (высокий коэффициент использования мощности) и большую стабильность режима.

Для мелкосерийного и опытного производства, где часто приходится перестраивать нагреватель на другое изделие, что зани-

мает значительное время, применяют сравнительно простые са-  
лочные установки, обеспечивающие возможность регулирования  
режима пайки в широком диапазоне.

3. По характеру атмосферы в рабочем пространстве различа-  
ют установки с окислительной (воздушной) средой, активной га-  
зовой средой и вакуумные. Основным элементом индукционных  
нагревательных установок служит индуктор, представляющий  
собой катушку (соленоид), изготовленную из медной водоохлаж-  
денной трубки.

4. По типу индуктора различают установки с цилиндрически-  
ми, прямоугольными и щелевыми индукторами.

Индукционные установки состоят из камеры нагрева с индук-  
тором, конденсаторной батареи, механизма загрузки изделия, шка-  
фов коммутации и управления. В установках методического  
действия все операции по загрузке изделий, их перемещению че-  
рез индуктор и выгрузке полностью автоматизированы. Установки  
питаются от индивидуальных генераторов повышенной частоты  
или централизованной сети частотой 50, 1000, 2500 и 8000 Гц.

Для пайки малогабаритных изделий используют специальные  
автоматические или полуавтоматические установки, в которых  
паяемое изделие помещают под кварцевый колпак, внутри кото-  
рого создается необходимый вакуум или подается контролируе-  
мая атмосфера. Нагревательный индуктор располагают снаружи  
колпака.

Для пайки в вакууме широко применяют вакуумные индук-  
ционные установки (печи), обладающие рядом преимуществ по  
сравнению с электропечами, главное из которых — обеспечение  
высоких температур без применения сложных и дорогих нагре-  
вательных элементов. Конструктивно индукционные печи подраз-  
деляются на шахтные и камерные и представляют собой герме-  
тичный сварной кожух, внутри которого находится индуктор. Не-  
достаток данных установок состоит в том, что наличие воздуха  
увеличивает электрические потери; токи в кожухе создают маг-  
нитный поток, ослабляющий поток индуктора.

**Горелки.** При ручной пайке высокотемпературными припоями  
изделия нагревают газовыми горелками. В качестве горючих газов  
в них используют ацетилен, пропан-бутановую смесь, метан (при-  
родный газ), коксовый и «городской» газ, а также пары бензина  
и керосина.

Окислителем для горючих газов служат кислород и воздух.

Конструктивно горелка представляет собой ручку с двумя за-  
порно-регулирующими вентилями и наконечник. Горючий газ и  
окислитель подаются отдельно по шлангам. Наконечник —  
сменный узел — состоит из смесительной камеры и сопла (мунд-  
штука). По способу подачи горючего газа горелки подразделяют  
на инжекторные (низкого давления 1—4 кПа) и безынжекторные  
(высокого давления 40—100 кПа). Мощность пламени (предел  
устойчивого горения) определяется объемом смесительной каме-

ры и диаметром сопла и регулируется изменением давления кислорода (в инжекторных горелках) или обоих газов (в безынжекторных горелках). Наличие сменных наконечников позволяет использовать одну горелку для пайки металлов различных толщин и теплофизических свойств.

**Паяльник.** Это нагревательное устройство, используемое при низкотемпературной пайке. Рабочим элементом паяльника служит наконечник ( жало ).

По способу нагрева наконечника различают паяльники непрерывного и периодического действия: Непрерывный нагрев наконечника осуществляют газовым, бензиновым, керосиновым пламенем, а также электрическим током. В электропаяльниках нагревательный элемент располагается с внешней стороны наконечника или внутри него. В условиях серийного и массового производства электропаяльники снабжены устройствами, обеспечивающими механическую, полуавтоматическую и автоматическую подачу припоя.

В паяльниках периодического действия наконечник нагревают внешним источником теплоты или встроенным в паяльник источником, работающим в импульсном режиме.

При низкотемпературной пайке металлов со стойкой оксидной пленкой применяют специальные паяльники — ультразвуковые и абразивные, а также с вибрирующей щеткой. К высокотемпературным паяльникам, обеспечивающим разогрев наконечника до 900 °С, относятся паяльники с плазменным нагревом. Технические данные паяльников приведены в работе [58].

## **8. КАЧЕСТВО ПАЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

Качество паяных изделий — это совокупность их свойств, обуславливающих успешное изготовление, эксплуатацию и ремонт изделий в соответствии с их назначением и заданным ресурсом. Качество изделия обуславливается технологичностью его конструкции, влияющей на трудоемкость изготовления, эффективность эксплуатации, в том числе надежность, безотказность, долговечность.

Технологичность конструкции изделия обуславливает оптимальность затрат труда, материалов и времени при подготовке его производства, обеспечении установленных требований к изделию в принятых условиях изготовления (производственная технологичность), при эксплуатации (эксплуатационная технологичность) и при ремонте (ремонтная технологичность). Технологичность конструкции изделия определяется с учетом не только его эксплуатационных характеристик, но и степени соответствия конструкторских решений техническим, организационным и экономическим условиям предприятия.

К технологическим свойствам паяемых изделий относятся

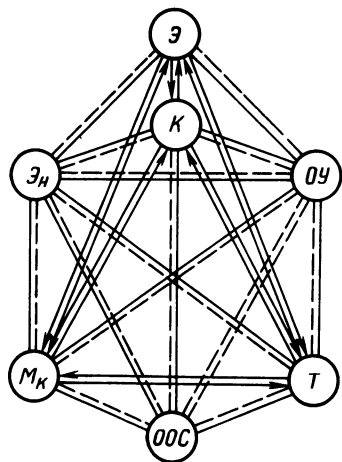


Рис. 12. Схема взаимосвязи элементов производственной системы ( $K$ ,  $M_k$ ,  $T$ ) между собой, с эксплуатационными характеристиками изделия ( $\mathcal{E}$ ), экономикой ( $\mathcal{E}_n$ ), организацией и управлением производством ( $OY$ ) и охраной окружающей среды ( $OOC$ )

конструкционный материал изделия  $M_k$  и оснащенная технология  $T$  (рис. 12) [32, 58].

Первый элемент производственной системы пайки — конструкция изделия  $K$  — характеризуется двумя группами факторов: 1) для паяного соединения — его типом, паяльным зазором и его величиной и равномерностью, пространственным положением, площадью спая (или величиной нахлестки), шероховатостью паяемой поверхности и ее рельефом, углом скоса, наличием и толщиной покрытий, расположением припоя при сборке, фиксацией зазоров; 2) для паяного изделия — его масштабными факторами, к которым относятся толщина стенки деталей изделия, его габарит, размеры, протяженность паяных швов; типом конструкции, массой изделия, точностью изготовления деталей и др.

Второй элемент производственной системы пайки — конструкционный материал изделия  $M_k$  — характеризуется важнейшими для пайки факторами — температурой солидуса, химическим и фазовым составом, свойствами, в том числе температурными коэффициентами линейного расширения и электропроводности, теплопроводности, температурно-временным интервалом допустимого нагрева, коррозионной стойкостью, коэффициентом надреза и другими.

Третий элемент производственной системы — оснащенная технология пайки, которая характеризуется технологическими и техническими факторами. К технологическим факторам относят

прежде всего паяемость материала изделия, т. е. относительная характеристика, оценивающая возможность при выбранных способах пайки, технологических и вспомогательных материалах и оснащении образовывать паяные соединения, способные сопротивляться воздействию силового и температурного полей и внешней среды. При плохой паяемости материала и плохой технологичности конструкции изделия в процессе производства и при ремонте в паяных соединениях возникают дефекты, размеры и расположение которых обуславливают несоответствие изделия требованиям, установленным нормативной технической документацией, и исключают пользование изделия по назначению.

Элементами производственной системы пайки, определяющими качество паяемых изделий, являются конструкция изделия  $K$ , кон-

ся: способы пайки, технологические и вспомогательные материалы, термический режим пайки (ТРП), термический цикл пайки (ТЦП), цикл давления при пайке (ЦД), способы подготовки паяемого материала и припоя перед пайкой и обработка соединений после пайки; к техническим факторам — оснащение технологии.

К техническим факторам, характеризующим оснащенность технологии и технологического процесса, относятся: оборудование, оснастка, инструмент, средства механизации, автоматизации и роботизации.

Эффективность производства качественных изделий зависит от экономических факторов ( $\mathcal{E}_n$ ): стоимости материалов и их дефицитности, стоимости оснащения, энергоемкости процесса, трудоемкости технологии и себестоимости изделия; организационно-управленческих факторов производства (ОУ) и экологических факторов — влияния технологии на окружающую среду и средства охраны окружающей среды (ООС).

Все три элемента производственной системы  $K$ ,  $M_k$ ,  $T$ , а также элементы надстройки —  $\mathcal{E}_n$ , ОУ, ООС связаны между собой прямыми и обратными связями.

Необходимыми и достаточными условиями обеспечения высокого качества изделий по критерию качества  $K_k$  является единство (взаимосвязь) и совместимость важнейших элементов производственной системы: конструкции  $K$ , конструкционного материала изделия  $M_k$  и оснащенной технологии  $T$  между собой и с эксплуатационными характеристиками изделия  $\mathcal{E}$ .

На уровне подготовки производства качество паяных изделий обеспечивается при проектировании технологии пайки и разработке технологического процесса пайки, отработке технологичности конструкции паяных соединений и изделий в соответствии с критерием качества.

На уровне производства к критерию качества добавляются требования о необходимости обеспечения высокого качества поставляемого материала и полуфабрикатов для конструкции, выполнения требуемых условий их хранения и хранения готовой продукции; выполнения технологической дисциплины на всех этапах производства.

На уровне ремонта к критерию качества добавляются требования о допустимой степени износа изделий.

Необходимыми и достаточными условиями обеспечения эффективности производства изделий высокого качества является единство (взаимосвязь) и совместимость важнейших элементов производственной системы  $K$ ,  $M_k$ ,  $T$ ,  $\mathcal{E}$  с экономикой  $\mathcal{E}_n$ , охраной окружающей среды ООС и организацией и управлением производства ОУ.

## Глава 2

# СПОСОБЫ ПАЙКИ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ПАЯНОГО ШВА

### 1. ПАЙКА ГОТОВЫМ ПРИПОЕМ

**Стадии образования паяного соединения.** Прилипание веществ без их обмена элементарными частицами и электронами по месту их физического контакта, т. е. без их взаимной диффузии, называется адгезией.

При химическом взаимодействии контактирующих веществ могут участвовать различные виды связей: 1) без обмена атомами (ионами); 2) с обменом электронами (химическая адгезия); 3) с обменом атомами (ионами) и электронами, приводящими к сцеплению веществ — когезии.

Адгезию между твердым и жидким или твердым и газообразным веществом называют также адсорбцией.

Критерием, отличающим физическую  $g_p$  и химическую  $g_c$  адсорбцию, является теплота адсорбции: при физической адсорбции теплота  $g_p < 8,36$  Дж, при химической  $g_c > g_p$ . Для перехода от физической адсорбции к химической требуется период активации. Обмен между веществами, атомами (ионами) и электронами происходит с затратой энергии активации, соизмеримой с энергией активации химической адсорбции, и возможен только между веществами с взаимной растворимостью. При этом между веществами наступает сцепление и исчезает поверхность раздела, а следовательно, поверхностное натяжение между ними.

Если работа адгезии определяется поверхностной энергией на границе раздела веществ, то работа их сцепления равна работе, затрачиваемой на исчезновение их поверхностей контакта. При расчленении сцепленных веществ работа когезии равна работе, затрачиваемой на образование двух новых поверхностей

$$A_K = 2\sigma_{1,2}S_0; W_K = A_K/S_0 = 2\sigma_{1,2},$$

где  $S_0$  — площадь поверхности после расчленения веществ;  $\sigma_{1,2}$  — поверхностное натяжение на образовавшихся поверхностях.

Соединения между твердыми и жидкими веществами, не имеющими общей области однородности после затвердевания жидкого вещества, относятся к адгезионному типу. Закономерно отнести соединения твердых веществ, между которыми после затвердевания жидкого вещества образовался слой новых веществ (твердых растворов или химических соединений) в результате обмена атомами и электронами, к когезионному типу, так как работа образования такого слоя не может быть определена только поверхностным натяжением между контактирующими веществами.

В соответствии с характером взаимодействия веществ смачивание твердого вещества другим, жидким, может быть трех типов: 1) физическим или обратимым; 2) хемосорбционным; 3) физико-химическим, при котором имеют место взаимное растворение или химическая реакция между контактирующими веществами.

Таким образом, при пайке создание соединения может происходить в две или три стадии, в зависимости от того, какие связи и какие элементарные частицы вовлекаются при этом в действие. Паяные соединения, получаемые в результате диффузионных процессов между припоем и паяемым материалом, — когезионные; соединения, возникающие в результате хемосорбции, — адгезионные. Сварка плавлением и сварка в твердой фазе также являются процессами создания соединений, преимущественно когезионного типа. Когезионные соединения более прочны, чем

адгезионные. Соединения без обмена электронами и атомами получают в процессе склеивания.

**Поверхностные и межфазные явления при пайке.** Смачивание жидким припоем соединяемых материалов, т. е. введение их в физический контакт, является непрерывным условием успешной пайки.

Под смачиванием в физическом смысле понимают характер контактного взаимодействия жидкого вещества с твердым, при котором прочность связи их частиц больше, чем между элементарными частицами в жидкости. В соответствии с ранее введенными понятиями адгезионной (адсорбционной и хемосорбционной) и когезионной связей будем различать адгезионную и когезионную (с физико-химическим воздействием между твердым и жидким веществом) смачиваемости. Адсорбционная смачиваемость зависит только от свободных межфазных энергий адсорбционного типа.

Возможность смачивания металла жидким припоем при образовании адгезионной связи между ними в равновесных условиях определяется соотношением межфазных поверхностных натяжений: между твердой и жидкой фазами ( $\sigma_{тж}$ ), жидкой и газообразной фазами ( $\sigma_{жг}$ ), твердыми фазами ( $\sigma_{тг}$ ).

Поверхностное натяжение измеряется поверхностной силой, отнесенной к одному сантиметру периметра граничной поверхности.

К основным спонтанным самопроизвольным процессам при пайке, связанным с поверхностными явлениями на границе твердого металла с жидким припоем, относятся кроме смачивания также растекание; затекание жидкой фазы в капиллярный зазор; межзеренное проникновение припоя в паяемый материал; различные виды контактного плавления: контактно-реактивного (к-р), контактного твердогазового (к-т-г) и контактного твердожидкого (к-т-ж); хрупкое разрушение паяемых материалов при смачивании их жидкими припоями при наличии поля напряжений и др.

Обычно смачивание как специфическое взаимодействие между жидким и твердыми телами оценивают по величине контактного (неравновесного) или краевого (равновесного) угла  $v$ . Часто контактное взаимодействие жидкого вещества с твердым, в результате которого  $v \leq 90^\circ$ , называют смачиванием, а при  $180 \geq v > 90^\circ$  — несмачиванием.

Следует различать смачивание при растекании жидкой фазы по твердой и при затекании жидкой фазы в капиллярный зазор. Растекание в результате смачивания происходит при  $v < 180^\circ$ , а затекание в капиллярный зазор — при  $v < 90^\circ$ .

Работа адгезии или энергия связи между жидким и твердым веществом определяется в виде разности поверхностных натяжений твердой и жидкой фаз в контакте с газом ( $\sigma_{тг}$  и  $\sigma_{жг}$ ), до контакта между твердой и жидкой фазами и после их контакта (соотношение Дюпре, 1869 г.):

$$W_A = \sigma_{жг} + \sigma_{тг} - \sigma_{тж}. \quad (1)$$

С учетом условия равновесия жидкой фазы на поверхности твердой (рис. 13).

$$\sigma_{тж} = \sigma_{тг} - \sigma_{жг} \cos \theta, \quad (2)$$

работа адгезии будет

$$W_A = \sigma_{жг} (1 + \cos \theta).$$

Неравновесное смачивание имеет место при самопроизвольном уменьшении контактного угла капли, вследствие уменьшения свободной энергии. Неравновесное смачивание отвечает растеканию жидкой фазы по твердой при увеличении со временем их поверхности соприкосновения.

Термодинамическое условие растекания в общем виде следующее:

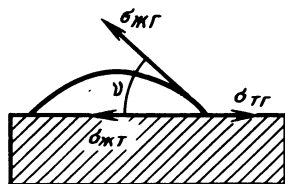


Рис. 13. Условия равновесия жидкой капли на поверхности твердого тела

$$\Delta F = \sigma_{жг} \Delta W_{жг} + \sigma_{тж} \Delta W_{тж} - \sigma_{тг} \Delta W_{тг} < 0, \quad (3)$$

где  $\Delta W$  — удельная свободная энергия.

При этом предполагается, что поверхностные натяжения не зависят от кривизны межфазной поверхности.

В случае растекания капли  $\Delta W_{тг} = -\Delta W_{тж}$  и  $\Delta W_{жг} = \Delta W_{тж}$  при  $\theta = 0$  условие (3) имеет вид

$$\sigma_{тг} - \sigma_{тж} - \sigma_{жг} \cos \theta < 0. \quad (4)$$

Так как  $\cos v \leq 1$ , то неравенство (4) усиливается при подстановке  $\cos v < 1$ . Тогда термодинамическое условие растекания может быть написано в виде

$$\sigma_{тг} > \sigma_{тж} + \sigma_{жг}. \quad (5)$$

Из соотношения  $\Delta W_{жг} = \Delta W_{тж} \cos v$  следует, что при растекании капли с краевым углом  $v = 180^\circ$  (состояние несмачиваемости) и переходе к состоянию, характеризующему краевым углом  $v = 90^\circ$ , свободная поверхность капли в контакте с газовой средой уменьшается ( $\sigma_{жг} < 0$ ), жидкая пленка при этом сокращается. При переходе через  $v = 90^\circ$  изменение  $\Delta W_{жг}$  равно нулю. При  $v < 90^\circ$  растекание сопровождается увеличением поверхности жидкости в контакте с газом ( $\Delta W_{жг} > 0$ ), жидкая поверхностная пленка как бы растягивается. Следовательно, краевой угол  $v = 90^\circ$  при смачивании поверхности твердого тела жидкой каплей разделяет два процесса, отличающихся по своему механизму, что дает некоторое основание для использования термина «хорошее смачивание» или смачиваемость при  $v \leq 90^\circ$  и термина «плохое смачивание» или несмачивание при  $v > 90^\circ$ .

Условие, обратное условию (5) растекания (неравновесному смачиванию),

$$\sigma_{тг} \leq \sigma_{тж} + \sigma_{жг} \quad (6)$$

отвечает, очевидно, дисмачиванию (свертыванию).

Условие растекания (5) можно представить в виде

$$\sigma_{тг} + \sigma_{жг} - \sigma_{тж} - 2\sigma_{жг} > 0$$

или

$$W_A - W_K = f > 0. \quad (7)$$

Величина  $f$  называется коэффициентом растекания и отвечает разности работы адгезии твердого тела и разрыва жидкости без изменения ее формы.

Харкинс, введший понятие (1921 г.) о коэффициенте растекания, и другие исследователи показали, что растекание одной жидкости по другой и по твердому телу имеет место при удовлетворении условия (7). Таким образом, условие смачивания  $W_A > 0$  является необходимым, но недостаточным условием растекания ( $W_A - W_K > 0$ ).

Из условия растекания (5) вытекают два возможных условия (если  $\sigma_{тж} = \sigma_{жг}$ ):  
1)  $\sigma_{тг} > \sigma_{тж} > \sigma_{жг}$ ; 2)  $\sigma_{тг} > \sigma_{жг} > \sigma_{тж}$ .

Условие плохого смачивания или дисмачивания (6) можно записать также в виде  $W_K - W_A > 0$ . Оно еще более усиливается, если  $\sigma_{тг} < \sigma_{жг}$  или  $\sigma_{тг} < \sigma_{тж}$ .

В настоящее время нет физической теории поверхностного натяжения металлов, позволяющей определить и пользоваться полученными с ее помощью величинами. Пока экспериментально определены отдельные значения поверхностного натяжения на границе жидкость — вакуум  $\sigma_{жв}$  при температурах плавления некоторых металлов [12]. Эти значения слабо изменяются с повышением температуры и находятся в интервале  $(1-25) \cdot 10^{-5}$  Дж. После затвердевания металлов и сплавов их поверхностное натяжение увеличивается ( $\sigma_{тг} > \sigma_{жг}$ ).

Дж. В. Тейлором на основании некоторых теоретических соображений и опытных данных оценены зависимости между поверхностными натяжениями  $\sigma_{тг}$  и  $\sigma_{жг}$  в виде  $\sigma_{тг} = 1,33\sigma_{жг}$ , а между  $\sigma_{тг}$  и  $\sigma_{тж}$  в виде  $\sigma_{тг} = 0,33\sigma_{тж}$ .

По Д. Холомену и Д. Тарнбаллу, межфазное поверхностное натяжение металла в контакте с собственным расплавом при температуре плавления  $\sigma_{тж} \sim 0,1\sigma_{тв}$  (где  $\sigma_{тв}$  — натяжение на границе твердый металл — вакуум), т. е. может быть значительно меньше, чем в контакте твердой и жидкой фаз различного состава.

Поверхностные натяжения некоторых твердых металлов в вакууме и в контакте с собственной жидкой фазой приведены ниже.

|                                      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Металл . . . . .                     | Hg   | Ga   | Sn   | Pb   | Al   | Ag   | Cu    | Ni    | Fe    |
| $\sigma_{\text{тж}}$ , МДж . . . . . | 281  | 560  | 590  | 330  | 1300 | 2270 | 2360  | 3190  | 2950  |
| $\sigma_{\text{тв}}$ , МДж . . . . . | 4780 | 7350 | 5540 | 4800 | 9400 | 9300 | 13510 | 18100 | 18410 |

Поверхностные натяжения  $\sigma_{\text{тв}}$  и  $\sigma_{\text{жв}}$  сильно зависят от содержания в твердой и жидкой фазах примесей.

Установлено закономерное изменение  $\sigma_{\text{жг}}$  в зависимости от положения элементов в периодической системе. Наибольшие поверхностные натяжения  $\sigma_{\text{жг}}$  отвечают переходным металлам 6—8-й групп.

Адсорбционная смачиваемость увеличивается с повышением температуры. В равновесных условиях это связано с уменьшением работы адгезии и удельной свободной поверхностной энергии при повышении температуры.

Вследствие однозначности этой зависимости адгезионная смачиваемость обратима по температуре. Такая обратимость смачиваемости обнаружена в ряде работ для систем металлов, физико-химически не взаимодействующих между собой: W—Sn, Mo—Sn, Fe—Pb, коррозионно-стойкая сталь Ag и др.

При адсорбционной смачиваемости и растекаемости и затекании в капиллярный зазор краевой угол  $\nu$  входит в уравнение  $\Delta p = 2K\sigma_{\text{жг}}\cos \nu/r$ , где  $\Delta p$  — разность капиллярных давлений двух жидкостей или жидкости и газа.  $K=2$  — константа для цилиндрического капилляра и  $K=1$  — для плоского капилляра ( $r$  — радиус капилляра). Капиллярная смачиваемость отличается от смачиваемости при растекании по поверхности тем, что она имеет место только при значениях краевых углов в пределах от 0 до  $90^\circ$ ; при краевом угле, равном  $90^\circ$ , нет капиллярной смачиваемости, а при  $\theta > 90^\circ$  имеет место отрицательная капиллярная смачиваемость: жидкость вместо затекания в зазор выталкивается из него. Условия смачивания ( $W_A > 0$ ) и растекания ( $W_K > 0$ ) в капилляре необходимы, но не достаточны. При растекании по плоскости обычно не принимают во внимание разности давлений в жидкой и газообразной среде, тогда как при затекании в капиллярный зазор разность таких давлений является одной из важнейших движущих сил при заполнении зазора. Достаточным условием затекания припоя в капиллярный зазор является условие  $p_1 - p_2 > 0$ , где  $p_1$  — давление со стороны вогнутой части мениска припоя, а  $p_2$  — давление среды (флюса, газа, воздуха) с выпуклой, противоположной его стороны.

На адсорбционное смачивание и растекание существенно влияет рельеф поверхности на твердом материале (в виде канавок, рисок и др.) [14].

Пока ясно, что при адсорбционной растекаемости по шероховатой поверхности участвуют и капиллярные явления, но учет их пока сложен. Скорость адсорбционного растекания во многих случаях подчиняется параболическому закону:  $l = ct$ , где  $l$  — линейный размер;  $t$  — время;  $c$  — константа. В некоторых случаях оправдывается линейная зависимость или другой степенной закон.

Известны и парадоксы, не объяснимые с точки зрения феноменологической теории адсорбционного смачивания и растекания, когда скорость растекания возрастает при переходе от грубо обработанной до шлифованной поверхности и становится наибольшей на полированной поверхности (по данным Ю. В. Найдича и В. С. Журавлева) (например, при растекании припоев по стали и меди, ртути по олову, меди, олова и сплава олово — титан по кварцу).

Реальные процессы растекания и затекания в зазор достаточно сложны и только приближенно описываются с помощью теоретических представлений об изотермическом растекании и затекании припоя в зазор, не учитывающих физико-химического взаимодействия припоя с паяемым материалом и температурных условий контакта.

В поверхностном слое паяемого металла всегда имеются дефекты, выходы дислокаций, которые могут явиться местами активного смачивания. Поэтому процесс смачивания при пайке начинается в местах активирования поверхностного слоя. Такие места могут существовать до начала контакта или возникать при пайке [15].

При когезионном взаимодействии твердого паяемого металла и жидкого припоя в их контакте происходят явления четырех видов, определяющие изменение изобарного потенциала  $\Delta z$  системы и тем самым направление протекания процессов при пайке: 1) изменение состояния в объеме  $\Delta z_V$ ; 2) изменение состояния на

поверхности  $\Delta z_w$ ; 3) перенос масс  $\Delta z_u$ ; 4) образование поля напряжений  $\Delta z_r$ . Суммарное изменение изобарного потенциала при спонтанно протекающих процессах  $\Delta z = \Delta z_v + \Delta z_w + \Delta z_u + \Delta z_r < 0$ .

Детальная структура, состав и толщина поверхностных слоев вещества пока мало изучены, и о его свойствах судят по результатам взаимодействия с контактирующими веществами.

Могут иметь место следующие варианты смачивания твердого тела жидкой фазой:

1) межфазная энергия  $\sigma_{тж}$  изменяется во времени с достаточно малой скоростью, так что капля жидкой фазы успевает принять равновесную форму для установившегося к данному моменту времени значению  $\sigma_{тж}$ . Тогда изменение краевых углов описывается уравнением для мгновенных значений (квазиравновесное смачивание) (по Д. Н. Холомону и Д. Тарнбалу) и характеризуется медленным изменением  $v$  в течение минут или часов. Для этого случая действительна зависимость величины угла  $v$  от значений  $\sigma$ ;

2) если временная зависимость контактного угла смачивания определяется также инерцией массы жидкой фазы и ее вязкостью, то значение угла  $v$  в течение всего периода распространения капли по поверхности паемого материала является неравновесным и для него уравнение  $\cos v = \sigma_{тг} - \sigma_{тж}/\sigma_{жг}$  неприменимо. Для больших скоростей изменения угла смачивания  $v$ , при которых весь период его изменения чрезвычайно мал ( $0,1-0,01$  с) при условии  $180^\circ > v > 90^\circ$  — несмачивание, при  $90^\circ > v > 0$  наступает ограниченное смачивание и при  $v \approx 0^\circ$  полное смачивание.

В случае ограниченного смачивания твердого тела жидким растекание последнего сопровождается изменением краевого угла от начального значения до равновесного  $v_0$ . Движущая сила такого растекания  $\Delta\sigma = \sigma_{жг}(\cos v_0 - \cos v)$ , где  $v$  — динамический угол смачивания. При полном смачивании после превращения капли в плоский слой жидкости  $\Delta\sigma = \sigma_{тг} - \sigma_{тж} - \sigma_{жг}$ . Дополнительные факторы, влияющие на растекание, — масса капли или слоя, а также изменение  $\sigma_{тж}$  вследствие физико-химического взаимодействия контактирующих веществ.

Спротивление жидкой фазы процессу растекания подразделяют на две составляющие: кинетическое сопротивление, действующее по периметру растекания, и сопротивление вязких сил в объеме растекающейся жидкости [14]. Если растекание контролируется первой составляющей, то соответствующий режим называется кинетическим. Его анализ с позиций теории абсолютных скоростей реакций приводит к экспоненциальной зависимости перемещения линии смачивания (периметра) от движущей силы растекания  $P = e^{KP/RT}$  при  $U = \text{const}$ , где  $K$  — константа;  $R$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура растекания. Изменение сопротивления вязких сил происходит в гидродинамическом режиме. При этом различают стадию инерционного растекания, когда сопротивление обусловлено силами инерции, действующими в объеме жидкости. Кинетика растекания в этом случае хорошо описывается параболической зависимостью, предложенной В. П. Демьянцевичем и др., смоченной площади от времени  $\tau^2 = A_1$ , где  $A_1$  — коэффициент, зависящий от свойств контактирующих веществ и температуры. При растекании в инерционном режиме вязкость жидкости не влияет на скорость растекания.

Анализ кинетики вязкого растекания основан на решении систем уравнений Навье — Стокса и непрерывности для вязкой несжимаемой жидкости с учетом особенностей движения жидкости. При круговом растекании жидкости в условиях полного смачивания поверхности

$$r = (4 \Delta\sigma m / \eta \rho \mu)^{1/4} = A_2 \tau^{1/4},$$

где  $\Delta\sigma$  — движущая сила растекания;  $m$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  — масса, плотность и вязкость жидкости;  $\eta \approx 10$  — коэффициент, учитывающий неравномерность толщины слоя жидкости.

Для случая толстых слоев, когда преобладающей является сила, связанная с уменьшением потенциальной энергии при понижении центра тяжести слоя жидкости, получено уравнение для радиуса  $r$  смачивающей жидкости в зависимости от времени  $\tau$ :

$$r = (4m^2 g / \eta \rho \mu^2) \tau^{1/8} = A_3 \tau^{1/8}.$$

Для ограниченного смачивания, когда форму капли можно аппроксимировать сегментом сферы в интервале  $60^\circ v_d > v > 0^\circ$ , получено кинетическое уравнение

$$r = (\sigma_{ж}/\mu)^{0.1} \tau^{0.1} V^{0.3} = A_4 \tau^{0.1}.$$

Смачиваемость паяемого материала жидким припоем, находящимся в динамическом состоянии (пайка погружением, волной припоя), более правильно оценивать не по углу смачивания или площади растекания, а по силе, действующей на образец при его погружении и смачивании припоем. В условиях пайки погружением в ванну, особенно при использовании автоматических линий, важнейшей характеристикой является скорость смачивания. Испытания на смачиваемость при этом проводят по методике ISO: на менискографе (метод силового баланса) квадратные образцы со стороной 25 мм погружают в ванну вдоль направления проката с заданной скоростью.

Одним из путей улучшения смачиваемости  $M_k$  припоем является активирование жидкой фазы. Известно, что вещества в момент их образования (контактного плавления или химической реакции) обладают более высокой химической активностью, чем после завершения этого процесса. Авторами показано, что при использовании смеси компонентов, образующих эвтектику Sn—Pb, Al—Cu, заметно улучшается их растекаемость по сравнению с растекаемостью готовых эвтектик (по меди и по алюминию соответственно).

Поэтому применение смесей из порошков компонентов, взаимодействующих между собой и (или) с паяемым металлом, технологически более эффективно, чем применение готовых припоев результирующего состава.

**Затекание припоя в зазор.** При движении жидкого припоя в капиллярном зазоре, в отличие от растекания по открытой поверхности, не происходит увеличения поверхности раздела припой — окружающая среда (флюс), и поэтому капиллярная сила

$$K_p = 2(\sigma_{тг} - \sigma_{тж}).$$

Отнеся капиллярную силу к площади сечения жидкого металла  $n$  в зазоре, получим капиллярное давление  $\Delta p = K_p/n = 2(\sigma_{тг} - \sigma_{тж})/n$ . Так как при ограниченном смачивании  $\sigma_{тг} - \sigma_{тж} = \sigma_{жг} \cos v$ , то  $\Delta p = 2\sigma_{жг} \cos v/n$ . Если припой смачивает поверхность паяемого металла в зазоре, то капиллярное давление положительно ( $\Delta p > 0$ , так как  $\cos v > 0$ ) и вызывает затекание припоя внутрь зазора. При отсутствии смачивания припой, даже если он каким-то образом первоначально введен в зазор, например, уложен в виде фольги, под действием отрицательного капиллярного давления будет вытесняться из зазора.

В предположении ламинарного течения припоя в зазоре имеет место параболическое распределение скорости потока жидкости по толщине; у стенок капиллярная жидкость покоится и имеет место зависимость для средней скорости потока:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{h^2}{12\eta} \frac{\Delta p}{l},$$

где  $l$  — длина заполненного зазора  $h$ ;  $\eta$  — вязкость жидкости.

Из уравнения следует, что скорость течения в зазоре растет пропорционально квадрату ширины зазора и обратно пропорционально длине заполнения участка зазора.

Интегрируя (8), получим время заполнения горизонтального зазора длиной  $l$ :

$$\tau = 3\eta R^2/n \cos \theta \sigma_{жг}.$$

Для капиллярного зазора при заполнении снизу высота подъема ограничена и определяется равенством капиллярного давления и давления столба жидкого припоя

$$l_0 = 2\sigma_{жг} \cos \theta / \rho gh,$$

где  $\rho$  — плотность расплава;  $h$  — ширина зазора.

Анализ кинетики заполнения вертикального капиллярного зазора приводит к следующим выражениям:

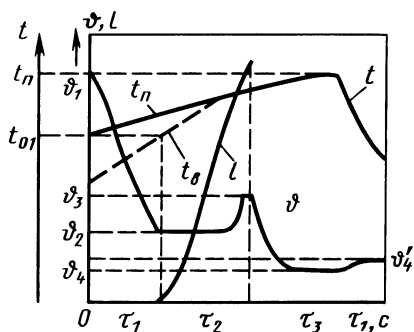


Рис. 14. Схема изменения контактного угла смачивания  $\phi$ , длины горизонтального зазора  $l$ , заполненного припоем, в зависимости от времени:

$t_n$  и  $t_o$  — температура нижней и верхней половины образца при затекании припоя в зазор

для скорости подъема припоя

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{b^2}{12\eta} \left( -\frac{2\sigma_{ж} \cos \varphi}{lh} - \rho g \right)$$

и для времени заполнения зазора припоем

$$\tau = \frac{12\eta}{h^2 \rho g} \left( l_0 \ln \frac{l_0}{l_0 - l} - l \right).$$

Вывод о ламинарном характере движения жидкости в капиллярном зазоре следует из подсчета числа Рейнольдса для типовых значений, применяемых при пайке капиллярных зазоров и свойств жидких припоев. Однако часто ламинарность потока не наступает, так как невозможно заполнить зазор жидкостью, которая имеет нулевую скорость движения на периферии. По фронту жидкости должны существовать нормально к стенке зазора потоки. Однако такая турбулентность может существовать лишь при входе в зазор. Остальная часть потока должна быть однонаправленной [11].

Экспериментальное исследование процесса смачивания, растекания и затекания в зазор подтверждает теоретический анализ [15] (см. гл. 6).

На рис. 14 приведена схема изменения  $v$ ,  $l$ ,  $t$  в процессе затекания припоя в зазор для случая, когда припой одновременно смачивает обе пластинки под углом  $v_2$  и входит в зазор (этап  $\tau_1$ ). При этом образуется симметричный мениск припоя, который движется по зазору с постоянным углом смачивания, одинаковым как для нижней, так и для верхней пластины (этап  $\tau_2$ ). Вблизи выхода из зазора обнаруживается эффект увеличения контактного угла смачивания до значения  $v_3$  с одновременным уменьшением скорости заполнения зазора, что, по-видимому, обусловлено достижением припоем конца зазора и снижением вследствие этого капиллярного давления. Затем при образовании галтельного участка угол смачивания снижается до значения  $v_4$ .

В реальных условиях в собранных внахлестку пластинах при печном нагреве верхняя пластина некоторое время остается менее нагретой ( $t_o$ ), чем нижняя, лежащая на горячей подставке ( $t_n$ ). Поэтому припой сначала смачивает нижнюю пластину под меньшим контактным углом смачивания, чем верхнюю. При нагреве верхней пластины до температуры нижней образуется симметричный мениск, и кинетика заполнения зазора идет по вышеописанному случаю.

## 2. КОНТАКТНО-РЕАКТИВНАЯ ПАЙКА

Капиллярная пайка, при которой припой образуется в результате контактно-реактивного плавления соединяемых материалов, промежуточных покрытий или прокладок с образованием эвтектики, называется контактно-реактивной. Сочетания элементов, образующих эвтектику, которые могут быть использованы при контактно-реактивной пайке, представлены в табл. 3. При таком способе пайки нет необходимости в предварительном изготовлении припоя. Количество получаемой жидкой фазы можно регулировать изменением времени контакта, а также толщины покрытия или прокладок, так как процесс контактно-реактивного

Т а б л и ц а 3. Некоторые сочетания элементов *A* и *B*, образующих эвтектики или твердые растворы с минимальной температурой плавления (по данным Хансена)

| A                                   | B  | Содержание A в эвтектике (твердом растворе), % |      | Температура плавления эвтектики (твердого раствора), °C | Пластичность эвтектики (твердого раствора) | Растворимость при температуре плавления эвтектики, % |       | Примечание *                                 |
|-------------------------------------|----|--|------|---|--|--|-------|--|
|                                     |    |  |      |   |  | A в B  | B в A |  |
| Эвтектики без химических соединений |    |  |      |   |  |  |       |  |
| Au                                  | Ge | 88   |      | 56  | Высокая                                    | —  | 1,2   | Межзеренная химическая эрозия Au             |
| Au                                  | Si | 94   |      | 370   | »  | 0  | 0     |  |
| Al                                  | Zn | 5,0  |      | 382   | »  | 1,0  | 17,8  |  |
| Cd                                  | Bi | 40   |      | 144   | »  | 0  | 0     | Межзеренная химическая эрозия Cd и Bi        |
| Al                                  | Ge | 53,5   |      | 424   | Низкая<br>Высокая<br>»                     | 7,2  | —     | —  |
| Al                                  | Si | 88,3   |      | 577   |  | —  | 1,65  | —  |
| Al                                  | Be | 99,13  |      | 645   |  | —  | 0,03  | Межзеренная химическая эрозия Be             |
| Ag                                  | Ga | 81,0   |      | 651   | »  | —  | 6,9   | Диффузионная пайка Ag                        |
| Ag                                  | Si | 95,5   |      | 830   | »  | —  | 0     | Межзеренная химическая эрозия Ag             |
| Ag                                  | Cu | 71,9   |      | 779   | »  | 8,0  | 8,0   | Диффузионная пайка Ag, Cu                    |
| Sn                                  | Bi | 57   |      | 139   | »  | 0,1  | 15,8  | Диффузионная пайка Sn                        |
| Эвтектики с химическим соединением  |    |  |      |   |  |  |       |  |
| Pb                                  | Bi | 43,5   | 43,7 | 125   | Низкая                                     | 0,5  | 23,5  | Диффузионная пайка Pb                        |
| Tl                                  | Bi | 52,5   | 53,1 | 188   | »  | 0  | 7,0   | Диффузионная пайка Tl                        |
| Au                                  | Sb | 74,0   | 65,0 | 360   | »  | 0  | 0,4   | —  |
| Cu                                  | P  | 8,4  | 15,7 | 714   | »  | —  | 1,75  | Диффузионная пайка Cu                        |
| Ag                                  | Be | 99,0   | 89,5 | 881   | »  | ~0,45  | 0,3   | —  |
| Fe                                  | Zr | 24,0   | 16   | 936 ± 5   | »  | 5,5  | —     | Диффузионная пайка Fe                        |
| Cu                                  | B  | 98,0   | 89,3 | 1060  | »  | —  | ~0,09 | Межзеренная химическая эрозия Cu             |
| Fe                                  | C  | 85,3   | 82,8 | 1145  | »  | —  | 2,06  | —  |
| In                                  | Bi | 34   | 22   | 290   | »  | 0  | 20,5  | Диффузионная пайка In и химическая эрозия In |

| А  | В  | Содержание А в эвтектике (твердом растворе), % |      | Температура плавления эвтектики (твердого раствора), °С | Пластичность эвтектики (твердого раствора) | Растворимость при температуре плавления эвтектики, % |       | Примечание *   |
|----|----|--|------|---|--|--|-------|--|
|    |    |  |      |   |  | А в В  | В в А |  |
| Ag | Mg | 48,5   | 17,5 | 471   | »  | 15,5   | 8,5   | Диффузионная пайка Mg и Ag                                 |
| Cu | Sb | 23,5   | 37,0 | 526   | »  | —  | 0,013 | Межзеренная химическая эрозия Cu                           |
| Ag | Al | 70,5   | 38,5 | 566   | Низкая                                     | 44,4   | 5,15  | Диффузионная пайка Ag                                      |
| Ge | Ni | 66,8   | 62   | 775   | »  | —  | 12,0  | Диффузионная пайка Ni                                      |
| Ta | C  | 99,4   | 92   | 2800  | »  | 3 (ат.)  | —     | —  |
| Al | Mg | 32,3   | 31,1 | 437   | »  | 12,7   | 17,4  | Диффузионная пайка Al и Mg                                 |
| Ti | Ni | 75,5   | 71,5 | 955   | »  | —  | —     | —  |
| Fe | Ti | 15,7   | 8,4  | 1085  | »  | 7,5  | 7     | Диффузионная пайка Fe и Ti при $t \geq 1085^\circ\text{C}$ |
| Al | Ni | 94,3   | 97,3 | 640   | Высокая                                    | 11,0   | ~0    | Химическая эрозия Al при $t \geq 640^\circ\text{C}$        |
| Cu | Ti | 28,0   | 44,0 | 885   | Низкая                                     | 17,0   | 4,3   | Диффузионная пайка Ti                                      |
| Ni | Zr | 17,0   | 24   | 961   | »  | 1,9  | 0,3   | Межзеренная химическая эрозия Ni                           |
| Fe | Si | 20,5   | 34   | 1200  | »  | —  | 16    | Диффузионная пайка Fe                                      |
| Ni | Si | 62   | 43,8 | 960   | »  | —  | 8     | Диффузионная пайка Ni                                      |
| Al | Si | 67,0   | 82,7 | 548   | »  | 9,4  | 5,7   | Диффузионная пайка Cu                                      |
| Cu | Mn | 65   | 63,5 | 870   | Высокая                                    |  |       |  |
| Au | Cr | 20   | 43,5 | 889   | »  |  |       |  |
| Au | Ni | 82,5   | 58,0 | 950   | »  | 100  | 100   | Диффузионная пайка А и В                                   |
| Ni | Mn | 60,5   | —    | 1018  | »  |  |       |  |
| Ni | Pd | 40,0   | 55,0 | 1237  | »  |  |       |  |

\* Указана возможность диффузионной пайки.

плавления прекращается после расходования одного из контактирующих материалов.

**Особенности контактно-реактивного плавления.** Описанное впервые А. Галлоком и Ф. М. Флавитским в конце XIX в. плавление

ние твердых металлов по месту их контакта при температуре выше температуры плавления эвтектики, но ниже температуры автономного плавления (т. е. солидус-ликвидус) наиболее легкоплавкого из них было названо контактным. Контактное плавление изучалось и в последующие годы. При этом были выявлены многие его особенности, использованные главным образом при пайке.

Эвтектика не является простой механической смесью составляющих фаз, на что указывают более низкие температуры ее плавления и кристаллизации по сравнению с соответствующими температурами сплавов, достаточно близких по составу. Особое состояние фаз в эвтектике по месту их контакта подтверждается также данными о более высокой коррозионной стойкости и твердости эвтектики при быстром затвердевании по сравнению с теми же характеристиками других сплавов той же системы с близким химическим составом. Вследствие особых свойств эвтектического сплава было предложено такой вид плавления, в отличие от автономного и других видов плавления материалов в контакте, например, электроконтактного, назвать контактно-реактивным [12].

Контактно-реактивному плавлению твердых кристаллических веществ как фазовому переходу первого рода должно предшествовать активизирование атомов контактирующих фаз на их межфазной границе. На начальной стадии процесса энергия активации контактирующих фаз повышается постепенно вследствие накопления потенциальной энергии и достигает максимума на гребне лабильного состояния. Малейшее повышение потенциальной энергии системы по месту контакта двух фаз выше требуемой энергии активации приводит к переходу системы в более стабильное состояние — метастабильное равновесие трех фаз: двух твердых и жидкой, т. е. к плавлению.

Явление контактно-реактивного плавления возможно лишь при нагреве контактирующих веществ несколько выше температуры плавления эвтектики или наиболее легкоплавкого сплава системы с непрерывным рядом твердых растворов с минимальной температурой плавления. Для наступления контактно-реактивного плавления достаточно, чтобы температура элементов в месте их контакта не намного превышала эвтектическую. Так, например, появление эвтектики при контакте легкоплавких металлов — свинца, олова, кадмия, висмута, цинка — наступает при перегреве на  $0,9\text{--}1,2^\circ\text{C}$  выше эвтектической температуры. Образование жидкой фазы при этом происходит очень быстро: например, при контакте висмута и олова при температуре выше эвтектической на  $2\text{--}3^\circ\text{C}$  — в течение  $0,5\text{ с}$ .

К настоящему времени явление контактно-реактивного плавления наиболее изучено для элементов, образующих эвтектические системы сплавов. Процесс контактно-реактивного плавления в таких системах при медленном нагреве включает следующие стадии: а) подготовительную, при которой по границе контакта возникает прослойка твердых растворов и (или) химических

соединений фаз эвтектики; б) образование жидкой фазы; в) плавление твердых контактирующих фаз в образовавшейся жидкой фазе [12].

Контактно-реактивное плавление обычно начинается от мест контакта выступающих неровностей на соприкасающихся поверхностях деталей, и поэтому его фронт вначале состоит из отдельных сегментов, а впоследствии выравнивается в общую линию [15]. При дальнейшем развитии контактно-реактивного плавления жидкая фаза может возникать по границам зерен и по некоторым дефектам кристаллитов, что объясняется более высоким (на несколько порядков) значением коэффициентов граничной диффузии по сравнению с коэффициентами объемной диффузии. Образование жидкого расплава по границам зерен обычно имеет место у того из контактирующих металлов, в котором растворимость другого металла мала или в нем содержится достаточно большое количество растворимой примеси [19]. Эффект межзеренного контактно-реактивного плавления ослабляется с повышением температуры пайки. Это связывают с влиянием примесей на диффузионную подвижность атомов, например, олова в сплавах  $Cd \rightarrow Bi$ .

Высокая смачивающая способность образующейся жидкой фазы позволяет проводить контактно-реактивную пайку некоторых материалов при достаточно быстром нагреве без флюсов на воздухе или в слабо окислительной атмосфере. В этих условиях готовые припои аналогичного эвтектического состава обычно плохо смачивают или вообще не смачивают паяемый материал [23].

Контактно-реактивное плавление возможно для твердых компонентов  $A_T$  и  $B_T$ , для которых сумма поверхностных натяжений на границе  $A_T$  с эвтектическим жидким раствором  $\mathcal{E}_ж$  и на границе  $B_T$  с тем же жидким раствором  $\mathcal{E}_ж$  меньше, чем поверхностное натяжение на границе между твердым  $A_T$  и  $B_T$ :  $\sigma_{A,\mathcal{E}_ж} + \sigma_{B,\mathcal{E}_ж} < \sigma_{A,B}$ , т. е. появление жидкой фазы  $\mathcal{E}_T$  на границе с твердой, и сопровождается понижением поверхностной энергии системы. Образующаяся жидкость (эвтектика или раствор с минимумом температуры плавления) быстро «окутывает» контактируемые  $A_T$  и  $B_T$ , смачивая их.

Для применения контактно-реактивной пайки необходимы данные о температуре плавления и (или) составе наиболее легкоплавкой эвтектики системы. Для двойных систем элементов эти данные могут быть получены из соответствующих диаграмм состояния или рассчитаны по эмпирическому уравнению Кордеса:

$$C_1/C_2 = (1 - t_3/t_2) / (1 - t_3/t_1),$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — атомная доля контактирующих элементов в эвтектике;  $t_3$  — температура эвтектики;  $t_1$  и  $t_2$  — температуры плавления контактирующих элементов.

По данным авторов, эта формула может быть применена также для определения состава и температуры плавления наиболее

легкоплавкого сплава системы с непрерывным рядом твердых растворов с минимальной температурой плавления.

Состав и температура плавления простых эвтектик легкоплавких металлов многокомпонентных систем непереходных металлов могут быть приближенно рассчитаны по формулам, выведенным А. В. Кривошеем исходя из современных представлений о рассеянии электронов в металле как регулирующем механизме структурообразования и неупругой модели эвтектики [8].

Исходя из того, что для наступления контактно-реактивного плавления необходим контакт всех фаз эвтектики, можно полагать, что с увеличением числа компонентов в сплавах вероятность такого контакта между всеми фазами, составляющими многокомпонентную эвтектику, снижается и поэтому увеличивается время до наступления контактно-реактивного плавления и пайки [12].

**Стационарные и нестационарные режимы контактно-реактивного плавления.** Процесс контактно-реактивного плавления может протекать в двух режимах: стационарном и нестационарном. При стационарном режиме под действием давления, прилагаемого контактирующим веществом, происходит непрерывное удаление избытка образующейся жидкой фазы, и толщина жидкой прослойки поддерживается постоянной [12]. При нестационарном режиме толщина жидкой прослойки с течением времени, вследствие растворения контактирующих веществ в жидкой фазе, непрерывно возрастает.

При контактно-реактивной пайке для предотвращения расширения капиллярного зазора и вытекания из него жидкой фазы процесс обычно ведут в стационарном режиме.

Контактно-реактивное плавление в нестационарном режиме для одномерной задачи рассмотрено в работе [7].

Учитывая, что в нестационарных условиях процесс контактно-реактивного плавления выше эвтектической температуры происходит при достаточно большой толщине жидкой фазы, скорость нарастания количества последней можно представить как сумму скоростей контактно-твердожидкого плавления на кинетической стадии со стороны каждой из межфазных границ:

$$d\vartheta/d\tau = (1/v_{\text{ж}}) [(C_3 - C_1) S_1 + (C_3 - C_2) S_2],$$

где  $S_1$  и  $S_2$  — площади контакта твердых веществ 1 и 2 с жидкой фазой;  $v_{\text{ж}}$  — скорость контактного плавления.

Скорость плавления на этом этапе станет равной нулю, когда  $C_3 = C_1$  и  $C_2 = C_3$ , т. е. когда будет израсходовано одно из контактирующих веществ [12], где  $C_3$  — концентрация эвтектики.

Скорость контактно-реактивного плавления увеличивается в 2—10 раз, когда сверху располагается вещество с большей плотностью. Скорость растворения контактирующего вещества с более высокой температурой плавления в жидкой фазе меньше, чем скорость растворения вещества с более низкой температурой плавления, что объясняется зависимостью константы растворения от

гомологической температуры, которая ниже у металлов с более высокой температурой плавления (Х. Т. Шидов).

Введение в контактирующие металлы других компонентов может ускорять или замедлять процесс контактно-реактивного плавления. При стационарном режиме наиболее ускоряют этот процесс добавки компонентов, образующих с контактирующими металлами простые, особенно легкоплавкие, эвтектики. Компоненты, образующие с контактирующими металлами монотектики, химические соединения или более тугоплавкие эвтектики, могут тормозить процесс контактно-реактивного плавления.

По данным В. В. Жданова и А. П. Савинцева, при контактно-реактивном плавлении олова с висмутом при введении в олово висмута, кадмия, свинца, цинка или таллия, образующих с ним эвтектики, скорость контактно-реактивного плавления повышается, а при введении серебра, сурьмы, цинка, образующих с оловом химические соединения,— понижается.

При контактно-реактивной пайке серебра с бериллием жидкая фаза быстро проникает по границам зерен последнего, что обусловлено малой его растворимостью в серебре (0,45 %) при температуре эвтектики и весьма малой скорости образования и роста прослойки химического соединения ( $\delta$ -фазы). Образующаяся эвтектика содержит всего 0,9 % Ве и поэтому обладает малой токсичностью. Перед контактно-реактивной пайкой серебро наносят на поверхность бериллия в виде плакирующего слоя или гальванически, что резко снижает испарение токсичного бериллия при пайке.

После образования прослойки жидкой фазы в ней по границам обоих контактирующих веществ возникают скачки концентраций, но состав затвердевающего расплава остается постоянным по всей прослойке и в среднем соответствует эвтектическому для данной системы. Отмечается, что на третьем этапе контактно-реактивного плавления через прослойку жидкой фазы в приграничных участках контактирующих твердых веществ не происходит образования твердых растворов [12]. Это объясняется большей скоростью их растворения по сравнению со скоростью насыщения в твердом состоянии.

С. Р. Малуфом показано, что для нестационарного режима контактно-реактивного плавления концентрация компонентов в прослойке жидкой фазы  $C_{ж}$  в пределах погрешностей измерения (3 %), по данным микрорентгенографического метода и метода послойного взвешивания, изменяется линейно; линейная зависимость подтверждена также и для стационарных условий плавления.

При учете зависимости коэффициентов гетеродиффузии  $D_B$  и  $D_A$  от концентрации имеет место нелинейное распределение компонентов в жидкой прослойке:

$$C_{ж}(x) = a\sqrt{\frac{x}{\delta} [(a - bC_3)^2 - (a - bC_2)^2]} + (a + bC_2)^2,$$

где  $a = D_B$ ;  $b = D_B - D_A$  и  $D_a - D_B$  — парциальные коэффициенты диффузии  $A$  и  $B$  в жидкой прослойке.

Эта зависимость для систем  $Cd - Bi$ ,  $Bi - Sn$ ,  $Cd - Se$  подтверждена экспериментально при температуре  $190^\circ C$  П. А. Савинцевым и другими и по данным оптического метода подчиняется параболическому закону.

Средний состав жидкой прослойки после затвердевания может изменяться в зависимости от степени перегрева по отношению к температуре плавления эвтектики: при небольших перегревах состав ее близок к эвтектическому; по данным Дж. Тино, с увеличением перегрева расплав обогащается более легкоплавким компонентом.

Состав расплава вдоль направления диффузионного потока меняется по линейному закону [19].

Характерно, что при контакте чистых компонентов температура контактно-реактивного плавления (с точностью до 1%) такая же, как при контакте двух твердых растворов, но концентрация жидкости изменяется в пределах 10 %.

**Особенности контактно-реактивного плавления веществ, образующих химические соединения.** Контактному-реактивному плавлению веществ, образующих между собой химические соединения (рис. 15), в условиях изотермического контакта выше температуры плавления эвтектики предшествует образование прослоек соединений, входящих в эвтектику.

Если при этом компоненты  $A$  и  $B$  могут образовывать химические соединения, то в контакте  $A_{тв}$  и  $B_{ж}$  по границе  $A_{тв}$  образуется прежде всего прослойка химического соединения  $A_nB_m$ , наиболее богатого легкоплавким веществом  $B$ . Это соединение вступает в контактное твердожидкое плавление с компонентом  $B_{ж}$  при температуре пайки. В результате образуется жидкая фаза концентрации  $O_A$ , насыщенная компонентом  $A$  при температуре  $t_n$  и содержащая большое количество компонента  $B$ , чем прилегающая эвтектика  $E$  (рис. 15). При неизотермическом их контакте и нагреве со скоростью, превышающей скорость образования по месту контакта веществ химических соединений, наблюдается появление жидкой фазы при температуре на десятки, а иногда и сотни градусов ниже температуры плавления наиболее легкоплавкой эвтектики системы, что объясняется существованием у таких систем метастабильных диаграмм состояния простого эвтектического типа.

Влияние скорости нагрева на температуру контактно-реактивного плавления обнаружено в системах  $Cd-Sb$ ,  $Cu-Sb$ ,  $Cu-Te$ ,  $Cu-Be$  и других, в которых образуется по два-три химических

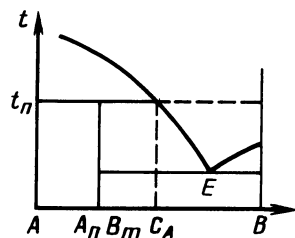


Рис. 15. Схематическая диаграмма состояния сплавов системы  $A-C$  с образованием неплавящегося химического соединения  $A_nB_m$

**Таблица 4. Пары веществ, для которых обнаружено влияние скорости нагрева на температуру контактно-реактивного плавления**

| А  | В  | Химическое соединение системы   | Температура плавления эвтектики, °С *** |
|----|----|---|---|
| Cd | Sb | Cd <sub>3</sub> Sb *<br>CdSb **   | 290/278                                 |
| Cu | Tl | Cu <sub>4</sub> Tl *<br>Cu <sub>4</sub> Tl **                                 | 340/330                                 |
| In | Bi | In <sub>2</sub> Bi *  | 89/77—80                                |
| Tl | Bi | TlBi **<br>х-фаза   | 188/144                                 |
| Pb | Bi | ε-фаза *  | 125/115                                 |
| Cu | Sb | Cu <sub>3</sub> Sb **<br>Cu <sub>2</sub> Sb **                                | 526/470                                 |
| Fe | Si | Fe <sub>3</sub> Si *<br>FeSi *<br>FeSi <sub>2</sub> **<br>FeSi <sub>3</sub> * | 1200/1050                               |
| Cu | Tl | CuTl  | 367/367                                 |

\* Неконгруэнтное.

\*\* Конгруэнтное.

\*\*\* Числитель — медленный нагрев; знаменатель — быстрый нагрев со скоростью 70—100 °С/мин.

соединения конгруэнтного или неконгруэнтного типа (табл. 4). Контактнo-реактивное плавление в этих системах обнаруживается только после длительной выдержки в печи при температуре несколько ниже температуры плавления эвтектики (при контакте Cd и Sb в течение 2—3 ч при температуре на 10 °С ниже температуры плавления эвтектики). Если перед нагревом осуществить предварительный контакт веществ прокаткой, то даже при быстром нагреве (до 100 °С/с) метастабильного контактно-реактивного плавления не обнаруживается, что объясняется образованием по поверхности контакта зародышей химических соединений.

В неизотермических условиях контакта веществ при достаточно быстром нагреве для предотвращения наступления контактно-реактивного плавления их при температуре ниже эвтектической достаточно ввести между ними химические соединения, например, плакированием, ионным напылением или в виде пасты (из напыленного слоя).

Для проведения контактно-реактивной пайки при температурах ниже температуры плавления наиболее легкоплавкой эвтектики системы необходим неизотермический нагрев контактирующих веществ со скоростью, превышающей скорость возникновения зародышей химических соединений, входящих в эвтектику.

**Контактно-реактивное активирование паяемых материалов.** Процесс пайки металлов без флюса в окислительной среде возможен благодаря интенсивному процессу их контактно-реактивного плавления через несплошности в достаточно тонкой оксидной пленке, возникающие при нагреве. Причинами появления таких несплошностей могут быть значительная разница в температурных коэффициентах линейного расширения оксидной пленки и паяемого материала; нарушение сплошности пленки около включений инородных фаз сплава; повышение давления газовой фазы некоторых компонентов паяемого материала под оксидной пленкой; локальный механический разрыв оксидной пленки.

Контакт паяемых материалов между собой или с контактирующим материалом через несплошности в их оксидной пленке может возникать непосредственно или в результате испарения одного из них и хемосорбции его на поверхности другого.

Особенно интенсивно контактно-реактивное плавление развивается по границе паяемого металла и оксидной пленки вследствие повышенной энергии этих мест. В результате пленка оказывается отделенной от твердого металла жидкой фазой и диспергирует вследствие ее несплошности. По смоченной жидкой эвтектикой поверхности паяемого металла хорошо растекается жидкий готовый припой, так как для этого случая  $\theta = 0$  и выполняется условие растекания  $\sigma_{\text{тг}} > \sigma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}}$ . Контактнo-реактивное подплавление конструкционного металла  $M_k$  под оксидной пленкой протекает более интенсивно, чем контактное твердожидкое плавление при пайке готовым припоем.

При оценке пригодности металла покрытия для контактно-реактивного активирования паяемого металла важнейшее значение имеет содержание в образующейся эвтектике основы паяемого материала и растворимость его в жидкой эвтектике при температуре пайки, а также упругость испарения компонентов покрытия. При большой упругости их испарения и высокой плотности оксидной пленки под действием давления паров в ней могут особенно интенсивно возникать несплошности, через которые и произойдет контактно-реактивное плавление.

При образовании жидких эвтектик, богатых паяемым металлом, подплавление оксидной пленки возможно без существенного перегрева жидкой фазы над эвтектической температурой. При образовании эвтектик, бедных паяемым материалом, активирование становится возможным главным образом в результате контактного твердожидкого плавления паяемого материала в образующейся жидкой эвтектике и протекает значительно медленнее.

**Пластичность швов, выполненных контактно-реактивной пайкой.** Паяные швы, образованные эвтектиками, содержащими хрупкие химические соединения, имеют пониженные пластичность и прочность. Повышение пластичности паяных швов при этом возможно разными путями. Например, после удаления большой массы эвтектики из зазора до ее кристаллизации. Однако для этого необходимы большие давления. Пайка в таких условиях трудно осуществима, особенно для тонкостенных изделий и изделий с замкнутыми паяными швами.

Более пригодны другие способы повышения пластичности швов, выполняемых контактно-реактивной пайкой. Например, эвтектика может быть разбавлена паяемым металлом в результате повышения температуры пайки существенно выше эвтектической или готовым пластичным припоем на той же основе, что и паяемый металл. Для этого припой должен быть предварительно введен в зазор между паяемыми поверхностями или нанесен хотя бы на

одну из них, а контактный материал нанесен на припой или паяемые поверхности. Другим путем повышения пластичности паяных соединений может быть диффузия компонентов эвтектики, образующих химические соединения, из шва в паяемый материал (контактно-реактивная диффузионная пайка) или коагуляция включений химических соединений в процессе высокотемпературной гомогенизации паяных соединений или модифицирования.

Твердый слой низкопластичных эвтектик, покрывающий основной материал, охрупчивает его, так как в таком слое легко возникают трещины, служащие надрезом при растяжении и изгибе. Такое охрупчивание тем значительнее, чем толще слой эвтектики. При достаточно тонком слое эвтектики на поверхности основного материала и диффузии ее компонентов (например, при диффузионной пайке) пластичность основного материала может стать достаточно высокой, близкой к исходной.

В связи с этим контактирующие покрытия, образующие хрупкие эвтектики, лучше наносить только на паяемые поверхности и ограничивать растекание жидкого припоя от галтельных участков. Скопление малопластичной эвтектики в галтельных участках паяного шва может также привести к возникновению в них трещин, инициирующих хрупкое разрушение паяного соединения. Поэтому при пайке малопластичными эвтектиками следует ограничивать радиус образовавшихся при пайке галтельных участков, регулируя количество жидкой фазы, например, толщиной слоя контактного покрытия или временем пайки.

**Расположение материалов при контактно-реактивной пайке.** Учитывая особенности контактно-реактивного плавления и пайки, а также возможности контактно-реактивного активирования и обеспечения высокой пластичности паяных швов, паяемый материал и контактирующие с ним прокладки и прослойки могут быть расположены перед пайкой, как показано на рис. 16.

При контактно-реактивной пайке разнородных материалов процесс плавления должен проходить в стационарном режиме с обеспечением достаточно малой ширины паяного шва. Для этого пайка должна осуществляться под постоянно действующим давлением на соединяемые детали (рис. 16, 1а).

Для предотвращения изменения размеров и формы соединяемых деталей при длительной выдержке при температуре пайки между *А* и *В* следует помещать прокладку из материала *С* с температурой автономного плавления существенно выше температуры пайки и не вступающего в контактно-реактивное плавление ни с *А*, ни с *В*. Прокладку покрывают достаточно тонким слоем материала *В* со стороны детали состава *А* и материалом *В* со стороны детали состава *А*. Такая прокладка, при условии отсутствия контакта между образовавшимися объемами жидкой фазы по обе стороны от нее во избежание массопереноса между деталями из *А* и *В*, гарантирует от недопустимого развития химической эрозии паяемых материалов (рис. 16, 1а).

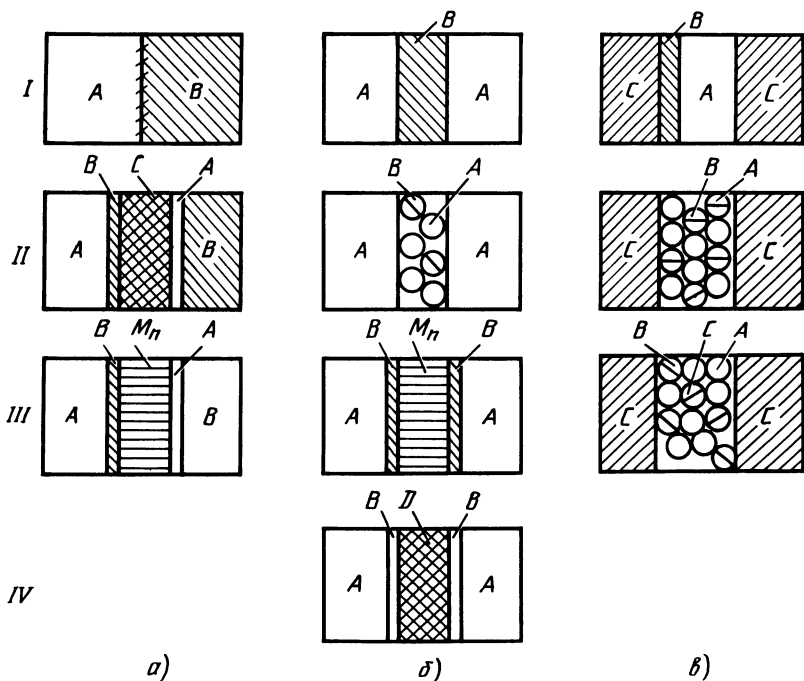


Рис. 16. Схемы расположения перед контактно-реактивной пайкой поверхностей паяемых материалов  $A$  и  $B$ , способных к контактно-реактивному плавлению между собой:

$a$  — при соединении разнородных материалов  $A$  и  $B$  ( $I$  — при их непосредственном контакте;  $II$  — при контакте через прослойку  $C$ , не вступающую в контактно-реактивное плавление с  $A$  и  $B$ ;  $III$  — при контакте через слой припоя  $M_n$  и покрытие  $B$ );  $б$  — при соединении однородных материалов  $A$  ( $I$  — через прослойку материала  $B$ ;  $II$  — через смесь порошков (волокон) материалов  $A$  и  $B$ ;  $III$  — через прослойку припоя  $M_n$  и покрытие  $B$ );  $в$  — при соединении однородных материалов  $C$ , не вступающих в контактно-реактивное плавление с материалами  $A$  и  $B$  ( $I$  — через прослойку материалов  $A$  и  $B$ ;  $II$  — через смесь порошков (волокон) материалов  $A$  и  $B$ ;  $III$  — через смесь порошков (волокон) материалов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ )

При укладке в зазор между материалами  $A$  и  $B$  припоя  $M_n$  с температурой плавления выше температуры их контактно-реактивного плавления и нанесении на него или прилегающий паяемый материал (например,  $A$ ) другого контактирующего материала (например,  $B$ ) происходит активирование поверхности паяемых деталей и становится возможной бесфлюсовая пайка припоем  $M_n$  в безокислительной среде или при быстром нагреве на воздухе (рис. 16,  $IIIб$ ).

При контактно-реактивной пайке деталей из одинакового материала  $A$  контактирующий материал  $B$  можно применять в виде покрытия или прокладки (рис. 16,  $Iб$ ) или смеси (рис. 16,  $IIб$ ) порошков (волокон), помещаемых в зазор. Время выдержки при температуре пайки не ограничено, так как процесс контактно-реактивного плавления автоматически заканчивается после рас-

ходования прослойки материала  $B$ , количество которого может быть заранее дозировано.

При малой пластичности образующейся эвтектики  $A-B$  она может быть разбавлена припоем  $M_n$ ; тогда контактирующий материал  $B$  наносят предварительно на паяемые участки металла  $A$  или на фольгу припоя (рис. 16,  $IIIб$ ).

Контактно-реактивная пайка деталей из материала  $A$  при некапиллярном зазоре между ними может быть осуществлена через прокладку из материала  $D$ , выбирающего часть зазора, на которую наносят контактирующий металл  $B$  (рис. 16,  $IVб$ ).

Контактно-реактивная пайка деталей из материала  $C$  при отсутствии подходящего контактного материала может быть осуществлена с прослойками (или прокладками) или смесью порошков (волокон) из  $A$  и  $B$  (рис. 16,  $Iв$ ,  $IIб$ ), а при некапиллярности зазора из  $A$  и  $B$  или смесью порошков из  $B$  и  $A$  и наполнителя  $C$  (рис. 16,  $IIIв$ ). Пайку по схемам (рис. 16,  $a$ ,  $в$ ) проводят под небольшим давлением на соединяемые детали, позволяющим фиксировать требуемый зазор.

Наносимые контактные покрытия  $A$  и  $B$  предохраняют поверхность паяемого материала или припоя от окисления при нагреве.

При вариантах расположения материалов  $б$  и  $в$  (рис. 16) существенное значение имеет соотношение масс прослоек (покрытий) элементов, вступающих в контактно-реактивное плавление, а очередность нанесения покрытий должна обеспечивать успешное его протекание. При этом необходимо учитывать упругость испарения наносимого материала контактных покрытий в условиях пайки. Например, при пайке в вакууме прослойку марганца следует располагать между прослойками металлов с относительно малой упругостью испарения, например никеля или меди.

**Дозирование количества жидкой фазы при контактно-реактивной пайке соединений соприкасающегося типа и наклонном расположении зазора.** При контактно-реактивной пайке соединений соприкасающегося типа через контактное покрытие во избежание чрезмерного развития химической эрозии паяемого материала у галтельных участков соединения необходимо прежде всего строгое дозирование количества жидкой эвтектики.

Количество припоя, необходимое для заполнения зазора под углом  $\alpha$  (рис. 17), определяется толщиной слоя металла покрытия  $h_i$ , вступающего в контактно-реактивное плавление с паяемым материалом:

$$h_i = S_3 \rho_0 P(t) / [2\alpha R (\rho_r + \rho_0 + P(t))],$$

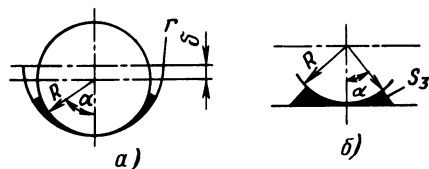


Рис. 17. Схема к расчету количества припоя, необходимого для заполнения зазора при соприкасающемся типе соединения

где  $\rho_0$  и  $\rho_l$  — плотность соприкасающихся детали и покрытия;  $P(t)$  — коэффициент, определяющий соотношение металлов в жидкой фазе при температуре пайки.

Площадь шва  $S_3$  в сечении при типе соединения, показанном на рис. 17, а,

$$S_3 = 2 R^2 (\operatorname{tg} \alpha - 2 \pi \alpha / 360^\circ),$$

а при типе соединения, показанном на рис. 17, б,

$$S_3 = (2\delta\pi\alpha/360) (2l + \delta) - \delta R \sin \alpha,$$

где  $l$  — длина нагреваемого участка.

При наклонном расположении зазора в изделии при контактно-реактивной пайке и при общем нагреве под действием силы тяжести может происходить перетекание жидкого припоя сверху вниз. Такое перетекание возможно при условии нарушения равновесия между силой тяжести и капиллярными силами, зависящими от величины зазора [29]. Условие равновесия в общем виде при этом может быть

$$\rho g l \sin \beta = \sigma [(1/r(\alpha_1)) - (1/r(\alpha_2))], \quad (9)$$

где  $r(\alpha_1)$  и  $r(\alpha_2)$  — радиусы поверхности жидкой фазы в верхнем и нижнем сечениях нагреваемого участка  $l$  изделия;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы, определяющие площадь спая в верхнем и нижнем сечениях нагреваемого участка;  $\beta$  — угол наклона паяемого участка.

Решение уравнения (9) относительно  $l$  может быть получено при известных  $r(\alpha_1)$  и  $r(\alpha_2)$  в верхнем и нижнем сечениях нагреваемого участка при условии, что краевые углы смачивания равны нулю.

Для нижнего и верхнего сечения допустимая длина нагреваемого участка  $l$  определяется по формуле:

$$l = R\rho [1 - \cos \alpha - (\rho/4) (1 + \cos \alpha)^2 \cos^2 \beta]. \quad (10)$$

Например, при пайке медной детали со стальной, покрытой слоем гальванического серебра при  $R = 3$  мм,  $\beta = 12^\circ$ ,  $\alpha = 60 \pm 10^\circ$ ,  $\rho = 9,8$  г/см<sup>3</sup>, допустимая длина нагреваемого участка изделия (рис. 17, а), равна 950 мм [29].

### 3. РЕАКТИВНО-ФЛЮСОВАЯ ПАЙКА

Пайку, при которой припой или слой жидкой полуды образуются в результате восстановления металлов из компонентов флюса, называют реактивно-флюсовой. Восстановление металла из компонентов флюса может происходить в результате диссоциации солей при нагреве или при вытеснении из них металлов при взаимодействии с паяемым материалом.

Реактивно-флюсовую пайку можно проводить с флюсом, содержащим легко диссоциирующие химические соединения. Нелетучие металлические компоненты таких соединений, иногда в сочетании с другими металлами, служат припоями. Летучие

компоненты флюсов могут создавать среду, защищающую паяемый шов от окисления.

Восстановленные из флюса прослойки жидких металлов активируют поверхность паяемого материала и служат компонентами припоя. Летучие продукты взаимодействия могут создавать газовую среду, защищающую паяемый металл от окисления или восстанавливающую его оксиды. Необходимыми компонентами реактивных флюсов являются галогениды металлов.

Возможность протекания реакции восстановления металла из солей флюса на поверхности паяемого металла при погружении его в водный раствор или неводный раствор или в солевой расплав определяется активностью металлов для этих условий. Сравнительная активность металлов для этих условий. Сравнительная активность металлов представляется так называемым рядом напряжений. Ниже представлены такие ряды напряжений металлов для хлоридов, бромидов, иодидов и их водных растворов.

Для водных растворов галогенидов ряд имеет вид: Li, K, Rb, Ca, Na, La, Nd, Mg, Be, Al, Zr, Mn, Nb, Zn, Cr, Ga, Fe, Cd, In, Co, Ni, Mo, Sn, Pb, H, Cu, Hg, Ag, Pd, Pt, Au.

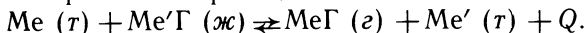
Для расплавов галогенидов ряд напряжений существенно зависит от природы и состава растворителя и температуры. Так, по Л. Л. Антипкину и Ю. К. Делимарскому, электрохимический ряд для расплава NaF имеет вид: Na, Mn, Zn, Al, Cd, Fe, Pb, Co, Ni, Bi, Zr, Cr; расплава NaCl — Ba, Cr, K, Li, Na, Ca, Mg, Be, Mn, Al, Zn, Cd, Pb, Sn, Ni; для смеси NaCl, KCl и SrCl — Na, Be, Mn, Al, Zn, Cd, Pb, Sn, Cu, Co, Ni, Ag, Hg, Bi, а для расплава — NaON — Na, Zn, Sb, Cd, Pb, Bi.

В таком ряду напряжений каждый металл способен вытеснить из солей другие металлы, расположенные правее него.

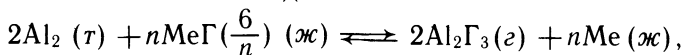
Температура начала самопроизвольного процесса восстановления металлов из галогенидов в контакте с паяемым металлом определяется изменением знака изобарного потенциала с (+) на (—).

Чтобы вытесненный из соли металл мог стать припоем, температура плавления его должна быть ниже температуры пайки. Только при этом условии вытесненный металл может смачивать паяемый металл, контактно расплавлять его под слоем оксидной пленки, проникая через несплошности в ней, и диспергировать ее и, таким образом, активизировать действие флюса, облегчать растекание готового припоя по поверхности паяемого металла и затекание его в зазор.

На примере алюминиевых сплавов показано [15], что процессы взаимодействия паяемого материала с компонентами реактивных флюсов могут протекать с выделением теплоты, и эта теплота в условиях погружения в расплав галогенидов MeГ может быть использована для пайки и даже сварки. При этом происходит экзотермическая реакция



Для определения нижней границы температурного интервала активности расплава галогенидов необходимо знать температуру начала самопроизвольной реакции, что определяется по изменению изобарного потенциала реакции в зависимости от температуры. Реакция алюминия с галогенидом олова, цинка, кадмия, свинца и висмута при температуре выше температуры плавления восстановленного металла имеет вид



где  $\Gamma$  — галогены Cl, Br.

Для Bi коэффициент  $n=3$ ; для Zn, Pb, Cd  $n=2$ .

Приближенный расчет изобарного потенциала для соответствующей реакции проводят по уравнению

$$\Delta G_T^0 = -4,575 [(\Delta M/T) + \Delta N], \quad (11)$$

где  $M = -\Delta H_{298}^0/4,575$  и  $N = \Delta S_{298}^0/4,575$ .

Поскольку самопроизвольное течение процесса восстановления металлов из галогенов определяется изменением знака изобарного потенциала  $\Delta G_T^0$  и учитывая, что его значение для фазового перехода  $\text{Al}(\tau) \rightarrow \text{Al}(ж)$  составляет 10,38 Дж/моль, по уравнению (11) находим, что такое значение  $\Delta G_T^0$  достигается для различных галогенидов при температурах: 450 К для  $\text{CdCl}_2$  и  $\text{PbCl}_2$ ; 470 К для  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{SnCl}_2$ ; 500 К для  $\text{BiCl}_2$ ; 700 К для  $\text{BiBr}_2$ ;  $> 700$  К для  $\text{PbBr}_2$ .

На основании этого можно заключить, что расплавление алюминия при погружении его в расплав соответствующих галогенидов (при достаточно большом объеме последнего) может наступить при указанных выше температурах.

Исследования [15] показали, что после достижения расплавами галогенидов  $\text{BiBr}_3$  и  $\text{BiCl}_3$  температуры самопроизвольного течения реакции восстановления висмута при погружении в них образцов из скруток алюминиевых проводов ПЭВА диаметром 4 и длиной 150 мм температура в их торце, погруженном в галогенид, начинает быстро подниматься (рис. 18). При более высоких температурах расплава нагрев происходит по всей погруженной

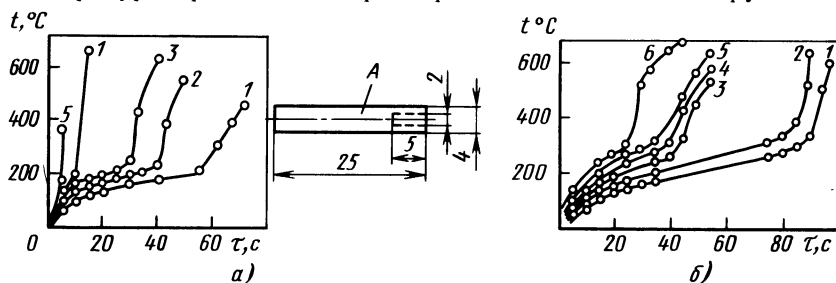


Рис. 18. Зависимость температуры образца А из алюминиевой проволоки диаметром 4 мм, погруженного в расплав хлорида (а) и бромиды (б) висмута, от исходной температуры расплава:

1 — 270 °C, 2 — 300 °C, 3 — 320 °C, 4 — 350 °C, 5 — 370 °C; 6 — 420 °C

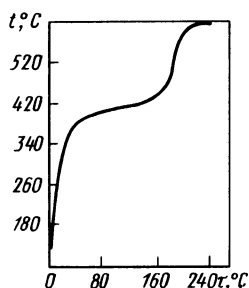


Рис. 19. Зависимость температуры алюминиевого образца от времени нагрева в смеси галогенидов (10 ч.  $ZnCl_2$ , 3 ч.  $CdF_2$  и 0,5 ч.  $NaF$ )

поверхности образца. Время до начала подъема температуры образца зависит от температуры галогенидной ванны. Процесс экзотермической реакции развивается весьма быстро (рис. 19).

На торце скрутки проводов, начиная с некоторой температуры, при достаточной выдержке и подъеме температуры до температуры автономного расплавления алюминия, процесс может происходить бурно, с оплавлением металла и выбросом галогенида из ванны, по-видимому, под действием газообразных продуктов реакции [15].

В процессе экзотермического нагрева алюминиевых образцов температура расплава галогенида по сравнению с его исходной температурой изменяется мало.

При погружении проводов в расплав галогенидов при температуре выше температуры начала самопроизвольного экзотермического нагрева образца характерно развитие интенсивной эрозии паяемого металла, прежде всего по выступам деталей, в результате чего, например, пруток прямоугольного или квадратного сечения очень быстро приобретает соответственно овальное или круглое сечение, что ограничивает применение способа пайки нагревом в расплавах галогенидов деталями с формой тел вращения. Во флюсах, содержащих галогениды металлов в ограниченных количествах, экзотермический эффект должен быть выражен слабее.

При пайке с ограниченным объемом флюса или с флюсом, содержащим кроме галогенидов металлов, восстанавливаемых в контакте с паяемым металлом, также и соли металлов, не восстанавливаемых в этих условиях, эффект экзотермического нагрева проявляется намного слабее. Реактивно-флюсовая пайка получила наибольшее распространение для алюминия, а в последнее время также для меди, медных сплавов и сталей в связи с повышенной активностью реактивных флюсов.

#### 4. КОМПОЗИЦИОННАЯ ПАЙКА

При пайке изделий, собранных с некапиллярными или неравномерными зазорами, для удержания жидкой фазы припоя в зазоре и управления растеканием его по поверхности используют композиционные припои, состоящие из наполнителя и легкоплавкой составляющей (композиционная пайка). Температура плавления наполнителя должна быть выше температуры пайки. Наполнитель композиционного припоя может быть в виде порошка, гранул и волокон.

При другой разновидности композиционной пайки — пайки армированными припоями — в качестве нерасплавляемой части припоя применяют армирующие материалы — спеченную губку, сетки и др.

Важнейшая роль наполнителя при такой пайке, получившей название композиционной, состоит в образовании из его частиц системы капилляров, направляющих растекание и затекание жидкой фазы. Кроме того, наполнитель может насыщать жидкую фазу при пайке основой паяемого материала и, таким образом, снижать ее эрозионную активность, очищать застойную атмосферу зазора от кислорода и улучшать смачиваемость поверхности соединяемых деталей, упрочнять паяный шов.

Перед пайкой наполнитель и легкоплавкая составляющая композиционного припоя могут сочетаться различным образом, в зависимости от конструктивных и масштабных факторов соединений и изделия, возможности приложения давления на соединяемые детали при пайке, смачивающей способности жидкой фазы припоя при выбранном способе удаления оксидной пленки при пайке и др.

При композиционной пайке в отличие от пайки полностью расплавляемым припоем формирование шва происходит в условиях сильно развитых межфазных поверхностей на границе жидкой и твердой фаз. Формирование плавного галтельного участка происходит не самопроизвольно, как при капиллярной пайке готовым припоем, а при растекании выжимаемой под давлением легкоплавкой части припоя. Состав галтельного участка при этом отличается от состава паяного шва, заполняющего зазор.

Вследствие растворно-осадительного механизма химическая эрозия паяемого металла, независимо от эрозионной активности жидкой фазы, незначительна, особенно в случае, если наполнитель и паяемый металл имеют одинаковую металлическую основу. Это позволяет паять тонколистовые конструкции композиционным припоем с потенциально высокой эрозионной способностью его легкоплавкой составляющей.

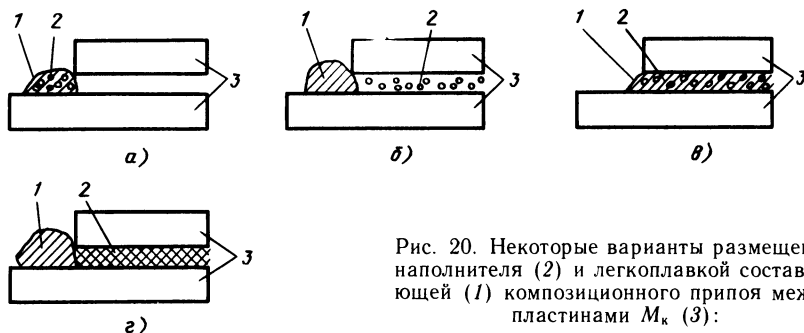


Рис. 20. Некоторые варианты размещения наполнителя (2) и легкоплавкой составляющей (1) композиционного припоя между пластинами  $M_k$  (3):

*а* — смесь порошков наполнителя и легкоплавкой составляющей у зазора; *б* — наполнитель в зазоре, легкоплавкая составляющая у зазора; *в* — та же смесь в зазоре; *г* — наполнитель в виде спеченной губки или волокон в зазоре, легкоплавкая составляющая у зазора

Некоторые используемые варианты размещения наполнителя и легкоплавкой составляющей при композиционной пайке приведены на рис. 20.

При варианте *а* затекание композиционного припоя, укладываемого у зазора, возможно лишь при содержании в нем  $< 25\%$  наполнителя. Механические свойства соединений, паянных такими припоями, удовлетворительны при зазорах шириной 0,5—0,8 мм.

Варианты *б, г* используют при пайке деталей по большой площади спая, при которой трудно обеспечивать полную капиллярность зазора. В этом случае пористые прокладки из спеченного наполнителя, пропитанные легкоплавкой составляющей, предварительно укладывают в зазор.

## 5. ДИФфуЗИОННАЯ ПАЙКА

Капиллярную пайку, при которой затвердевание шва происходит выше температуры солидуса припоя без охлаждения из жидкого состояния, называют диффузионной пайкой. Процесс диффузионной пайки может развиваться только при условии отвода легкоплавкой основы или депрессанта припоя из шва. Отвод может происходить в результате диффузии их в паяемый материал; испарения; связывания их в тугоплавкие соединения или при сочетании этих процессов.

На первой стадии диффузионной пайки с отводом компонентов в паяемый металл развивается обычное для капиллярной пайки ограниченное взаимодействие между твердой и жидкой фазами; на второй стадии наблюдается затвердевание жидкой фазы; на третьей стадии протекают процессы выравнивающей диффузии в твердом состоянии (гомогенизация паяного соединения).

Припой, применяемый при диффузионной пайке, может быть полностью или частично расплавляемым (композиционным); в некоторых случаях припой может образоваться в результате контактно-реактивного плавления соединяемого металла с одной или несколькими прослойками других металлов, нанесенных гальваническим способом, напылением и др., или уложенных в зазор между соединяемыми деталями, или в результате контактного твердогазового плавления.

Следует отличать диффузионную пайку от диффузионной обработки паяных соединений, производимой при нагреве их в твердом состоянии с целью главным образом гомогенизации шва, т. е. приведения его в более равновесное состояние и снятия остаточных напряжений.

Цель диффузионной пайки как самостоятельного способа получения паяного соединения заключается в проведении процесса кристаллизации таким образом, чтобы обеспечить наиболее равновесную структуру соединения, повышение температуры распайки шва, прочности и пластичности, электрической проводимо-

сти соединения, устранения возможных образований малопрочной и хрупкой литой структуры и интерметаллидных прослоек, возникающих в некоторых случаях при кристаллизации шва; повышения коррозионной стойкости соединения без существенного ухудшения характеристик основного материала.

Направление и кинетику протекания процессов при диффузионной пайке обуславливают два обстоятельства: твердая и жидкая фазы контактируют по поверхности раздела; количество жидкой фазы весьма мало по сравнению с количеством твердой фазы. При диффузионной пайке в шве может быть устранена неравновесная псевдоэвтектическая структура, образующаяся при быстром охлаждении доэвтектических сплавов.

Наиболее исследована и нашла широкое применение диффузионная пайка с отводом компонентов-депрессантов припоев из шва в паяемый материал. Два других способа диффузионной пайки с испарением или связыванием депрессанта в тугоплавкие химические соединения исследованы слабо.

Важнейшее условие осуществления процесса диффузионной пайки — существование при температуре пайки достаточно широкой области твердых растворов легкоплавкой основы или депрессанта припоя в паяемом материале. По мере выдержки при температуре пайки в соединении из таких металлов развивается процесс выравнивающей диффузии, в шве возрастает концентрация паяемого металла и поэтому повышается его температурный интервал затвердевания, вследствие чего происходит процесс изотермического затвердевания шва.

Стимулом к диффузионным смещениям вещества, согласно термодинамической теории, является градиент химического потенциала. Диффузионные процессы являются активируемыми, требующими энергии активации дискретного смещения частиц по величине и по направлению, определяемому структурой кристаллической решетки.

Согласно уравнению диффузии, сформулированному Фиком,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}, \quad (12)$$

где  $C$  — концентрация;  $X$  — перемещение диффундирующего элемента;  $t$  — температура.

По этому уравнению процесс должен протекать в направлении убывания концентрации диффундирующего компонента и всегда прямо пропорционально градиенту. В уравнении Фика не учтены многие другие особенности взаимодействия диффундирующих веществ, которые могут существенно влиять не только на количественные, но и на качественные характеристики диффузионных процессов (наличие вакансий, пор, изменение объема, плотности твердой и жидкой фаз, химическое их взаимодействие, изменение концентрации твердого раствора, коэффициенты диффузии и др.). В связи с этим при диффузионной пайке при высоком химическом родстве паяемого металла и припоя может

иметь место не только «нисходящая» диффузия, при которой происходит выравнивание состава в паяном соединении, но и «восходящая» диффузия, с увеличением неоднородности концентрации в соединении (распад твердых метастабильных растворов, образование химических соединений и др.). В связи с этим предложено уравнение диффузии, учитывающее диффузионные смещения компонентов сплава, определяемые парциальными коэффициентами диффузии  $D_i$ . Для каждого компонента уравнение диффузии имеет вид

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2}{\partial X^2} \left( D_i \frac{\partial C_i}{\partial X} - C_i v \right),$$

где  $v(\tau)$  — переменная скорость общего направленного смещения компонентов, определяемая экспериментально по смещению инертных меток.

Зависимость коэффициентов диффузии от концентрации устанавливается по известному методу Матано. В качестве основного движущего начала в процессе диффузии принят отрицательный градиент химического потенциала —  $\partial \mu / \partial x$ .

Длительность  $\tau_n$  диффузионной пайки металла  $M_k$  металлом-припоем  $M_n$  при температуре  $t_n$  для случая объемного характера диффузии и плоского фронта затвердевания при одинаковой плотности твердой и жидкой фаз по толщине слоя твердого раствора может быть в первом приближении [10] определена из соотношения

$$\tau_n = h^2 / 4\beta^2 D, \quad (13)$$

где  $h$  — толщина прослойки жидкой фазы в шве;  $D$  — коэффициент диффузии металла-припоя  $M_n$  при температуре пайки в металле  $M_k$ ;  $\beta$  — коэффициент, определяемый по номограмме и зависящий от концентрации диффундирующего металла  $C_0^T$  на границе Т—Ж фаз в исходный момент взаимодействия ( $x=0$ ,  $t=0$ ,  $C(0,0) = C_0^T$ ).

Необходимое значение  $D$  — коэффициента диффузии  $M_n$  в  $M_k$  при температуре пайки может быть получено из второго уравнения Фика и экспериментальных данных по концентрационным кривым методом локального микрорентгеноспектрального анализа.

Важнейшее условие осуществления процесса диффузионной пайки с отводом компонентов диффузии в паяемый металл — существование при температуре пайки достаточно широкой области твердых растворов легкоплавкой основы или депрессанта припоя в паяемом материале. По мере развития процесса выравнивающей диффузии в жидком шве возрастает концентрация паяемого материала и повышается его температура затвердевания. Это приводит к процессу изотермического затвердевания шва.

Скопление слишком большого количества компонентов припоя в диффузионной зоне соединения рядом со швом может привести к снижению коррозионной стойкости паяного соединения, увеличить его хрупкость или ухудшить физические свойства.

Такая химическая неоднородность должна быть устранена при последующей гомогенизации паяного соединения.

При пайке припоем на основе более легкоплавкого компонента, без прослоек химических соединений, диффузионная пористость будет более интенсивно развиваться в паяном шве. При образовании по границе шва и паяемого материала прослоек химических соединений пористость может развиваться в этих прослойках. Наименьшую склонность к диффузионной пористости имеют соединения при пайке припоем на той же основе, что и паяемый материал, или, по крайней мере, содержащие большое ее количество и легированные депрессантом или другим элементом, хорошо растворяющимся в паяемом металле.

Если депрессант не растворим в паяемом металле, то при длительной выдержке выше температуры плавления припоя рядом со швом может развиваться не фронтальная, а межзеренная диффузия депрессанта. Примером этого является диффузионная пайка никеля или никелевых сплавов припоем на основе  $Ni-B$ . Такая межзеренная диффузия депрессанта может заметно ухудшить свойства основного материала в диффузионной зоне паяного соединения.

Если в двойной системе  $A-B$  между паяемым металлом  $A$  и припоем  $B$  (или  $B-A$ ) с широкой областью твердых растворов на основе  $A$  образуется интерметаллид  $A_xB_y$ , то в процессе диффузионной пайки при температуре ниже температуры плавления или разложения интерметаллида  $A_xB_y$  по границе шва с паяемым материалом образуются и будут расти прослойки интерметаллида, тормозящие процесс диффузии между жидким припоем и паяемым материалом. Образование таких прослоек и их влияние на процесс можно устранить, проводя диффузионную пайку выше температуры плавления или разложения химического соединения, расположенного на диаграмме состояния в интервале концентраций между  $A$  и  $B$  ( $B-A$ ).

Возможность диффузионной пайки в интервале температур несколько ниже температуры плавления или разложения интерметаллида, образовавшегося по границе со швом и основным материалом, зависит от характера диффузии через него компонентов  $A$  и  $B$ . На характер диффузии  $A$  и  $B$  через прослойки химических соединений существенно влияет их способность растворять диффундирующие компоненты. С этой точки зрения различают два типа химических соединений в сплавах: точного стехиометрического состава (дальтониды) и переменного состава, являющегося основой для твердых растворов с компонентами системы  $A$  и  $B$  (бертоллиды). Через прослойки интерметаллидов с переменным составом сравнительно легко протекают процессы диффузии компонентов системы. При этом вследствие эффекта Киркендала многие из таких прослоек в результате протекания процесса диффузии приобретают дефектную решетку с большим числом вакантных мест, что еще больше облегчает процесс диффузии через них.

В прослойках точного стехиометрического состава диффузионный процесс возможен только в результате «самодиффузии» и «туннельного» эффекта. Это существенно тормозит процесс диффузии компонентов *A* и *B* через них. Для диффузионной пайки при образовании в шве прослойки химических соединений более подходят системы сплавов, в которых образуются химические соединения бертоллидного типа.

Анализ диффузионных процессов при пайке облегчается тем, что они относятся к процессам, для которых характерно установление на разных их стадиях соответственных состояний, ограниченных предельными состояниями [14]. Соответственное состояние отвечает определенной степени термодинамической устойчивости системы. Как известно, наиболее изучены соответственные состояния, отвечающие статистически протекающим термически активируемым процессам с определенной энергией (теплотой) активации *Q*. Многие соответственные состояния в одной и той же системе возникают в результате протекания активируемых процессов с переменными параметрами времени, температуры и характеристическим параметром — энергией активации  $f(\tau, T, Q) = 0$ . При этом время достижения соответственного состояния

$$\tau = \tau_0 \exp(-Q/RT), \quad (14)$$

где  $\tau_0$  — константа времени; *R* — газовая постоянная.

При этом предполагается, что в процессе диффузии при разных температурах сплав проходит через серию одинаковых соответственных состояний, но с разной кинетикой процесса, управляемой уравнением (14). При температуре, близкой к температуре плавления металлов (гомологической температуре), их коэффициенты диффузии одинаковы и равны практически  $10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с.

Так как диффузионная подвижность двух металлов при одинаковых соответствующих (гомологических) температурах близка между собой  $D_1(T/T_1) = D_2(T/T_2)$  при  $T/T_1 = T/T_2$  и если  $T > T_2$ , то  $D_2(T_2) > D_1(T_2)$  и более легкоплавкий металл должен быть более диффузионно-подвижным при нагреве контактирующих друг с другом металлов. Для некоторых пар металлов более существенное значение может иметь различие их энергий сублимации.

При прогнозировании возможности и эффективности термических режимов диффузионной пайки сложных сплавов припоями характер их физико-химического взаимодействия в первом приближении можно оценивать по двойным диаграммам состояния основного сплава и припоя, их с легирующими компонентами, и легирующих компонентов между собой. Термодинамическая оценка образующихся в соединении химических соединений возможна по температуре их плавления или энергии сублимации. Учитывая сложный характер взаимодействия компонентов более сложных систем и неравновесность процессов пайки в реальных условиях, целесообразно экспериментальное уточнение состава

и типа интерметаллидных прослоек, образующихся в паяных соединениях.

Особенности процесса диффузии через прослойку химического соединения проявляются не только в увеличении времени диффузионной пайки, но и в развитии так называемой диффузионной пористости в прослойке или рядом с ней, возникающей при большом различии скоростей диффузии компонентов паяемого металла и припоя через эту прослойку. Интенсивное развитие диффузионной пористости обнаружено авторами в соединениях из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т, паяемых алюминиевыми припоями, и после диффузионной пайки меди оловом и низкоуглеродистой стали медно-фосфористыми припоями.

Время диффузионной пайки при прочих равных условиях зависит от толщины паяного шва и относительного содержания в нем депрессанта или легкоплавкой основы припоя. С их возрастанием продолжительность диффузионной пайки увеличивается. Сокращение времени диффузионной пайки может быть достигнуто при термоциклировании, особенно при температуре полиморфного превращения паяемого металла. Действие термоциклирования обусловлено интенсификацией диффузионных процессов при этом.

В работе [12] приведены сведения о возможности диффузионной пайки некоторых металлов в зависимости от характера их диаграммы состояния.

## 6. ПАЙКА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Небольшое давление необходимо при капиллярной пайке для фиксации зазора, а при нефиксированном зазоре — для удаления из него избытка жидкой фазы. Обычно такое давление в зависимости от конструкции паяемого изделия или физических свойств паяемого материала создается одним из следующих способов: воздействием вспомогательного груза или массы одной из деталей, расположенной сверху; в результате разницы температурных коэффициентов линейного расширения (сжатия) паяемых деталей в разнородном соединении (при замкнутой форме спая) или паяемых деталей из материала прижимного приспособления (при незамкнутой форме спая), а также в результате обеспечения температурного градиента между наружной и внутренней деталью при телескопическом типе соединения при интенсивном нагреве наружной детали; вследствие разности давлений снаружи и внутри обжимного тонкостенного контейнера и т. п. При всех этих способах усилие прижима на паяемые детали перпендикулярно поверхности спая.

Во многих случаях давление при пайке является важнейшим параметром процесса, определяющим механические свойства паяных соединений. Например, обнаружено, что при флюсовой индукционной пайке железных или медных сплавов легкоплавкими припоями 1)  $\text{Cd} - (5-25) \% \quad \text{Zn} - (1-2) \% \quad \text{Ag}, \quad t_{\text{пл}} =$

$= 269 \div 295^\circ\text{C}$ ; 2)  $\text{Sn} - (3,5 - 10) \% \text{Ag}$ ,  $t_{\text{пл}} = 221 \div 300^\circ\text{C}$ ; 3)  $\text{Sn} - (9 - 24) \% \text{Zn}$ ,  $t_{\text{пл}} = 198 \div 300^\circ\text{C}$ ; 4)  $\text{Sn}$ ,  $t_{\text{пл}} = 232^\circ\text{C}$  под давлением 29,4 МПа с последующим снятием давления после нагрева припоя до  $500^\circ\text{C}$  временное сопротивление разрыву паяных стыковых соединений повышается до 170 МПа. Предел ползучести после 1000 ч составляет 137—148 МПа. То же наблюдается при пайке сталей, никелевых и кобальтовых сплавов припоями на никелевой или кобальтовой основе после нагрева их до температуры пайки ( $> 900^\circ\text{C}$ ) и сжатии паяемых деталей под давлением до 500 МПа. При этом пайка возможна с перегревом припоя всего на  $30 - 50^\circ\text{C}$  выше температуры его ликвидуса (вместо  $80 - 100^\circ\text{C}$  при пайке без повышенного давления). Длительность пайки сокращается до 0,5—10 мин (вместо 10—20 мин) [15].

Одна из разновидностей пайки под давлением — компрессионная пайка металла с неметаллами (полупроводниками и диэлектриками) готовыми припоями аналогична компрессионной сварке давлением. Компрессионная пайка, однако, имеет преимущества, которые заключаются в более полном контакте соединяемых металлов с неметаллами в связи со смачиванием их жидким припоем, а также значительно меньшим давлением, необходимым при пайке, чем при сварке.

Прилагаемое при пайке давление, во избежание хрупкого разрушения паяемого металла в контакте с жидкой фазой, должно быть сравнительно небольшим. Для прессовой диффузионной пайки деталей из литейного никелевого жаропрочного сплава Repe-80 (0,18 % C, 14 % Cr, 10 % Co, 4 % W, 3 % Al, 5 % Ti, 0,03 % Zn) применяют припой по основному составу, отвечающий сплаву, но с добавками активатора — 2 % В (В-28) или более сложного активатора Д15, содержащего 15,5 % Cr, 10,5 % Co, 3 % Al, 2,5 % В, 3 % Та. Паянные по этой технологии стыковые соединения имеют длительную прочность, близкую к длительной прочности паяемого сплава, и значительно большую длительную прочность соединений из этого же сплава, паянных готовым припоем системы Ni—Cr—Si—В—С.

С увеличением сжимающего давления на соединяемые детали большое значение приобретает скорость его нарастания. При медленном нарастании давления в изотермических условиях жидкая фаза постепенно и в большей степени, чем при большой скорости нарастания давления, удаляется из зазора. Использование слишком больших скоростей нарастания давления, особенно при значительной шероховатости паяемой поверхности соединяемых деталей, может привести к образованию «мостиков схватывания» в отдельных местах соединения, с расположением между ними затвердевшего ликвата, присутствие которого может ослабить соединение и удлинить процесс выравнивающей диффузии. При пайке припоями, непригодными для диффузионной пайки, «мостики схватывания» должны упрочнять соединение, но в значительно

меньшей степени, чем постепенное и, возможно, более полное удаление ликвата из зазора.

Наиболее целесообразна укладка припоя перед пайкой под давлением в зазор. Вероятно, существует оптимальная толщина слоя жидкой фазы, которая должна быть не слишком велика, чтобы при выдавливании этой фазы детали не скользили относительно друг друга или не развивалась недопустимая химическая эрозия, но и не слишком мала, чтобы зазор и все пустоты, образованные вследствие шероховатости паяемой поверхности, были заполнены жидкой фазой.

Контактно-реактивная пайка под давлением особенно удобна в том случае, если один из соединяемых металлов достаточно пластичен и при запрессовке может плотно заполнить полости на поверхности более твердого металла. При этом герметизируется граница их раздела, что предотвращает окисление поверхности соединяемых металлов при пайке на воздухе. К одной из первых разновидностей контактно-реактивной пайки под давлением следует отнести так называемую «клиновую сварку», при которой алюминиевые и медные стержни соединяют при температуре несколько выше температуры плавления эвтектики  $\text{Al} - \text{Cu}$ . При этом избыток жидкой фазы, образовавшейся при контактно-реактивном плавлении соединяемых металлов, выдавливается из зазора (контактно-реактивная пайка в стационарных условиях). Прочность получаемого соединения равна прочности алюминия. Такой способ удобен при пайке материалов, значительно отличающихся по твердости и температуре плавления. При этом заостренный конец должен иметь металлический стержень из металла с повышенными твердостью и температурой плавления.

Показано, что при пайке таким способом стали Ст3 с магнием, алюминием или медью М1 значительная часть жидкой эвтектики, малопрочной после затвердевания, выдавливается из зазора с образованием белых зон повышенной твердости. При этом прочность паяных соединений повышается в несколько раз.

Приложение давления в процессе роста эпитаксиального слоя (слоя совместной кристаллизации) позволяет также удалить значительный объем ликвата, накапливающегося перед фронтом растущих в изотермических условиях ориентированных кристаллов. Фронт таких кристаллов обычно ровный. Высокая прочность соединения может быть обеспечена только при диффузионной пайке с последующей гомогенизацией паяного соединения. Это тем более необходимо, что выросший слой кристаллов состоит из слабо легированного твердого раствора и обладает пониженной прочностью. По данным А. В. Софонова, пайка с приложением значительного давления в процессе роста эпитаксиального слоя осуществлена при соединении встык жаропрочного хромоникелевого сплава ХН75МБТЮ припоем ВПр 7 ( $\text{Ni} - \text{Mn}$ -основа) в виде фольги ( $\delta = 0,24$  мм). Пайку проводили в вакууме ( $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) по режиму: нагрев до  $1180^\circ\text{C}$  в течение 3 мин, изотермическая

выдержка без приложения давления длительностью 1 мин, сжатие при давлении  $p = (1 \div 3) \cdot 10^{-3}$  Па в течение 3 мин и охлаждение с камерой. Временное сопротивление стыковых паяных соединений, полученных по такому режиму,  $\sigma_b \approx 588$  МПа при температуре 20 °С.

Пайка под давлением пропоями, непригодными для диффузионной пайки, вероятно, может быть выполнена при достаточно большом давлении с медленным нарастанием его. Припои, не образующие с паемым металлом заметных жидких или твердых растворов, малорезультативны при пайке под давлением, так как они не диспергируют оксидную пленку и не уменьшают неровности рельефа, а также не активируют массоперенос.

Диффузионная пористость при прессовой диффузионной пайке развивается весьма слабо и не образуется при незначительной толщине прослойки жидкой фазы. Предотвращение образования диффузионной пористости в процессе гомогенизации в твердом состоянии возможно при приложении давления сразу же после активирования поверхности соединяемых металлов и контактно-твердожидкого плавления выступов рельефа. Для пайки давлением наиболее пригодны припои с умеренной эрозионной активностью, не склонные к локальной (например, межзеренной) химической эрозии.

При пайке электросопротивлением на контактных сварочных машинах, электроклещах совпадение направления электрического тока и давления не всегда желательно. Так, например, при пайке твердосплавного инструмента поверхность электродов не должна контактировать с припаяваемой твердосплавной пластиной во избежание создания высокой плотности тока в отдельных ее точках, что может вызвать сильный перегрев, образование больших остаточных напряжений при неравномерном охлаждении и появление трещин.

## Глава 3

# ГОТОВЫЕ ПРИПОИ ДЛЯ ПАЙКИ

### 1. ОСОБОЛЕГКОПЛАВКИЕ И ЛЕГКОПЛАВКИЕ ПРИПОИ

Восемь легкоплавких металлов — ртуть ( $t_{\text{пл}}=38,87^\circ\text{C}$ ), галлий ( $t_{\text{пл}}=29,78^\circ\text{C}$ ), индий ( $t_{\text{пл}}=156,4^\circ\text{C}$ ), олово ( $t_{\text{пл}}=231,9^\circ\text{C}$ ), висмут ( $t_{\text{пл}}=271,3^\circ\text{C}$ ), свинец ( $t_{\text{пл}}=327^\circ\text{C}$ ), кадмий ( $t_{\text{пл}}=321^\circ\text{C}$ ), цинк ( $t_{\text{пл}}=419^\circ\text{C}$ ) — дают возможность получать весьма большое количество различных припоев с температурой ликвидуса в пределах  $39\text{—}145^\circ\text{C}$  и  $145\text{—}450^\circ\text{C}$ .

Особолегкоплавкие припои — с температурой ликвидуса в интервале  $39\text{—}145^\circ\text{C}$ , находят применение, когда опасен перегрев паяемого материала или материала деталей изделия, не подвергаемых пайке, но испытывающих нагрев при термическом цикле пайки, или при ступенчатой (повторной) пайке.

Такие припои нашли особенно широкое применение в электронике, электротехнике, в частности, при изготовлении приборов противопожарного назначения.

В последние 5—10 лет целью легирования припоев явилось повышение их прочности, хладостойкости, снижения электросопротивления и токсичности, снижения температурного коэффициента линейного расширения (особенно предназначенных для пайки монтажа ЭВМ и счетных машин), сообщение припою магнитных свойств, необходимых при пайке магнитных и электромагнитных приборов, средств автоматизации.

Весьма важной задачей легирования было повышение коррозионной стойкости соединений меди, паянной свинцовыми припоями, и алюминия, паянного оловянными припоями. Для особолегкоплавких и легкоплавких припоев большое значение имеет возможность варьирования шириной их интервала затвердевания с целью устранения усадочной пористости в паяных швах, а также повышения содержания первичных кристаллов с целью проведения абразивного лужения паяемых сплавов. Припои, весьма слабо взаимодействующие с паяемым металлом, легировали с целью активирования такого взаимодействия.

**Галлиевые припои.** Низкая температура плавления и хорошая смачивающая способность галлия служат основанием для использования его в качестве компонента припоев.

Галлий обладает необычайно высокой способностью проникать по границам зерен некоторых металлов, особенно легко-

плавких — олова, кадмия, свинца, цинка, а при нормальных температурах и по границам алюминия с образованием легкоплавкой эвтектики, что связано с его малой растворимостью в этих металлах при температуре 20 °С. Алюминий после лужения галлием при температуре ниже 120 °С становится хрупким и непрочным вследствие образования по границам его зерен особолегкоплавкой эвтектики, богатой галлием, с температурой плавления ниже 29,7 °С. Выше температуры 120 °С галлий образует с алюминием сравнительно широкую область твердых растворов и при достаточной выдержке способен диффундировать с границ зерен внутрь их, что приводит к полному или частичному восстановлению пластичности и прочности паяемого металла.

Галлиевые пасты позволяют собирать изделия под пайку с большими зазорами, что важно для типов соединений с замкнутыми паяными швами, например, телескопических, когда затруднен прижим соединяемых деталей, а сборка с капиллярными зазорами существенно удорожает процесс.

Наполнителем галлиевых паст — припоев служат тонкодисперсные порошки, главным образом меди, серебра, никеля. Для улучшения свойств легкоплавкой составляющей паст в галлий добавляют индий, олово (табл. 5). Дисперсность наполнителя галлиевых паст обычно составляет 35—71 мкм. Припой марки № 3 (табл. 5) применен для пайки деталей электровакуумных приборов, работающих при нагреве до 850—1040 °С без нарушения вакуумной плотности (по данным Б. Ф. Чугунова и др.).

Некоторые двойные сплавы галлия с медью, серебром, золотом, магнием, титаном, никелем, кобальтом могут быть пригодны в качестве припоев для диффузионной пайки титана, меди, ряда металлов и их сплавов вследствие образования с галлием широкой области твердых растворов.

Галлий и галлиевые пасты интенсивно окисляются при нагреве на воздухе выше 400 °С и превращаются при этом в темную порошкообразную массу. Поэтому пайку галлиевыми пастами при температурах выше 400 °С необходимо вести в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па).

Т а б л и ц а 5. Состав паст с галлием, %

| Марка или номер припоя | Легкоплавкая часть припоя |      |     | Наполнитель |    |
|------------------------|---------------------------|------|-----|-------------|----|
|                        | Ga                        | In   | Sn  | Cu          | Ag |
| 1                      | 65—70                     | —    | —   | 35—30       | —  |
| 2                      | 37—32                     | —    | —   | 63—68       | —  |
| 3                      | 60                        | 10   | —   | 30          | —  |
| 4                      | 60                        | 10   | —   | 26          | 4  |
| Г7 *                   | 36,2                      | 16,6 | 7,2 | 22          | 3  |
| Г17                    | 30,2                      | 13,8 | 6,0 | —           | 50 |
| 5                      | 39,6                      | —    | 4,4 | 56          | —  |

\* Наполнитель содержит 15 % Ni.

Галлий в качестве основы полностью расплавляемых припоев применяют весьма редко. Галлиевые припои в последнее время используют для диффузионной пайки меди [15]. Диффузионная пайка алюминиевых сплавов чистым галлием выполнена В. Вуихом при толщине слоя этого металла 10—15 мкм и давления в процессе пайки  $(0,15—0,30) 10^{-3}$  Па, с последующей гомогенизацией после пайки в течение 3—20 ч при температурах 250 и 500 °С. При этом получено равнопрочное соединение с незначительным содержанием в нем галлия.

Для предотвращения коробления и растрескивания кристаллов в силовых полупроводниковых приборах и для повышения циклической прочности приборов в режимах «включено-выключено» нашел применение припой, состоящий из галлия и олова (до 60 % Ga).

По данным Н. Ульмана, трубы из коррозионно-стойкой стали, паянные при температуре 1250 °С галлиевыми пастами, изготовленными путем растирания жидкого галлия с порошком никеля, при ширине зазора 20—100 мкм, имеют шов, аналогичный по структуре паяемому металлу. Такие паяные соединения имеют высокую коррозионную стойкость в жидком натрии.

**Припои с висмутом.** Висмут — металл малопластичный, поэтому его редко применяют для пайки металлов и сплавов. Однако сплавы, богатые висмутом, используют в качестве особолегкоплавких припоев (табл. 6). Температура начала плавления таких припоев находится в интервале 46,7—144 °С.

Для припоев, богатых висмутом, характерно увеличение объема при переходе из жидкого состояния в твердое, а также при охлаждении после затвердевания. Припои с висмутом слабо смачивают некоторые металлы, например железо, конструкционные

Таблица 6. Висмутосодержащие припои

| Состав припоя, % |      |      |      |        | Температура, °С |           |
|------------------|------|------|------|--------|-----------------|-----------|
| Bi               | Sn   | Cd   | Pb   | In, Zn | солидуса        | ликвидуса |
| 40,6             | 10,8 | 8,2  | 22,4 | 18 In  | 46,5            | 46,5      |
| 49,4             | 11,6 | —    | 18   | 21 In  | 58              | 58        |
| 49,5             | 13,1 | 10,1 | 27,3 | —      | 71              | 71        |
| 57               | 17   | —    | —    | 26 In  | 78,8            | 78,9      |
| 51,6             | 17   | 8,1  | 23,3 | —      | 91,5            | 91,5      |
| 42               | —    | 16   | 42   | —      | 91,5            | 130       |
| 50               | —    | 7    | 43   | —      | 91,5            | 115       |
| 50               | 18,8 | —    | 31,2 | —      | 96              | 96        |
| 50               | 19   | —    | 31   | —      | 95              | 100       |
| 40               | 20   | —    | 40   | —      | 95              | 120       |
| 50               | 22   | —    | 28   | —      | 95              | 120       |
| 50               | 25   | —    | 25   | —      | 95              | 125       |
| 54               | 26   | 20   | —    | —      | 103             | 103       |
| 55               | —    | —    | 43   | 2 Zn   | 124             | 124       |
| 56               | 40   | —    | —    | 4 Zn   | 130             | 130       |
| 58               | 42   | —    | —    | —      | 139             | 139       |
| 60               | —    | 40   | —    | —      | 144             | 144       |

стали, и отличаются сравнительно высоким электросопротивлением и низкими механическими свойствами. Для улучшения смачиваемости висмутовыми припоями эти металлы перед пайкой оцинковывают и лудят оловянно-свинцовым припоем. Висмутовые припои применяют чаще всего для пайки меди.

Для улучшения способности к смачиванию и сцеплению с паяемым металлом — медью в висмутовые припои вводят до 0,5—5 % железа, никеля, кобальта, платины, иридия, рутения, осмия, рения, палладия, золота.

Для усиления эффекта увеличения объема висмутового припоя при затвердевании с целью устранения течей в емкостях вводят германий, кремний, галлий. Добавка до 0,5 % Ge в такие припои к тому же упрочняет их.

Применение в практике пайки нашли особолегкоплавкие сплавы эвтектического состава, содержащие висмут, свинец, олово, кадмий, с температурой плавления ниже 150 °С (см. табл. 6, 7).

Использование легкоплавких припоев, таких, как эвтектика Bi—Sn вместо Sn—Pb, позволяет исключить из шва свинец и существенно снизить тепловые напряжения в изделиях. Пайка с бесканифольным флюсом возможна при 170 °С.

Временное сопротивление разрыву соединений из меди, паянных висмутовыми припоями, приведенными в табл. 7, весьма низкое (14,7 МПа).

Висмут образуют с алюминием диаграмму состояния монотектического типа. Предельная его растворимость в алюминии при температуре 657 °С составляет менее 0,2 %. Растворимость алюминия в висмуте при температуре 250 °С ничтожна. Поэтому соединения из алюминия, паянные висмутовыми припоями, обладают склонностью к щелевой коррозии. Для повышения коррозионной стойкости паяных соединений из алюминия и его сплавов в висмутовые припои вводят 1—10 % Zn. Припой такого типа имеет, например, состав (%): 40—60 Bi; 8—25 Pb; 7—25 Sn; 15 Cd; 1—10 Zn.

По данным Танака Масанао, в электронике используют висмутовые припои для пайки деталей из меди, латуни, никеля, свинца состава (%): 22 Sn, 28 Pb, Bi — остальное ( $t_{пл}=100$  °С) и 43 Sn, Bi — остальное ( $t_{пл}=138$  °С). Введение висмута в припои Zn—(65—70 %) Sn — (3—9 %) Bi с температурой плавления 330—370 °С позволяет использовать его для пайки ферритов и является заменителем токсичного припоя Zn—Cd.

При достаточной ширине интервала затвердевания висмутовых припоев при введении в них цинка и германия возможен процесс абразивно-кавитационной пайки алюминиевых сплавов.

**Припои с индием.** Особолегкоплавкие припои с индием обладают рядом ценных свойств; некоторые из них применяют для пайки стекла [эвтектический припой, содержащий 52 % In и 48 % Sn ( $t_{пл}=117$  °С) без флюса]; его наносят на поверхность стекла путем натирания. Ряд индиевых припоев обладает высокой

Таблица 7. Состав особолегкоплавких припоев

| Припой      | Состав припоя, % |       |       |      | Температура плавления, °C |
|-------------|------------------|-------|-------|------|---------------------------|
|             | Bi               | Pb    | Sn    | Cd   |                           |
| Вуда        | 50               | 25    | 12,5  | 12,5 | 60,5                      |
| Розе        | 50               | 25    | 25    | —    | 94                        |
| Д'Арсенваля | 45,3             | 45,1  | 9,6   | —    | 79                        |
| Липовица    | 50               | 26,67 | 13,33 | 10   | —                         |
| ПОСВ 33     | 33,3             | 33,4  | —     | —    | 130                       |
| ПОСК 50-18  | —                | 32    | 49,8  | 18,2 | 145                       |

сопротивляемостью коррозии в щелочных растворах. Введение в некоторые припои индия ( $\geq 25\%$  In) обеспечивает высокую коррозионную стойкость их в щелочах. Примером могут служить припой состава (% : 1) 37,5 Sn; 37,5 Pb; 25 In и 2) 75 Pb и 25 In.

Смачиваемость меди и ее сплавов этими припоями не хуже, чем оловянно-свинцовыми, не содержащими индия. Температурный интервал кристаллизации первого припоя 135—180 °C, температура солидуса второго припоя 230 °C.

Индиевый припой со свинцом (50 % In — 50 % Pb) по своим технологическим свойствам близок к припоям Sn—Pb, но в отличие от них слабо растворяет золото и не охрупчивает его. Соединение из золота, выполненное этим припоем, обладает в 100 раз более высокой термостойкостью к термоциклированию в интервале температур  $-50 \div +155$  °C, чем соединения, паянные припоем, содержащим 63 % Sn — 37 Pb, хотя сопротивление срезу нахлесточных соединений ниже при применении припоя с индием. Соединения, выполненные припоем 50 % In — 50 % Pb, рекомендуют использовать в изделиях, работающих при температуре до 125 °C [16].

Индий, благодаря своей высокой способности смачивать различные металлы и неметаллические материалы, введен в припой системы Tl—In—Hg, нашедший применение для пайки полупроводников, стекла, пластмассы, волокон металлов. По данным В. Д. Кинга, полупроводник PbTl паяют припоем состава (ат. %): 33 Hg, 20 Tl, 47 In без флюса и без особой подготовки поверхности.

Припой на основе индия (In—10 % Ag) с температурой плавления 260 °C также слабо растворяет толстые золотые покрытия, хорошо их смачивает и обеспечивает требуемую прочность при термоциклировании. Его применяют для пайки толстых золотых покрытий взамен припоев 63 % Sn — 37 % Pb [16].

Сверхпроводимость медных соединений может быть обеспечена при пайке легкоплавкими припоями состава (%): 20—40 Pb, 10—15 Sn,  $\leq 10$  Cd,  $\leq 18$  In, 10 Sb. Такие соединения проводят ток силой 352 А (без припоя — силой 252 А).

В электронной промышленности Японии для пайки серебряных деталей используют припой, легированные серебром (In—3,5 % Ag и In—5 % Ag), а для пайки золоченых деталей — золотой припой

Таблица 8. Состав эвтектических припоев, богатых оловом, с температурой плавления не ниже 145 °С

| Состав припоя, % |      |      |      |     | Температура плавления эвтектики, °С |
|------------------|------|------|------|-----|-------------------------------------|
| Sn               | Pb   | Cd   | Zn   | Al  |                                     |
| 49,8             | 32   | 18,2 | —    | —   | 145                                 |
| 66,5             | —    | 31   | 2,5  | —   | 163                                 |
| 67,8             | —    | 32,2 | —    | —   | 177                                 |
| 71               | 24   | —    | 5    | —   | 177                                 |
| 61,9             | 38,1 | —    | —    | —   | 183                                 |
| 91               | —    | —    | 9    | —   | 199                                 |
| 88,1             | —    | —    | 10,4 | 1,5 | 198                                 |

ния работают при температуре — 196,15 °С и нашли применение для пайки электронных приборов. Малое электросопротивление обнаружено у припоя 45 % Sn—26 % Pb—26 % In с температурой плавления 135—145 °С; в связи с этим он используется при монтаже ЭВМ и счетных машин, а также при пайке печатных плат.

**Оловянные и оловянно-свинцовые припои.** Олово и его сплавы, содержащие  $\geq 50$  % Sn, имеют температуру ликвидуса в интервале 145—250 °С. Основу таких припоев составляют четыре тройных и три двойных эвтектики, богатые оловом (табл. 8). Почти все эвтектики этих систем и состоят из фаз на основе твердых растворов элементов, за исключением сплавов системы Sn—Pb—Cd.

Свойства легкоплавких припоев во многом зависят от свойств одной из основных фаз — твердого раствора олова. Олово имеет две полиморфные модификации: 1) белое, с тетрагональной кристаллической структурой, устойчивой до температуры 13,2 °С, с плотностью 7,28 г/см<sup>3</sup>; 2) серое, с кубической структурой типа алмаза, образующееся при низких температурах, с плотностью 5,82 г/см<sup>3</sup>. Превращение белого олова в серое происходит с выделением теплоты и сопровождается большим изменением объема, что вызывает его разрушение и образование серого порошка («оловянная чума»). Скорость превращения белого олова в серое при температуре 13,2 °С благодаря способности его к переохлаждению мала; она максимальна при — 30 ÷ — 50 °С и уменьшается при дальнейшем снижении температуры.

Белое олово ( $\beta$ -Sn) обладает хладноломкостью при — 30 ÷ — 60 °С; вязкое разрушение переходит в хрупкое при ударных испытаниях. В припое ПОС 30, где оловянной фазы меньше, чем в припое ПОС 40, температурный интервал перехода из вязкого в хрупкое состояние расширяется, а ударная вязкость снижается более плавно.

Пластичность олова повышается в интервале температур от 17 °С до — 30 °С, после чего начинает резко снижаться.

Превращение белого олова в серое ускоряется при наличии зародышей серого олова, наряджий в деталях, коррозионно активной среды, некоторых примесей, повторных нагревов и ох-

(In—5 % Ag—10 % Au), что резко снижает их эрозионную активность.

Припой с индием Pb—37,5 % Sn—25 % In с температурой плавления 134—181 °С также использован для пайки свинца. Припои, богатые индием, такие, как припой 52 % In—48 % Sn с температурой плавления 117 °С, весьма пластичны и сравнительно прочны. Паянные ими соедине-

лаждения. Известны случаи разрушения при низких температурах в холодильных установках полуды и деталей из чистого олова.

Алюминий, цинк, германий, медь, железо, кобальт, марганец и магний ускоряют распад белого олова; висмут, сурьма, свинец, кадмий, серебро, индий, золото и никель задерживают. При наличии в олове 0,3—0,5 % Bi, или 0,5 % Sb, или 1 % Pb распад олова становится практически невозможным.

Опыт показывает, что введение в оловянные припои меди, никеля, магния и цинка повышает их прочность, висмута и цинка — увеличивает их смачивающую способность и легкоплавкость, кроме того, добавки магния, образующего химические соединения с Sn и Pb, упрочняют припои [55].

В оловянно-свинцовых припоях и в паянных ими соединениях «оловянная чума» даже при работе соединений при низких температурах не наблюдалась.

Легкоплавкие припои, богатые оловом, представлены среди тройных сплавов эвтектической системы Sn—Pb—Cd. Наиболее распространенные припои, содержащие эвтектику Sn—Pb с температурой плавления 183 °С.

Сурьма уменьшает окисление оловянно-свинцовых припоев в жидком состоянии, улучшает их внешний вид и увеличивает теплостойкость до температуры немного выше 100 °С.

Основной набор стандартных оловянно-свинцовых припоев в разных странах примерно одинаков. Они различаются по содержанию примесей и сурьмы, упрочняющей эти припои, содержание которой не превышает 6 %, так как при большем ее количестве образуется химическое соединение SnSb, охрупчивающее припой.

Оловянно-свинцовые припои, содержащие сурьму, непригодны для пайки цинка и его сплавов из-за образования хрупкого химического соединения в шве. Сурьма в больших количествах ухудшает жидкотекучесть Sn—Pb припоев, снижает их коррозионную стойкость, ухудшает сцепляемость с паемым металлом.

Твердость оловянно-свинцовых припоев при добавлении свинца к олову непрерывно повышается до эвтектического состава, а затем, при дальнейшем его увеличении, — снижается.

Исследования влияния допустимого содержания сурьмы в припоях Sn—Pb на их физико-химические свойства позволили классифицировать эти припои на три группы: 1) бессурьмянистые припои с содержанием до 0,05 % Sb, применяемые при необходимости получения высокой пластичности и вакуумной плотности паяных швов; 2) малосурьмянистые припои, содержащие 0,2—0,5 % Sb, с повышенной пластичностью, обеспечивающие плотные швы и применяемые для оцинкованных и цинковых деталей; 3) сурьмянистые припои, содержащие 2—5 % Sb, широко используемые при абразивной пайке, а также в различных отраслях техники, где требуется повышенная прочность паяных швов.

Оловянно-свинцовые припои обладают двумя важными характеристиками, определяющими механические свойства паяного

соединения: температура рекристаллизации их близка к нормальной; растворимость олова в свинце сильно изменяется при повышении температуры. При нормальной температуре в свинце растворяется 2 % Sn, тогда как при эвтектической температуре 183 °С в нем растворяется 19,5 % Sn.

Упрочнить эти припои наклепом не удастся. В отличие от чистого олова деформированные оловянно-свинцовые припои имеют меньшую твердость и прочность, чем литые. Подробное исследование этого явления показало, что причиной его служит не только низкая температура рекристаллизации, но и выделение олова из пересыщенного твердого раствора свинца.

После литья оловянно-свинцовые сплавы находятся в неравновесном состоянии. Большая скорость диффузии элемента сплава при нормальной и немного выше температуре приводит к тому, что при исследовании механических средств припоев после старения всегда наблюдается стадия перестаривания (которую практически можно не учитывать). Более заметное перестаривание (разупрочнение) наблюдается при нагреве оловянно-свинцовых припоев в интервале температур 100—150 °С. Разупрочнение припоев происходит вследствие распада твердого раствора свинца и коагуляции олова (табл. 9).

Припой на основе Pb—Sn, а также паянные ими соединения под нагрузкой изменяют свои размеры («ползут») даже при нормальной температуре. Ползучесть этих припоев и паянных ими соединений зависит от условий кристаллизации припоев, их состава, а также от состава основного металла. Крупнозернистые припои (как и другие сплавы) обладают большей сопротивляемостью ползучести, чем мелкозернистые.

К недостаткам припоя ПОС 40 относится сравнительно широкий температурный интервал кристаллизации, что снижает производительность процесса пайки из-за большой длительности затвердевания шва.

Припой ПОСВ 50 применяют для пайки узлов, подвергаемых термоударам.

Для повышения смачивания меди и ее сплавов припоями ПОС 61 и ПОС 40, торможения роста прослойки фазы ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) и увеличения прочности паянных соединений в них был введен высокоактивный по отношению к олову и свинцу элемент магний [36].

Т а б л и ц а 9. Физико-механические свойства некоторых легкоплавких припоев (ГОСТ 21930—76)

| Припой     | Временное сопротивление разрыву, МПа | Температура, °С |           | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Удельное электросопротивление, мОм·м |
|------------|--------------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------|--------------------------------------|
|            |                                      | солидуса        | ликвидуса |                              |                                      |
| ПОС 61     | 42,1                                 | 183             | 190       | 8,5                          | 0,139                                |
| ПОСК 50—18 | 39,2                                 | 142             | 145       | 8,8                          | 0,139                                |
| ПОС 40     | 37,2                                 | 183             | 238       | 9,3                          | 0,159                                |

Магний имеет более высокое химическое сродство с медью, чем с оловом и свинцом, и при содержании (0,15—0,9 %) Mg по границе шва с паяемым металлом образуются весьма тонкие прослойки химического соединения  $Mg_2Cu$ , тормозящие рост прослойки  $Cu_6Sn_5$  ( $\eta$ -фаза), а в шве образуются включения  $Mg_2Sn_4$  и  $Mg_2Pb$ , упрочняющие шов и измельчающие его структуру. Прочность паяных соединений, выполненных припоями ПОС 61 и ПОС 40, легированных магнием, на 14—20 % выше, чем выполненных стандартными припоями ПОС 61 и ПОС 40 после пайки и после старения.

Установлено, что при введении в припой системы Sn—Pb с содержанием 40, 63 и 90 % Sn никеля в виде порошка с чистотой 99,94 при температуре 1550 °C в количестве 1, 3, 5, 10 и 15 % (при нагреве в кварцевых ампулах) сопротивление срезу соединений, паянных припоем Pb—63 % Sn—10 % Ni, возрастает в 1,5 раза по сравнению с соединениями, паянными припоями, не содержащими никеля, и составляет 45 МПа. Заметное увеличение прочности в паяных соединениях наблюдается при введении в тот же оловянно-свинцовый припой более 5 % Ni. Введение никеля позволяет осуществлять пайку при увеличенных зазорах (шириной более 0,3 мм).

Качество изделий из труднопаяемых металлов, изготовленных способом ультразвуковой пайки с применением припоев системы Sn—Pb, повышается при легировании их металлами группы лантанидов, Zn, Sb, Al, Si, Ti, Be. Такое легирование обеспечивает хорошую смачиваемость окисленной поверхности: цинк улучшает прочность сцепления припоя с паяемым металлом; сурьма повышает коррозионную стойкость паяных соединений в воде и атмосферных условиях; алюминий предотвращает образование шлака на поверхности жидкого припоя в процессе пайки; кремний, титан, бериллий предотвращают потускнение паяных швов. Легирующие элементы в припое должны иметь следующее содержание: лантаниды 0,1—15 %; цинк до 0,3 %; сурьма 0—0,3 %; алюминий до 0,1 %; кремний, титан или бериллий до 0,5 %; медь до 3 %.

Припои должны быть выплавлены в вакууме, нейтральной или восстановительной газовой среде. Температура их плавления 220—320 °C.

Нахлесточные соединения металлов, паянных оловянно-свинцовыми припоями, по степени возрастания сопротивления ползучести можно расположить в следующий ряд: сталь, медь, латунь. Большое значение при этом имеет легирование припоя в процессе пайки вследствие растворения в нем основного металла. Значительное упрочнение оловянных припоев достигается при добавке к ним до 5—10 % Ag.

Прочность соединений, паянных припоями системы Sn—Pb, зависит от соотношения в них олова и свинца, а также от состава паяемого металла. Прочность соединений из меди или латуни,

паянных припоями, богатыми оловом, несколько ниже, чем соединений из низкоуглеродистой стали, что связано с образованием в швах соединений хрупкого слоя (или двух слоев) интерметаллидов  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , продолжающих расти при нагреве паяного соединения выше 130—140 °С.

Для уменьшения склонности меди при пайке к химической эрозии в оловянно-свинцовые припои вводили паяемый металл в количествах, близких к его предельной растворимости при температуре пайки, но не ухудшающих технологических и специальных свойств припоев и паяных соединений. В припой на основе олова с 39 % Pb, предназначенный для пайки паяльником с медным незащищенным наконечником, была введена медь в количестве 1,5—2 %.

Для снижения химической эрозии при пайке золота в оловянно-свинцовый припой, содержащий 62—63 % Sn, введено золото в количестве 0,2—2,5 %. Такое количество золота незначительно влияет на временное сопротивление разрыву, удлинение, температуру плавления, температурный коэффициент линейного расширения и структуру припоя.

Снижение способности цинка к химической эрозии на поверхности оцинкованного железа достигается при введении в припой Sn—Pb 1,5 % Zn. По данным Танака Уру, растекаемость таких припоев по оцинкованным стальным листам уменьшается при введении в них железа.

Легирование припоев с целью уменьшения их растекаемости и вытекания из капиллярных, но относительно широких зазоров наиболее эффективно может быть достигнуто при введении в припой сравнительно тугоплавких компонентов в количествах, существенно не ухудшающих технологических, физических и механических свойств паяных соединений. Для этого в оловянно-свинцовые припои вводят 3—8 % Cu.

По данным В. С. Горелова и М. В. Комарова, увеличение длительной прочности соединений из меди, паянных оловянно-свинцовыми припоями, может быть достигнуто не только путем введения в них до 2 % Ag, после чего нагрузка при температуре 105 °С за 150 ч возрастает в 4 раза, но и при введении в них 0,4—0,8 % In, особенно после термообработки паяного соединения при температуре 120—232 °С в течение 1 ч. Существенное упрочнение припоя, содержащего 0,5—20 % Pb, Sn — остальное, с сохранением высокой пластичности паянных им соединений из коррозионно-стойкой стали, меди, алюминиевой бронзы, может быть достигнуто при введении в него 0,2—10 % Ag; 0,1—5 % Cu; 0,1—3 % Zn; 0,01—3 % Si. Припой такого типа имеет температуру плавления 295—345 °С, удельное электросопротивление  $11,8 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Такие припои вследствие низкого электросопротивления необходимы для пайки монтажных соединений.

По данным П. А. Алова, С. В. Лашко и Н. Ф. Лашко, повышение крипоустойчивости соединений из меди, паянных припоем:

65—68 % Sn, Pb — остальное, достигается при введении в него 0,3—2,5 % Sb и 0,7—2,5 % Ag, что связано с появлением в них химического соединения AgSb. Введение в олово 6—14 % Ag и 7—12 % Sb повышает коррозионную стойкость и теплостойкость соединений из меди, паянных таким припоем.

Согласно Гото Аире и Фукусима Хидедзи, добавки индия (0,5—1,5 %) в припой Pb—Sn повышают длительную прочность паяных соединений из меди. Добавки висмута и лития предотвращают образование трещин на поверхности паяных швов при термоциклировании. Добавка 3—10 % Bi, в оловянно-свинцовые припои предотвращает образование крупнозернистых и блестящих галтельных участков и увеличивает ресурс работы паяных соединений. То же действие оказывает введение свыше 0,005 Zn и 0,05 % Sb.

Введение в припой Sn—Pb цинка и сурьмы до 0,05—10 % каждого обеспечивает пригодность их для пайки керамики, стекла, фарфора с металлами.

Для уменьшения окисляемости жидкого оловянно-свинцового припоя, что особенно важно при автоматической пайке погружением печатных плат при температуре 200—300 °C, его легируют третьим компонентом, образующим с оловом или свинцом двойную или тройную эвтектику, более богатую оловом. К таким компонентам относятся селен, кобальт, медь, никель, золото, платина, лантан, литий, магний, празеодим, кремний. Каждый из них может быть добавлен в припой в количестве 20—50 % от его содержания в эвтектике, богатой оловом. Начальная скорость окисления такого припоя в жидком состоянии в первые секунды при более высоких температурах и в первые минуты при более низких температурах снижается на 60—80 %.

При охлаждении в результате явления обратной ликвации (выдавливания жидкой эвтектики при линейной усадке шва в результате сжатия каркаса из сросшихся кристаллов избыточной твердой фазы) образуются плавные галтельные участки.

Снижение склонности к щелевой коррозии у соединений из алюминия, паянных оловянно-кадмиевыми припоями, при введении в них цинка, образующего твердые растворы с алюминием, установлено Дж. Д. Даудом при длительных испытаниях в условиях промышленной атмосферы. В более поздних работах положительное влияние цинка на коррозионную стойкость паяных соединений из алюминиевых сплавов подтверждено неоднократно.

Легкоплавкие припои на основе олова для пайки алюминиевых сплавов, обеспечивающие повышенную коррозионную стойкость паяных соединений, имеют следующие составы (%): 1) 60—72 Sn; 0,3—3 Bi; 0,5—2 Cu; 0,5—2 Ni; 0,3—2 Mg; Zn — остальное;  $t_{пл} \approx 160 \div 250$  °C [59]; 2) 7—9 Zn; 6—8 Bi; 2,4—4 Sb; Sn — остальное,  $t_{пл} = 213$  °C [60]; 3) 3—5 Zn; 2 Mg; 2 Ag; 0,2 Cu; Sn — остальное;  $t_{пл} = 220$  °C [61]; 4) 18—20 Cd; 0,5—1 Ag; 0,5—1,5 Ga;  $t_{пл} = 180$  °C (по данным Г. Н. Смирнова и др.); 5) 5 Zn; 2 Ag;

0,1—5 Cu; 2 Mg; Sn — остальное;  $t_{пл} \approx 350^\circ\text{C}$ ; 6) 0,5—1,5 Al; 0,5—0,8 Si; 0,5—1,5 Cu; 0,02—2,5 РЗМ; Sn — остальное;  $t_{пл} \approx 315^\circ\text{C}$ . Последние два припоя нашли применение при абразивной пайке с газопламенным нагревом.

Активность взаимодействия олова и оловянно-свинцовых припоев при пайке алюминия повышается также при введении в них компонентов, образующих с алюминием химические соединения (серебро и сурьма).

Положительное влияние цинка, серебра, кадмия в оловянных припоях при пайке алюминия подтверждено в работе Хотта Хинго и др., которые рекомендуют состав припоя (%): 50—70 Sn; 10—30 Cd; 5—20 Zn; 1—5 Ag. В паянных таким припоем соединениях коррозия не была обнаружена, однако временное сопротивление припоя не превышало 14,7 МПа.

При низкотемпературной пайке используется 20—25 % Sn от его общего потребляемого количества, которое в основном применяется для изготовления припоя ПОС 61. Этот припой обладает наиболее благоприятным сочетанием технологических свойств при пайке.

С увеличением содержания в припое Sn—50 % Pb олова возрастает скорость облуживания меди на 0,5 с. После выплавки припоя Sn—40 % Pb в вакууме ( $p = 7,98 \cdot 10^{-2} \div 9,31 \cdot 10^{-3}$  Па) содержание в нем кислорода и водорода снижается, что способствует снижению времени облуживания меди на 1,5—2 с.

Наиболее удачным заменителем припоя ПОС 61 является припой системы Sn—Pb—Sb, состав которого определяется точкой „S“ на диаграмме состояния (рис. 21). Такой припой имеет меньший интервал кристаллизации, чем припой Sn—50 % Pb, более прочен, чем припой ПОС 61, более дешев ( $\sim$ на 12,3 %) и позволяет экономить при пайке по медному покрытию на никеле, латуни,

фольгированном стеклотекстолите 5—7 % Sn.

Добавки индия с сурьмой в свинцово-оловянный припой Pb—(25—45 % Sn—1,5 % In—(1—5) % Sb (может быть 1 % Ag и  $<0,3$  % Cu) с температурой плавления 170—190 °С обеспечивают повышенную прочность и пластичность соединений.

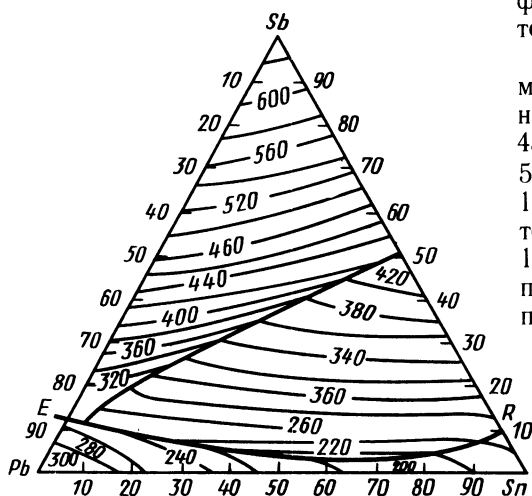


Рис. 21. Поверхность ликвидуса сплавов системы Pb—Sn—Sb (по данным М. С. Лапшова)

Такие припои применяют для пайки элементов электронной техники.

Введение индия в припой системы Sn—Pb обеспечивает высокую стойкость паяных соединений при термоциклировании ( $-65 \div +125^\circ\text{C}$ ) и возможность ступенчатой пайки с припоем ПОС 40; легирование припоя типа П200А индием и сурьмой [Sn—(6—8) % In—(7—9) % Zn—(2,5—4) % Sb] повышает коррозионную стойкость паяных соединений из алюминия (заявка 57-11793 Япония, МКИ<sup>3</sup> В 32 К 35/26, С 22 13/20).

Свинцово-оловянные припои с частицами железа, покрытых кадмием, обладают магнитными свойствами и нашли применение для пайки электромагнитных и магнитных датчиков средств автоматики.

Для монтажной пайки водопроводных труб рекомендуют следующие бессвинцовые припои при нагреве паяных стыков: 1) до  $110^\circ\text{C}$  — припой Sn — 5 % Ag; 2) до  $60^\circ\text{C}$  — припой Sn — 2 % Ag — 1 % Р и 3) до  $40^\circ$  — припой Sn — 50 % Pb.

Наилучшую прочность при повышенных температурах имеют, кроме припоя Sn — 5 % Ag, также свинцовые припои: Pb — 1,5 % Ag — 1 % Sn; Pb — 5 % Ag; Pb — 5 % Sb.

Для пайки криогенной техники были предложены припои с индием: 1) In — 32,5 % Bi — 16,5 % Sn; 2) In — 48 % Sn. Эти припои весьма пластичны. С понижением температуры до 77 К прочность первого припоя в 3 раза ниже, чем второго, но пластичность припоев остается соизмеримой с пластичностью меди. Содержание вредных примесей контролируют особенно тщательно и при необходимости припой рафинируют (очищают) от них. Для контроля используют метод эмиссионной спектрографии.

Примеси железа удаляют, вводя в ванну и перемешивая с жидким припоем мелкий древесный уголь (в течение 20—30 мин); образующиеся карбиды железа, всплывающие на поверхность припоя, удаляют деревянной лопаткой. Примеси меди удаляют путем добавления в ванну с припоем небольшого количества сурьмы или серы в смеси с порошками канифоли, древесного угля и чистых древесных опилок. Для этого в ванну с припоем вводят смеси из 70 % канифоли, 30 % угля и серы (150—300 % от массы меди в ванне), расплав рафинируют при температуре  $240\text{—}260^\circ\text{C}$ , вводя серу малыми порциями в течение 10—15 мин и перемешивая расплав мешалкой. Смесь канифоли и древесного угля вводят после всплывания на поверхность припоя сульфидов меди — эта смесь предохраняет ванну от окисления. Далее ванну нагревают до  $320\text{—}350^\circ\text{C}$ , выдерживают при этой температуре 30 мин при постоянном перемешивании и удаляют образовавшийся черный несмачиваемый порошок скребком или шумовкой. Поверхность ванны покрывают слоем древесных опилок (толщиной  $\geq 3\text{—}4$  мм) и поджигают их в нескольких местах; после сгорания их рафинирование закончено.

По данным Коики Йошихару и других, примеси сурьмы уда-

ляют путем введения в расплав Sn—Pb магния, количество которого определяют по формуле:  $\lg (\% \text{Mg})^3 (\% \text{Sb})^2 = 11,8 - (11\,400/T)$ . Магний образует с сурьмой химическое соединение  $\text{Mg}_3\text{Sb}_2$  с температурой плавления 1228 °С и плотностью 1,33 г/см<sup>3</sup>. При рафинировании кристаллы  $\text{Mg}_3\text{Sb}$  ликвидируют и их удаляют с поверхности ванны.

**Свинцовые припои.** Все припои на основе свинца склонны к ползучести вследствие низкого предела текучести у этого металла. Ползучесть может быть обусловлена межзеренным скольжением или удлинением каждого зерна сплава. Для блокирования скольжения по границам зерен и ограничения движения дислокаций в кристаллической решетке зерен, способствующего их деформации, в припой вводят серебро и сурьму. Следует отметить, что полезное действие этих элементов было известно и раньше и было реализовано при разборке припоев типа ПОС 61 с низкой склонностью к ползучести.

Чистый свинец пригоден в качестве припоя при пайке многих металлов, так как он слабо с ними взаимодействует. Свинец с медью, железом, никелем, кобальтом, алюминием, цинком образует диаграммы монотектического типа и поэтому не растворим в этих металлах при низкой температуре. Для активирования взаимодействия свинца с этими металлами и сплавами на их основе в него вводят компоненты, активирующие процесс взаимодействия припоя и паяемого материала и снижающие температуру плавления свинца.

К числу таких компонентов относятся цинк, олово, сурьма, серебро, марганец. Растворимость их, например, при температуре 300 °С, в меди, т. е. в металле, для которого главным образом применяют свинцовые припои, составляет 35 % Zn; 11 % Sn; 3 % Sb; 0,5 % Cd; 0,5 % Ag. Первые три компонента образуют с медью также химические соединения и поэтому содержание их в свинцовых припоях должно было ограничено количеством, сверх которого между паяемым металлом и припоем при пайке могут образовываться прослойки хрупких химических соединений, понижающие статическую и вибрационную прочность паяных соединений.

Максимальное содержание этих элементов в свинцовых припоях обычно не превышает 5 % Sb, 5 % Zn, 20 % Cd, 30 % Sn. Для некоторых специальных целей (при пайке свинца) содержание сурьмы может быть более высоким. Например, при газопламенной пайке свинцовых клемм аккумуляторных батарей применяют припой Pb — 11 % Sb, т. е. доводят содержание сурьмы до эвтектического, что позволяет снизить температуру плавления припоя до 252 °С. Такой припой малопластичен, и его закладывают в зазор перед пайкой.

Длительная прочность свинцового припоя при введении в него сурьмы повышается.

Активирование свинцовых припоев, предназначенных для пайки меди и ее сплавов, достигается также введением в них серебра

Т а б л и ц а 10. Свинцовые припой, легированные кадмием, цинком и сурьмой (по данным В. Коль, Ф. Н. Ринс, В. А. Андерсон)

| Состав припоя, % |      |            | Температура, °C |          |       | Временное со-<br>противление | Сопротивление<br>срезу | Потеря массы за<br>203 дня, % | Способность к об-<br>луживанию меди |
|------------------|------|------------|-----------------|----------|-------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Pb               | Cd   | Zn, Ag, Sb | ликвидуса       | солидуса | пайки |                              |                        |                               |                                     |
| 91,5             | 8,5  | —          | 248             | 276      | 336   | 90,2                         | 48,0                   | 0,198                         | Удовлетворитель-<br>ная             |
| 90               | 10   | —          | 248             | 274      | 334   | 95,0                         | 49,0                   | 0,509                         | То же                               |
| 80               | 20   | —          | 248             | 259      | 319   | 92,1                         | 55,9                   | 0,845                         | »                                   |
| 70               | 30   | —          | 248             | 260      | 320   | 96,0                         | 44,1                   | 0,340                         | »                                   |
| 90,8             | 7,8  | 1,4 Zn     | 237             | 267      | 327   | 112,7                        | 51,0                   | 0,460                         | »                                   |
| 87,5             | 7,5  | 5,0 Zn     | 235             | 368      | 428   | 74,5                         | 40,2                   | 1,028                         | »                                   |
| 79,7             | 17,7 | 2,6 Sb     | —               | 239      | 299   | 100,0                        | 49,0                   | 0,590                         | »                                   |
| 97,5—98          | —    | 2—2,5 Ag   | 304             | 308      | 364 * | 64,7                         | 30,4                   | 0,590                         | Хорошая                             |
| 94—95            | —    | 5—6 Ag     | 304             | 356—380  | 425 * | 62,7                         | 28,4                   | 0,379                         | Удовлетворитель-<br>ная             |

\* В качестве флюса может быть применен водный раствор, содержащий 40 ч.  $ZnCl_2$  и 20 ч.  $NH_4Cl$ , остальное — вода.

и меди. Серебро образует с медью диаграмму состояния эвтектического типа. Реальное значение для пайки меди и ее сплавов имеют эвтектики, богатые свинцом следующих составов (%): 1) 82,5 Pb и 17,5 Cd ( $t_{пл}=248^\circ C$ ); 2) 97,5 Pb и 2,5 Ag ( $t_{пл}=304^\circ C$ ); 3) 87 Pb и 13 Sb ( $t_{пл}=247^\circ C$ ); 4) 99,5 Pb и 0,5 Zn ( $t_{пл}=318,2^\circ C$ ); 5) 81,7 Pb, 17,3 Cd и 1 Zn ( $t_{пл}=245^\circ C$ ).

Двухфазные припои на основе эвтектики 97 % Pb — 2,5 % Ag, состоящие из двух твердых растворов на основе свинца и серебра, более теплостойки, чем двухфазные сплавы Sn—Pb (табл. 10). К таким припоям относятся припой ПСр 3, содержащий ~3 % Ag, и припой Pb — 6 % Ag. Эти припои отличаются пониженной способностью к растеканию и затеканию в зазоры. Соединения из меди, паянные свинцовыми припоями ПСр 2,5 и ПСр 3, подвержены интенсивной коррозии во влажной атмосфере и дождевой воде. Для улучшения этих свойств в свинцово-серебряные припои вводят олово, а также олово и кадмий.

Соединения из меди и латуни, паянные припоями ПСр 3 и ПСр 2,5, теплостойки при температуре до  $150^\circ C$  (длительно) и до  $200^\circ C$  (кратковременно).

Известны и другие припои на основе свинца, содержащие цинк и кадмий следующих составов (%): 1) 99,5 % Pb и 0,5 % Zn; 2) 99 % Pb; 0,5 % Zn и 0,5 % Mg; 3) 99 % Pb и 1 % Zn; 4) 98 % Pb; 1 % Zn и 1 % Cd; 5) 98 % Pb и 2 % Zn; 6) 96 % Pb; 2 % Zn и 2 % Cd.

Высокая стоимость и дефицитность олова привели к замене

припой типа ПОС 30 на свинцовый припой с 3 % Sn. Этот припой при пайке меди образует паяные соединения, более прочные при повышенных температурах. Для еще большего повышения прочности паяных соединений в такой припой вводят небольшие добавки серебра. Одним из таких припоев является припой Pb—2,5 % Sn—0,5 % Ag. На базе этого припоя разработан припой с повышенной коррозионной стойкостью паяных соединений меди в тяжелых условиях эксплуатации автомобильных радиаторов (значительные колебания температуры, механическая вибрация, контактирование с водными растворами переменного состава). Припой, являясь анодом, корродирует в соединении. В механически напряженных трубках радиаторов этому также способствуют пластические деформации при ползучести паяных соединений, приводящие к механическому повреждению пленки оксида на паяном шве. Установлено (Заявка 55-84297 Япония, кл. В 23 К 35/26 С 22 С 11/00), что резкое увеличение склонности к коррозии припоя системы Pb—Sn имеет место при содержании в нем свыше 95 % Pb; при содержании в припое более 5 % Sn на его поверхности образуется стойкая защитная пленка оксида.

Припой с мышьяком Pb—2,5 % Sn—5 % Sb, содержащий до 0,5 As, по данным И. П. Шадоха и Х. В. Керра, имеет улучшенную растекаемость и обеспечивает при пайке латунных автомобильных радиаторов отсутствие пор. Припой с мышьяком и индием Pb—5 % Sn—(0,1÷0,8) % In—(0,1÷2) % As отличается повышенной сопротивляемостью ползучести при длительной работе до температуры 105 °С.

Легирование свинцового припоя Pb—(1÷5) % Ag—(4÷5) % Sn—1 % Bi—0,5 % As теллуrom или селеном (0,01—0,5 %) или медью (0,02—0,5 %), или их смесью, т. е. элементами, резко увеличивающими интервал кристаллизации свинцовых припоев уже при указанном их содержании, а следовательно, небольшом количестве в них включений первичных интерметаллических фаз PbSe или PbTe, снижает пористость паяных соединений, налипаемость припоя на инструмент при абразивной пайке натиранием и намазывание припоя на шлифовальные диски. В узлах системы охлаждения автомобиля, длительно контактирующих в течение сотен часов при температуре 74—93 °С с техническим антифризом или водой, содержащей углерод, бор, кальций, натрий, цинковые припои обеспечивают более высокую коррозионную стойкость соединений, чем свинцовые припои.

По данным А. А. Самарина и других, легирование припоя Pb—(4,7—5,3) % Sb висмутом (3,7—4,3 %) обеспечивает высокую герметичность соединений металлических наконечников со стеклянными цилиндрами после многократной их стерилизации при температуре 200 °С.

Согласно И. Стоксу, введение индия также повышает коррозионную стойкость паяных соединений и снижает окисляемость самих припоев. Замена части кадмия в припое Pb—(10÷20) %

Cd индием в пределах 0,2—7 % обеспечивает повышение прочности и коррозионной стойкости паяных соединений и смачиваемости меди припоем. Введение индия (0,5—10 %) в свинцовый припой Pb — 5 % Zn — (8 ÷ 50) % Bi повышает коррозионную стойкость соединений из алюминиевых сплавов по сравнению со стойкостью соединений из тех же сплавов, паянных припоями Sn—Pb.

Легкоплавкие припои на основе свинца и кадмия для пайки алюминиевых сплавов, обеспечивающие повышенную коррозионную стойкость паяных соединений, имеют следующие составы (%): 1) 10 Sn, ≤ 5 Ag, 0,1, Sb, Pb — остальное,  $t_{пл} = 299^\circ\text{C}$ ; 2) 3—15 Sb, < 0,05 примесей, 0,1—15 Zn, 0,1—5 Ag, Pb — основа,  $t_{пл} = 250 \div 300^\circ\text{C}$  (для ультразвуковой, вакуумной и флюсовой пайки при нагреве в печи и погружением); 3) 5—30 Sn, 1—10 Bi, 0,5—5 Ag, Pb — основа,  $t_{пл} = 240 \div 300^\circ\text{C}$ ; 4) 37—60 Sn, 20—40 Zn, Cd — остальное,  $t_{пл} = 300^\circ\text{C}$  (для флюсовой пайки с хлоридом цинка) [36]; 5) 40 Zn; 40 Cd; 1—2 Cu; 2—10 Sn; 0,5—1,5 Al; 0,5—1 Ag; 0,5—1,5 Ga,  $t_{пл} = 280 \div 300^\circ\text{C}$  (для пайки по гальваническому или термовакуумному подслою Zn, Ni, Cu с нагревом паяльников или в пламени) [Заявка 53-37160 Япония, кл. 12 В 24 (В 23 К 1/00)].

Для пайки стекла с металлом нашел применение свинцовый припой, легированный сурьмой и цинком (Pb — 5 % Sb — 3 % Zn,  $t_{пл} = 297^\circ\text{C}$ ), с температурным коэффициентом линейного расширения  $28,7 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ .

**Кадмиевые припои.** Кадмий слабо взаимодействует с алюминием и железом. С алюминием он образует диаграмму состояния монотектического типа. Поэтому чистый кадмий почти не используют в качестве припоя для алюминия и сталей. Он нашел применение лишь для пайки предварительно латунированных стальных ободов электромашин.

Кадмий с медью образует ряд химических соединений, самое стойкое из которых разлагается при температуре  $563^\circ\text{C}$ . Максимальная предельная растворимость кадмия в меди при температуре  $500^\circ\text{C}$  составляет 2,2—2,7 %, а при  $300^\circ\text{C}$ , вероятнее всего, 0,3 %.

Кривая ликвидуса на диаграмме состояния Cu — Cd весьма пологая, и предельная растворимость меди в жидком кадмии ( $C_{ж}$ ) быстро возрастает с ростом температуры. В связи с тормозящим действием прослойки интерметаллида при температуре 400—450 °C имеет место замедление процесса химической эрозии меди. Поэтому кадмиевые припои до недавнего времени применяли для пайки меди и ее сплавов.

Среди кадмиевых припоев известны сплавы тройной системы Cd—Zn—Ag (табл. 11). Теплостойкость кадмиевых припоев, так же как и свинцовых, повышается при легировании их серебром. Кадмиевые припои имеют более высокую прочность, чем оловянно-свинцовые.

Таблица 11. Кадмиевые припои

| Припой    | Состав припоя, % |         |         |                 | Температура, °С |               |
|-----------|------------------|---------|---------|-----------------|-----------------|---------------|
|           | Cd               | Ag      | Zn      | Другие элементы | ликви-<br>дуса  | соли-<br>дуса |
| K1        | 96,7—94,8        | 2,5—3,5 | 0,8—1,7 | —               | 325             | 300           |
| K3        | 97,45—96,45      | 2,5—3,5 | —       | 0,05 Mg         | 330             | 320           |
| ПСр 3Кд   | 95—97            | 2,3—3,5 | 0,5—1,5 | 0,05—0,1 Mg     | 325             | —             |
| K83—17    | 82,6             | —       | 17,4    | —               | 266             | —             |
| ПСр5КЦН   | 91               | 5       | 2       | 2 Ni            | 355             | 315           |
| ПСр8КЦН   | 84               | 8       | 6       | 2 Ni            | 380             | 330           |
| Cd—5 % Ag | 95               | 5       | —       | —               | 393             | 337           |
| A         | 79               | 5       | 16      | —               | 285             | 270           |

Примечание. Плотность припоев ПСр5КЦН и ПСр8КЦН  $8,8 \text{ г/см}^3$ , отношение электрической проводимости этих припоев к электрической проводимости меди составляет 18,5 и 21,2 %; коэффициент линейного расширения при температурах 100 и 200 °С равен  $31,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $33,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  соответственно.

Припои K1, K3, ПСр 3Кд системы Cd—Ag обеспечивают теплоустойчивость медных паяных соединений до температуры 250 °С (кратковременно). Наиболее теплоустойчивые соединения (до 300 °С) из меди и латуни могут быть получены при пайке припоями системы Cd—Ag—Zn (ПСр5КЦ и ПСр8КЦН). Более высокая теплоустойчивость соединений из меди, паянных этими припоями, по сравнению с теплоустойчивостью самих припоев обусловлена, вероятно, легированием шва медью, перешедшей в шов при пайке. Припои ПСр5КЦ и ПСр8КЦН обладают удовлетворительной пластичностью в литом состоянии.

Для кадмиевых припоев характерно более высокое временное сопротивление ( $\sigma_b \geq 110 \div 200 \text{ МПа}$ ), чем для припоев на основе олова и свинца (18,6 — 42,1 МПа). Высокая прочность кадмиевых припоев не реализуется в паяных соединениях из меди и латуни из-за образования в них малопластичной прослойки интерметаллидов, по которой происходит преждевременное разрушение паяного соединения. Микротвердость светлой фазы (интерметаллида) равна микротвердости латуни; количество интерметаллида в шве возрастает с увеличением длительности процесса пайки, т. е. времени контакта жидкого припоя с медью или медными сплавами. При этом наблюдается все большее охрупчивание паяного шва.

Стали кадмиевыми припоями паяют только после их меднения. Активирование кадмиевых припоев цинком, имеющим высокое химическое сродство с железом, позволило применить их для пайки сталей и одновременно повысить их прочность. Припой такого типа, содержащий 60—85 % Cd, 15—50 % Zn и 0,4—5 % Ni с температурой плавления 290—270 °С, пригоден для пайки не только меди, цинка и латуни, но и сталей, в том числе коррозионно-стойких. Предел текучести стыковых соединений из медного листа толщиной 2 мм, паянных таким припоем, равен 228,3 МПа; между тем временное сопротивление разрыву соединений из того же металла, па-

янных оловянно-свинцовым припоем, составляет 53,9 МПа. Этот припой не содержит серебро и применяется для пайки изделий в электротехнической промышленности и теплообменников. Введение никеля в припой дополнительно активирует и упрочняет его, так как никель образует с железом непрерывный ряд твердых растворов, а с кадмием — фазу типа  $\gamma$ -латуни.

Есть сведения, что введение в припой Cd — Zn натрия (2—5 %) сообщает ему свойства самофлюсуемости и гетерности. Типичный состав припоя, предложенного О. П. Ксенофоновым: 10—20 % Zn; 2,5 % Ni; 0—3 % Ag; Cd — остальное.

Дополнительное упрочнение припоя Cd — (10—40 % Zn возможно при добавлении к нему 0,0001—0,3 % Ca и (или) Mg. Эти добавки также повышают теплостойкость припоя и улучшают его растекаемость. Временное сопротивление разрыву стыковых соединений из низкоуглеродистой стали, паянных этим припоем, составляет 248,9—253,8 МПа (с припоем без этих добавок 210, 7 МПа). Временное сопротивление разрыву соединений при температуре 200 °С составляет 40,2—42,6 МПа, тогда как для соединений, паянных припоем без добавок кальция и магния, в этих же условиях оно равно 28,1 МПа. Коррозионные испытания паянных соединений в течение 500 ч в 3 %-ном растворе поваренной соли показали незначительное снижение их прочности.

Высокие механические свойства и хорошая смачивающая способность припоев Cd—(10—40) % Zn, по данным Иванага Сингитиро, могут быть достигнуты при введении в них титана (0,05—0,5 %) или меди и титана (0,05—1 %). Такой припой пригоден для пайки изделий сложной формы из низкоуглеродистой стали или меди. Добавка в кадмиевые припои серебра в количествах, не вызывающих образования в шве включений хрупкой фазы, обеспечивает высокую прочность и пластичность паяного соединения.

По данным А. М. Робертсона и других, для пайки композиционных материалов на основе матрицы алюминиевого сплава и борволокнистого наполнителя оказался пригодным припой Cd—5 % Ag. Сопротивление срезу соединений при температуре 20 °С равно 83,3 МПа; максимальная температура эксплуатации 315 °С.

Кадмиевые припои (Cd—25 % Sn), имеющие малое электросопротивление, применяют при монтаже ЭВМ и счетных машин.

**Цинковые припои.** Цинк среди других легкоплавких металлов (олова, свинца, кадмия) имеет наиболее высокую температуру плавления (419 °С).

При легировании цинка кадмием, оловом, алюминием температура плавления понижается вследствие образования легкоплавких эвтектик. Наиболее сильно снижается температура начала плавления при легировании цинка оловом (199 °С); эвтектика Zn — Cd плавится при 266 °С, а эвтектика Zn — Al при 382 °С.

При введении в цинк серебра или меди температура плавления цинковых сплавов вследствие образования перитектики повышает-

ся. В настоящее время изучены и применяются в качестве припоев некоторые цинковые сплавы с алюминием, кадмием, медью, серебром, оловом, свинцом, температура расплавления которых находится в интервале 340—480 °С.

Цинковые припои имеют ряд особенностей, определяющих их применение. Подавляющее большинство припоев на цинковой основе отличается относительно низкой пластичностью, невысокой прочностью и плохой способностью к растеканию и затеканию в зазор.

Легирование цинка оловом, алюминием, кадмием приводит не только к снижению температуры начала и конца затвердевания припоев, но существенно влияет на их механические свойства. Так, например, среди сплавов Zn—Sn наиболее прочны и достаточно пластичны сплавы, содержащие 20—30 % Sn. Однако эти сплавы имеют большой интервал кристаллизации (199—375 °С) и, что особенно важно, низкую температуру солидуса и поэтому неперспективны для пайки соединений, работающих в условиях нагрева до температур 200—250 °С. Х. К. Харди показал, что относительное удлинение цинковых сплавов с оловом (20—25 % Sn) в значительной степени зависит от скорости охлаждения при затвердевании. Относительное удлинение сплава, отлитого в кокиль, подогретый до температуры 200 °С, составляет 5,2 %.

Припои системы Zn—Cd отличаются весьма низкой пластичностью даже в том случае, когда содержание в них кадмия достигает 40 % (П300А). Малопластичны и сплавы цинка с алюминием, близкие по составу к эвтектике Zn — 5 % Al ( $t_{пл}=380$  °С).

Пластичность припоев на основе цинка, легированных алюминием, и паянных ими соединений может быть несколько повышена при введении в них 1—5 % Al; при этом температура плавления сплава повышается примерно на 20 °С (припой ПСр5КЦН). Относительно пластичны сплавы цинка с небольшими количествами меди ( $\leq 3$  %). Их прокатывают в фольгу. Технологические характеристики цинковых припоев существенно зависят от состава паяемого металла.

Диаграмма состояния меди и цинка отличается относительно пологой линией ликвидуса. В связи с этим цинковые припои в жидком состоянии вызывают интенсивное развитие химической эрозии меди и ее сплавов в процессе пайки; при этом резко снижается пластичность металла шва. Наиболее целесообразна пайка этими припоями с нагревом ТВЧ, электроконтактным способом и т. п. При пайке цинковыми припоями теплостойкость паяных соединений меди меньше, чем при пайке кадмиевыми припоями. Цинк образует с железом химические соединения; при пайке сталей цинковыми припоями по границе со швом образуются прослойки таких соединений.

Одним из способов предотвращения образования прослоек интерметаллидов по границе паяемого металла и припоя в результате их химического взаимодействия является легирование припоя

элементами, имеющими большое химическое сродство к паяемому металлу, чем основа припоя [14, 15]. К числу таких элементов при пайке стали цинком относятся алюминий. Поэтому все цинковые припои, предназначенные для пайки сталей или железа, в настоящее время легируют небольшими количествами алюминия.

Цинковые припои с кадмием, алюминием и медью применяют чаще всего для пайки алюминиевых сплавов (табл. 12). Важнейшее их преимущество — относительная легкоплавкость и хорошая коррозионная стойкость паянных ими соединений, особенно паяных цинковыми припоями, легированными алюминием и медью.

Цинк с алюминием образует эвтектику и широкую область твердых растворов. Цинковые припои для уменьшения эрозионного действия на алюминиевые сплавы легируют элементами, снижающими их температуру плавления и имеющими низкую предельную растворимость алюминия при температурах пайки. К таким элементам относятся, например, олово и свинец. Однако свинец в отличие от олова, образующего с цинком эвтектику, химически слабо взаимодействует с цинком (диаграмма состояния с монотектикой).

Введение в цинковые припои системы  $Zn-Al-Si$  РЗМ улучшает их плотность и повышает смачивающую способность по отношению к алюминию при пайке и напайке [10] воздушно-пропановым

**Таблица 12. Припои для низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов, образующие паяные соединения с высокой коррозионной стойкостью \***

| Номер припоя | Состав припоя, % |         |           |   | Температура пайки, °С |
|--------------|------------------|---------|-----------|---|-----------------------|
|              | Al               | Cu      | Zn        | Другие элементы   |                       |
| 1            | 7,9—11           | 3,5—4,5 | Остальное | 0,005—0,2 Be  | 440                   |
| 2            | 3—7              | 2—3     | »         | —   | 450                   |
| 3            | 5—7              | 0,5—1   |           | 0,005—0,5 Mg;<br>0,05—0,1 Cr;<br>0,5—0,1 Mn;<br>0,1—0,4 Ni **               | 440                   |
| 4            | 3—6              | —       | »         | 1—2 Mg;<br>1,5—2,5 Cd   | 450                   |
| 5            | 3—4,5            | 2       | »         | 1—3 Ag;<br>0,1—0,8 Mg   | 330—420               |
| 6            | 0,5—1,5          | 0,5—11  | 35—48     | 1—0,8 Si;<br>0,5—11 Cu;<br>0,02—2,2 РЗМ;<br>63,1—25,5 Sn                    | 250                   |
| 7            | 17,2—40          | 4—15    | Остальное | 0,2—2,2 Ag  | —                     |
| 8            | —                | —       | 66        | 34 Cd   | 265—305               |
| 9            | 18—28            | —       | Остальное | 2—2,5 Si;<br>0,5—0,10 Mg;<br>0,06—0,10 Mn;<br>0,01—0,10 Cl;<br>0,01—0,10 Pr | 380—420               |

\* Заявка 54-28253 Японии, кл. 12 В 22 (В 23 К 35/28). Пат. 56-4359 Японии, кл. В 23 К 35/28 С 22 С 18/04. Заявка 52-139646 Японии, кл. 12 В 22 (В 23 К 35/28).

\*\* Может быть до 0,01—0,1 % Ti.

пламенем. Термодинамический анализ показал возможность протекания процесса восстановления оксидов алюминия, марганца, кремния церием и празеодимом. Оксиды магния этими редкоземельными элементами не восстанавливаются.

Соединения, паянные припоем № 1, не корродируют в кипящей воде после выдержки в течение 100 ч (Пат. № 55-60-40 Япония, кл. В 23 К 35/28, С 22 С 18/04), паянные припоем № 4 — имеют хорошую коррозионную стойкость в промышленной атмосфере [30] и сопротивление срезу паяных соединений  $\tau_{ср} = 65,8 \div 74,6$  МПа. Припой № 6 нашел применение для абразивной пайки и для пайки с газопламенным нагревом (по данным Е. А. Подольского и др.), припой № 8 — для ультразвуковой пайки труб погружением, припой № 9 — для флюсовой пайки (по данным А. А. Савицкого и Р. Е. Есинберлина). Коррозионная стойкость припоя № 3 обеспечивается при использовании цинка чистотой 99,99.

Среди припоев на основе цинка нашел применение припой  $Zn - 7\%Cu$  с температурой плавления 350—400 °С. Припой пластичен и прокатывается в фольгу толщиной 100 мкм.

Эвтектики  $Zn-Al$  и  $Zn-Al-Cu$  недостаточно хорошо растекаются по меди и заполняют зазоры. Добавление к ним небольших количеств олова и свинца улучшает заполнение зазоров.

Цинковые припои, легированные значительными количествами алюминия или алюминия и меди, малоприспособлены для пайки меди и латуни из-за плохой растекаемости по этим металлам (даже с наиболее активными флюсами, содержащими хлористый цинк), а также из-за низкого временного сопротивления разрыву паяных соединений, достигающего 14,7 МПа. Не улучшает технологических свойств этих припоев также и легирование серебром (5—35 %).

Способность цинковых припоев, содержащих алюминий и медь (2,5—5 %), к растеканию и затеканию в зазор существенно улучшается при введении в них свинца и олова. Припой ПЦА8М, содержащий 8 % Al, 5 % Cu, 1,4 % Pb, 0,6 % Sn, Zn — остальное, плавящийся в температурном интервале 360—410 °С, вполне удовлетворительно растекается по меди и особенно по латуни с флюсом ФЦ37. Увеличение содержания олова в припоях этого типа до 5 % вызывает их охрупчивание.

Растекание цинковых припоев по меди и латуни улучшается также при введении в них кадмия. Наиболее прочные соединения из меди получают при электроконтактной пайке припоем ПЦА8М с флюсом ФЦ-37.

При пайке соединений из алюминия, меди и стали, работающих при температуре 100—150 °С, Танака Уру и другие предложили припой, содержащий 2—7 % Ag, 1—2,5 % Cu; 1—7 % Al, 0,5—1 % Cr, Zn — остальное. Температура плавления такого припоя 380—415 °С. При низкотемпературной пайке тонкостенных изделий небольшого размера из алюминия, стали или меди может быть

использован цинковый припой, легированный 0,5—0,7 % Ag, 0,5—2,5 % Cu, 0,5—2 % Sn. Температура плавления этого припоя 400—500 °C. Соединения, паянные таким припоем, работают до температуры 200 °C и имеют коррозионную стойкость, более высокую, чем соединения, паянные свинцом или оловянно-свинцовыми припоями.

Содержание тех же компонентов в цинковых припоях, обеспечивающих повышенную теплостойкость, может быть несколько иным: 1,5 % Al, 0,5—2 % Cu, 0,5—0,75 % Sn и (или) 0,05—0,75 % Ni, Zn — остальное. Температурный интервал плавления такого припоя 400—500 °C, временное сопротивление в литом состоянии составляет более 98 МПа. Повышенное сопротивление срезу паяных соединений обеспечивается при введении в него 0,3—1 % Al, 0,03—0,2 % Mg. Магний, вероятно, замедляет развитие межзеренной коррозии цинковых сплавов. Припой может быть использован в виде прутков и прессованной проволоки.

Отмечается, что в цинковых припоях, предназначенных для пайки алюминия и алюминия с медью, бронзой, железом и др. и содержащих 0,5—4,5 % Al, 0,1—4 % Cu, 0,005—0,08 % Mg, до 0,5 % Sn, Zn — остальное, примеси, образующие с цинком легкоплавкие эвтектики, имеют отличный от цинка электродный потенциал и поэтому ускоряют точечную коррозию припоя. Содержание примеси олова, свинца и кадмия в подобных цинковых припоях не должно превышать 0,01 %. Железо не влияет на коррозионную стойкость и смачиваемость цинковых припоев; его содержание как примеси допустимо до 0,1 %. Для обеспечения высокой коррозионной стойкости цинковых припоев их изготавливают из достаточно чистых металлов.

Для пайки алюминиевых сплавов со сталью и медными сплавами рекомендован цинковый припой, содержащий 2—7 % Ag; 1—2,5 % Cu, 1—7 % Al, 0,1—1,5 % Ni. Температура пайки  $t_n = 350$  °C, поэтому припой пригоден для алюминиевых сплавов, упрочняемых в процессе старения. Припой хорошо растекается и смачивает паяемую поверхность; отличается хорошей прочностью и пластичностью.

По Дж. А. Тейлору, в цинковые припои, предназначенные для пайки оцинкованного железа и содержащие Zn—(10—50) % Cd, для упрочнения можно вводить 0,5—2 % Mn, 0,01—0,5 % Li и 0,01—1 % Na. Эти элементы образуют с цинком тонкодисперсные интерметаллиды, входящие в эвтектику, и упрочняют припой. Припой Zn—5 % Al—4,9 % Cu—0,1Mg с температурой плавления 370—454 °C может быть применен для бесфлюсовой пайки алюминия, например телескопических соединений трубчатых деталей после их предварительного лужения; рекомендуемый зазор 25—190 мкм. Есть сведения, что в припоях такого типа для дальнейшего повышения их коррозионной стойкости может быть введен хром (0,05—0,5 %) и повышено содержание магния. Припой, содержащий 0,5—4,5 % Al, 0,4—4 % Cu и 0,1 % Mg, а также 0,05—

0,5 % Cr, отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошей смачиваемостью.

Высокие механические свойства соединений из алюминиевых сплавов, паянных цинковыми припоями, могут быть обеспечены также при введении в припой: 1) 2—7 % Ag, 1—7 % Cu; 0,05—0,15 % Ti или 2) 2—7 % Ag; 1—2,5 % Cu; 1—7 % Al; 0,5—1 % Cr.

## 2. СРЕДНЕ- И ВЫСОКОПЛАВКИЕ ПРИПОИ

**Алюминиевые припой.** Алюминий со многими элементами образует двойные, тройные и четверные эвтектики с температурами плавления от 600 до 29,8 °C (Al—Ca) и даже ниже нуля — до —39,8 °C (Al—Hg).

Большинство тройных и четверных эвтектик, содержащих алюминий, малопластичны и не деформируются. Некоторые тройные эвтектики на основе алюминия исследованы в качестве припоев. Многие из них оказались непригодными для пайки алюминия и его сплавов не только вследствие малой пластичности, но и слабой сопротивляемости коррозии.

Наиболее широкое применение в качестве припоя получила двойная эвтектика Al—11,77 % Si (температура плавления 577 °C) и сплавы на ее основе (табл. 13). В качестве припоев часто применяют и доэвтектические сплавы системы Al—Si с температурой солидуса 577 °C. Эти припои обладают хорошими литейными свойствами и лучшей, чем другие алюминиевые припои, коррозионной стойкостью, меньшей химической эрозионной активностью.

Некоторым недостатком припоев на основе Al—Si является их голубовато-серый цвет по сравнению с белым цветом алюминия и сплавов алюминия, содержащих медь. При анодировании сплавы

Т а б л и ц а 13. Алюминиевые припой \*

| Припой                | Состав припоя, % |       |       |      |        | Температура, °C |         |
|-----------------------|------------------|-------|-------|------|--------|-----------------|---------|
|                       | Al               | Zn    | Cu    | Si   | Mn, Ge | плавления       | пайки   |
| B62                   | 52,5—50,5        | 24—26 | 20    | 3,5  | 1,5 Mn | 490—500         | 505—510 |
| Германиевый-1         | 64,5             | —     | —     | 4,5  | 31 Ge  | 460—480         | 530—550 |
| Германиевый-2         | 66,5             | —     | —     | 5,5  | 28 Ge  | 440—460         | —       |
| 34A                   | 67—65            | —     | 27—29 | 6    | —      | 525             | 530—550 |
| П550A                 | 67               | —     | 27    | 6    | —      | —               | —       |
| П124 **               | 53               | —     | 40    | 7    | —      | 530             | 540—580 |
| П575A                 | 80               | 20    | —     | —    | —      | 575             | —       |
| П590A                 | 89               | —     | 10    | 1    | —      | 590             | —       |
| Эвтектический силумин | 88,3             | —     | —     | 11,7 | —      | 577             | —       |

\* Пайка возможна с флюсом Ф34А.

\*\* Пайка в ваннах из флюсов Ф380, № 17 и др.

на основе Al—Si при содержании более 3 % Si приобретают темно-серый цвет.

При добавке в алюминий 20—30 % Zn и образовании сплавов Al—Zn с относительно небольшим интервалом кристаллизации (например, припой ПАКЦ, П575А) температура их плавления снижается. Сплавы Al—Zn, легированные чистым цинком, имеют сравнительно высокую коррозионную стойкость в условиях умеренной и тропической атмосферы. Сопротивляемость коррозии сплавов Al—Zn значительно снижается при наличии примесей.

Эвтектику Al—33 % Cu с температурой плавления 548 °C не используют в качестве припоя из-за ее хрупкости. Широкое применение нашел эвтектический сплав Al—Si—Cu (Al—CuAl<sub>2</sub>—Si) с температурой плавления 525 °C (припой 34А) и сплавы, близкие к нему, богатые медью, а также сплавы системы Al—Cu—Si, содержащие относительно немного меди и кремния, например припой П590 (10 % Cu и 1 % Si).

Существенный недостаток алюминиевых припоев с германием — их низкая пластичность и неспособность к прокатке при содержании более 13—14 % Ge.

Вполне удовлетворительные технологические характеристики имеют припой следующих составов (%): 1) 5 Si, 31 Ge, Al — остальное ( $t_{пл} = 460 \div 500$  °C); 2) 4 Si, 34 Ge, Al — остальное ( $t_{пл} = 455 \div 485$  °C); 3) 3,5 Si, 36 Ge, Ge — остальное ( $t_{пл} = 422 \div 486$  °C).

Силумин, содержащий магний, оказался вполне пригодным для пайки стеклянных отражателей с алюминиевой подложкой в дорожных знаках и сигналах. Для этой цели использован припой Al—(4—13 % )Si — (4—6 % )Mg в виде плакированного слоя (5—10 % его толщины) на алюминии (паяемом металле). Пайку выполняют после нагрева алюминиевого сплава в интервале температур 566—635 °C с укладкой на него при покачивании стеклянного отражателя (например, в виде шариков), подогретого до температуры 427—538 °C.

По данным К. Н. Башкова и других, легирование силумина Al—(5—12 % )Si—(1,5—6 % )Mg никелем (2—6 % ) позволяет снизить химическую эрозию паяемого металла в припое и повысить прочность паяного соединения.

Другим путем снижения эрозионной активности силумина, содержащего более 1,5 % Mg, является легирование его германием и медью, образующими более легкоплавкие и менее богатые алюминием эвтектики. По данным А. А. Суслова и других, состав такого припоя (%): 5—10 Ge, 5—12 Si, 10—15 Cu, 1—6 Mg, Al — остальное.

Силумины без магния с пониженным содержанием кремния и цинка также образуют прочные и коррозионно-стойкие паяные соединения. Состав припоев (%): Al—(15—22)Cu—(1—5)Si—(7—16)Zn; температура плавления 480—560 °C. Понижение содержания кремния обеспечивает также возможность анодирования

ния паяных швов. Паяное соединение отличается хорошей пластичностью при изгибе, ковке и прокатке. Электросопротивление припоев  $0,000021 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  ( $20\text{—}100^\circ\text{C}$ ); плотность  $3 \text{ г/см}^3$ . Припой пригоден для флюсовой пайки и хорошо затекает в капиллярные зазоры. С уменьшением в припоях содержания меди и введением в них серебра ( $1\text{—}14\%$ ) и индия (менее  $0,2\%$ ) силумины лучше растекаются и образуют более коррозионно-стойкие паяные швы. По данным Нисимура Макото, состав таких припоев (%):  $1\text{—}14 \text{ Cu}$ ,  $3\text{—}5,8 \text{ Si}$ ,  $1\text{—}8 \text{ Zn}$ ,  $1\text{—}14 \text{ Mg}$  и менее  $0,2 \text{ In}$ .

Увеличение в силуминах содержания цинка до  $30\text{—}35\%$ , меди до  $10\text{—}20\%$  (при содержании кремния  $0,3\text{—}10\%$ ) обеспечивает температуру плавления припоев в интервале  $400\text{—}460^\circ\text{C}$ . Эти припои также отличаются высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью, хорошей смачиваемостью и электрической проводимостью. Подобные свойства имеют также припой, содержащие  $0,5\text{—}22\% \text{ Cu}$ ,  $0,5\text{—}14\% \text{ Si}$ ,  $0,5\text{—}55\% \text{ Zn}$  и  $0,05\text{—}1\% \text{ Cr}$ ; температура плавления  $400\text{—}540^\circ\text{C}$ . Введение хрома, по-видимому, способствует повышению их коррозионной стойкости.

Самофлюсуемость силуминов с  $10\% \text{ Si}$  обеспечивается при введении в них  $0,1\text{—}0,001\%$  лантанидов (Заявка 54-95956 Япония, кл. 12 В 22 (В 23 К 35/30). Такой припой лучше применять в виде плакированного слоя на листах паяемого металла ( $5\text{—}10\%$  их толщины). Пайку с таким припоем ведут в вакууме ( $p = 2,66 \times 10^{-3} \text{ Па}$ ). Паяные соединения имеют плавные галтельные участки.

Для бесфлюсовой пайки алюминия в припои вводят легкоиспаряющиеся компоненты: висмут, кадмий, цинк, сурьму, стронций, барий, натрий, литий, фосфор. Припои такого типа  $\text{Al}-(8\text{—}11)\% \text{ Si} - (0,05\text{—}10)\% \text{ K}$ , где K — один из легкоиспаряющихся элементов. Особенно эффективны компоненты: висмут, цинк, кадмий, сурьма, стронций, барий в количествах  $5\text{—}10\%$ . У таких припоев, нанесенных предварительно в виде плакированного слоя, при пайке в результате испарения указанных элементов легко диспергирует пленка оксида алюминия, что обеспечивает процесс пайки в проточной защитной атмосфере или в форвакууме при температуре  $580\text{—}600^\circ\text{C}$  в течение  $3\text{—}10$  мин. Паяные соединения из сплава АМц имеют сопротивление срезу  $98\text{—}137,2 \text{ МПа}$ , высокую коррозионную стойкость в условиях тропиков. Припои такого состава в виде компактных кусков пригодны для капиллярной пайки при условии предварительной их укладки в открытый питатель в верхней детали или для некапиллярной пайки с предварительной разделкой кромок.

**Серебряные припои.** Большие возможности для изменения свойств припоев дает легирование серебра медью, поэтому большинство серебряных припоев содержат медь. Для системы сплавов  $\text{Ag}\text{—}\text{Cu}$  характерно образование простой пластичной эвтектики с  $72\% \text{ Ag}$  и температурой плавления  $778^\circ\text{C}$ . Высокая пластичность двухфазных сплавов системы  $\text{Al}\text{—}\text{Cu}$ , состоящих из твердых

растворов на основе серебра и меди,— одна из основных причин их применения в качестве припоев.

Припой Ag—Cu не содержит элементов с высоким давлением пара, имеют низкое электросопротивление и пригодны для пайки вакуумной аппаратуры.

Способность цинка резко снижать температуру плавления серебряных и медных сплавов используют при введении его в припой системы Ag—Cu. Малая стоимость цинка имеет при этом немаловажное значение.

Для сохранения двухфазности припоев Ag—Cu—Zn количество цинка не должно превышать 21 % при значительном содержании меди, необходимой для его удержания в твердом растворе (рис. 22). По составу припой Ag—Cu не выходит за область существования  $\alpha_1$ -, 2- или  $(\alpha_1 + \alpha_2)$ -фаз (табл. 14).

Временное сопротивление литых припоев системы Ag—Cu—Zn марок ПСр 25 и ПСр 45 равно соответственно 274,4 и 294 МПа, а сопротивление срезу соединений из латуни Л62 составляет 221 МПа после пайки припоем ПСр 25 и 279,3 МПа после пайки припоем ПСр 45.

Кадмий и олово позволяют еще больше снизить температуру ликвидуса как однофазных, так и двухфазных сплавов на основе Ag—Cu, но растворимость этих элементов в серебре и меди меньше, чем цинка, и образующиеся интерметаллиды сильно снижают пластичность и прочность сплавов; так, 1 % Cd снижает температуру плавления меди на 7,5 °С, но введение в нее 2 % Cd вызывает образование хрупкой фазы  $\text{Cu}_2\text{Cd}$ . Растворимость кадмия в серебре больше ( $\sim 40\%$ ), чем в меди, поэтому в сплавах

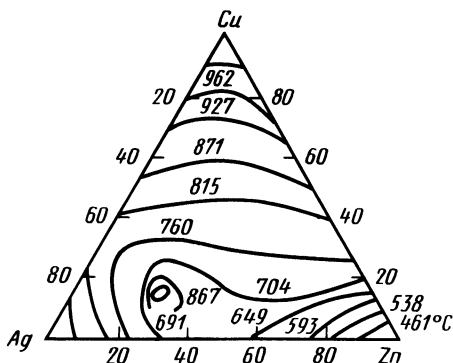


Рис. 22. Поверхность ликвидуса сплавов системы Ag—Cu—Zn

Таблица 14. Серебряные припои, содержащие медь

| Припой   | Состав припоя, % |        | Температура **, °С |         | Плотность, г/см <sup>3</sup> |
|----------|------------------|--------|--------------------|---------|------------------------------|
|          | Ag               | Cu     | ликвидуса          | пайки   |                              |
| ПСр 92 * | 92,5             | 7,3    | 890                | 899—930 | 9,9                          |
| ПСр 72   | 72               | 28     | 778                | 780—900 | 9,9                          |
| ПСр 71   | 67               | 33     | 645                | 825—840 | 9,8                          |
| ПСр 50   | 50±0,5           | 50±0,5 | 850                | 850—950 | 9,3                          |

\* Содержит  $\sim 0,2\%$  Li

\*\* Температура солидуса припоев 779 °С.

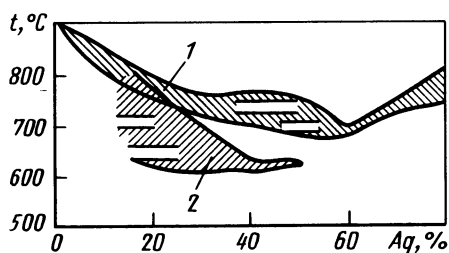


Рис. 23. Температурные области кристаллизации серебряных припоев:

1 — трехкомпонентного; 2 — четырехкомпонентного

систем  $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Cd}$  и  $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Zn}$  можно снизить температуру плавления, сохранив двухфазную структуру  $\alpha\text{Ag} - \sigma\text{Cu}$ , что труднее

сделать в сплавах, содержащих вместо кадмия олово. Сплавы  $\text{Ag} - \text{Cu}$  послужили основой для разработки относительно легкоплавких припоев системы  $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Zn}$ .

Достаточная пластичность припоев четверной системы возможна при соотношении элементов, обеспечивающих температуру ликвидуса не ниже  $605^\circ\text{C}$ , а температуру солидуса не ниже  $590^\circ\text{C}$ . Некоторые из этих припоев обладают тем свойством, что их температура пайки может находиться ниже температуры ликвидуса. Наименьшая температура пайки стали пластичными припоями системы  $\text{Ag} - \text{Zn} - \text{Cd} - \text{Cu}$  равна  $610^\circ\text{C}$  при содержании в них 40 %  $\text{Ag}$ .

Припой этой системы с более широкими интервалами кристаллизации (например, припой ПСр 37,5) удобен для пайки изделий с зазорами шириной до 0,5 мм, а припой с более узким интервалом кристаллизации (например, припой, содержащий 40 %  $\text{Ag}$ , 20 %  $\text{Cd}$ , 19 %  $\text{Cu}$ , 21 %  $\text{Zn}$ ;  $t_{\text{пл}} = 630 \div 595^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{н}} = 610^\circ\text{C}$ ), — для пайки изделий с относительно небольшими зазорами ( $\leq 0,2$  мм).

Для создания преимущественно двухфазной структуры в этих сплавах с достаточной пластичностью содержание меди не должно быть ниже 25 %, суммарное содержание цинка и кадмия не выше 40 %. Эти припои содержат серебро и медь в соотношении, близком к таковому в эвтектике  $\text{Ag} - \text{Cu}$ . Замена части цинка кадмием в припоях, состоящих из  $\alpha_1$ - и  $\alpha_2$ -фаз, приводит к повышению температуры ликвидуса. Растворимость кадмия в меди весьма незначительна по сравнению с растворимостью цинка в меди, а также кадмия в серебре.

Эти сплавы имеют двухфазную структуру, характерную для двойной эвтектики  $\text{Ag} - \text{Cu}$  с небольшим количеством избыточных первичных фаз. Типичное изменение температурного интервала кристаллизации припоев системы  $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Zn} - \text{Cd}$ , по Г. Р. Брукеру и Е. В. Битсону, представлено на рис. 23. Дальнейшее понижение температуры плавления припоя ПСр 40 путем повышения содержания цинка или кадмия сопровождается появлением в нем значительного количества интерметаллидной фазы и резким охрупчиванием.

Соединения, паянные припоями системы  $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Zn} - \text{Cd}$ , теплостойки примерно до  $400^\circ\text{C}$ , а припои системы  $\text{Ag} - \text{Cu} - \text{Zn} -$

до температуры 500 °С в связи с упрочнением твердого раствора на основе серебра. При пайке сталей двухфазные припои на основе Ag—Cu имеют важное преимущество по сравнению с припоями на основе  $\alpha$ -латуней: они не проникают по границам зерен. Это связано с более низкой температурой плавления припоев первой системы, когда диффузионные процессы протекают с меньшей скоростью.

Значительное снижение температуры плавления припоев системы Ag—Cu может быть достигнуто легированием их сурьмой в количестве 10—30 %. Однако такие припои имеют низкую пластичность и поэтому применяются весьма ограниченно.

Олово по своему действию на температуру плавления припоев Ag—Cu подобно кадмию и цинку. Так как растворимость олова в серебре и меди значительно меньше, чем кадмия и цинка, то его вводят в серебряные припои в сравнительно небольших количествах. В противоположность цинку и кадмию олово обладает малым давлением пара, поэтому припои системы Ag—Cu—Sn могут применяться для пайки вакуумных приборов в отличие от припоев системы Ag—Cu—Zn—Cd. В припоях, применяемых для пайки вакуумных приборов, содержание цинка и кадмия не должно превышать 0,005 %.

Количество олова, вводимого в серебряные припои, чаще всего составляет 3—5 %, хотя известны отдельные случаи применения припоев с 10—15 % Sn (табл. 15).

Олово в небольших количествах (5—7 %) вводят в припой ПСр 92 (Ag—7,5 % Cu) для повышения коррозионной стойкости в атмосфере, содержащей H<sub>2</sub>S и SO<sub>4</sub>, а также в морской воде или при нагреве на воздухе. Одновременно увеличиваются твердость, прочность и электросопротивление припоя.

Серебро является хорошей основой для создания припоев с более высокой температурой пайки (выше температуры его плавления). Для этой цели используют легирование серебра элементами, образующими с ним непрерывный ряд твердых растворов (Au, Pd) или хорошо растворимых в нем (Mn). В серебряные припои вводят также никель. Никель с серебром очень мало растворимы в твер-

Т а б л и ц а 15. Серебряные припои с оловом

| Марка или номер припоя | Состав припоя, % |           |           |           | Температура, °С |           |
|------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------|
|                        | Ag               | Cu        | Zn        | Sn        | солидуса        | ликвидуса |
| ПСрМО 68—27—5          | 68               | 27        | —         | 5         | 655             | 765       |
| ПСр 62                 | 62 ± 0,5         | 28 ± 1    | —         | Остальное | 650             | 723       |
| 1 *                    | 48—50            | 12,2—13,2 | 14,4—12,6 | 0,9       | —               | —         |
| 2                      | 38               | 42        | 16        | Остальное | —               | 800       |
| 3                      | 56               | 22        | 17        | 5         | 620             | 670       |
| 4                      | 53               | 32        | —         | 15        | 670             | 690       |

\* Припой содержит 25,3—26,7 % Cd.

дом и в жидком состояниях, поэтому никель вводят только в двухфазные сплавы, содержащие медь, в которой этот металл растворяется.

Введение в серебро марганца несколько повышает температуру ликвидуса. Содержание марганца в припоях системы Ag—Mn обычно не превышает 25 % (с целью сохранения однофазности). Дальнейшее увеличение содержания марганца снижает пластичность припоев. Температура ликвидуса припоя Ag—15 % Mn составляет 980°C, температура пайки ~ 1000 °C.

Припой Ag—15 % Mn пригоден для работы до температуры 425 °C, тогда как припой ПСр 72 пригоден для изделий, работающих при температуре не выше 370° C. Однако соединения из хромистых сталей, не содержащих никеля, паянные припоем Ag—15 %Mn, склонны к щелевой коррозии. По мнению С. Н. Систера и др., легирование серебряных припоев никелем (2—2,5) % предотвращает развитие щелевой коррозии в пограничных слоях между сталью и паяным швом вследствие образования между ними промежуточного тонкого слоя никеля.

Легирование припоев системы Ag—Cu марганцем или марганцем и никелем позволило улучшить некоторые их свойства. Первоначально никель и марганец добавляли в серебряно-медные припои для их осветления, но, как оказалось впоследствии, они имеют и другое важное значение. В зависимости от соотношения никеля и марганца можно изменять цвет, температуру плавления и прочность припоев; никель (входя в твердый раствор) повышает, а марганец снижает температуру ликвидуса серебряных припоев, содержащих значительное количество меди, и повышает теплоустойчивость соединений (ПСр 37,5). Прочность серебряных припоев повышается при добавке никеля без снижения пластичности.

В припоях системы Ag—Cu—Mn марганец также служит хорошим раскислителем. Жидкотекучесть, смачиваемость и прочность припоев системы Ag—Cu—Zn повышаются при введении в них марганца и никеля. Поэтому в серебряно-медные припои обычно вводят 1—5 % Ni и 5—15 % Mn.

Весьма перспективен легирующий компонент серебряных припоев — палладий. Легирование припоев Ag—Mn палладием (20—30 %) повышает рабочую температуру паяных швов стальных изделий более чем на 200 °C. При пайке серебряно-марганцевыми припоями с палладием Ag—Pd—Mn необходима сравнительно высокая температура.

Припои такого типа, содержащие палладий (64 % Ag—33 % Pd — 3 % Mn, температура пайки ~ 1200—1230 °C и 75 % Ag — 20 % Pb — 5 % Mn, температура пайки 1120 °C), нашли применение за рубежом. Согласно М. Д. Белвару, эти припои сохраняют достаточно высокую прочность до температуры 650 °C, но при температуре 800 °C имеют низкую жаростойкость, а временное сопротивление достигает 48—75,5 МПа.

Введение палладия в серебряные припои способствует

также улучшению смачивающей способности их при пайке сталей. Припой Ag — Cu — Pd (рис. 24) и Ag — Pd — Mn в жидком состоянии не вызывают химической эрозии стали и поэтому пригодны для пайки тонкостенных конструкций. Соединения из коррозионно-стойких сталей, паянные припоями Ag — Pb — Mn, менее склонны к коррозии, чем соединения, паянные припоем Ag — Mn.

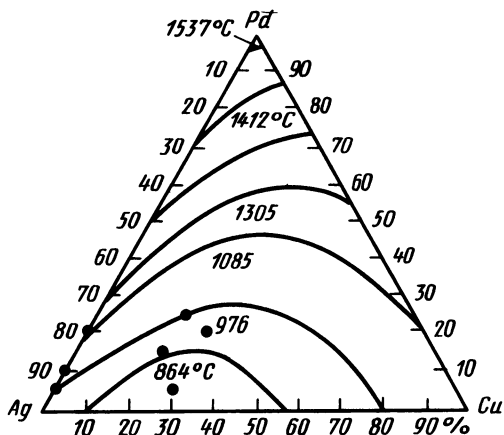


Рис. 24. Поверхность ликвидуса сплавов системы Pd—Cu—Ag

Припой Ag—Pd—Mn применяют для пайки сталей, никелевых сплавов со сплавами на основе никеля, меди, кобальта, золота, железа, молибдена, вольфрама и др. Палладий в припое ПСр 72 способствует повышению прочности и коррозионной стойкости в паяных соединениях. Легирование серебра 10—12 % Pd, как показал Д. В. Руза, оказывается достаточным для снижения угла смачивания до нуля в сухих водороде или аргоне, а при 20 % Pd и в непросущенных водороде или аргоне — при пайке сталей. Введение 6 % Pd в припой ПСр 72 обеспечивает высокую вакуумную плотность паяных швов.

Небольшие количества фосфора ( $\sim 1\%$ ) при пайке меди и литья (0,2—0,5 %) при пайке сталей делают серебряные припой системы Ag — Cu способными к самофлюсованию. Припой ПСр 71, легированный 1 % P, хорошо растекается без флюса по меди на воздухе (при условии достаточно быстрого нагрева при пайке).

Большое значение для свойств паяных соединений из сталей имеют примеси некоторых элементов в серебряных припоях. Чрезвычайно вредны примеси алюминия, кремния, фосфора, серы.

При содержании в серебрянных припоях более 0,01 % Al (алюминий может попадать в жидкий припой, в частности, из алюминиевой бронзы или сплавов Al—Ni—Co при пайке их со сталью) образуются малопрочные соединения из-за повышенной хрупкости, обусловленной образованием на границе шва со сталью хрупких интерметаллидных прослоек.

Содержание кремния в паяных швах исходя из этих соображений должно быть также ограничено. Паяные соединения из кремнистых сталей с  $\geq 2\%$  Si, выполненные серебряными припоями, отличаются пониженной пластичностью, которая обусловлена образованием хрупкой прослойкой фазы Fe<sub>3</sub>Si между сталью и паяным швом. Паяные швы, выполнение припоем ПСр 72, в кото-

ром 1 % Ag заменен кремнием, при изгибе легко отслаиваются от основного металла по хрупкой интерметаллидной прослойке, богатой кремнием.

Примеси сотых долей процента фосфора в серебряных припоях существенно ухудшают пластичность и прочность паяных соединений из сталей. Подобное действие фосфора обусловлено образованием по границам шва и паяемого металла прослойки химического соединения  $\text{Fe}_3\text{P}$ .

Аналогично этому попадание в паяные швы, выполненные серебряным припоем, серы, например при пайке автоматных сталей, содержащих до 0,3 % S, приводит к снижению прочности и сопротивления срезу паяных соединений вследствие образования хрупких прослоек по границе шов — основной металл. В серебряных припоях (> 25 % Ag) допускается суммарное содержание Fe, Mn, Si, Al, P не более 0,5 %, что сохраняет временное сопротивление разрыву паяных соединений на уровне до 490 МПа.

Замена части серебра никелем и марганцем (в сумме 10—16 %) повышает жаропрочность припоев (например, припой 49 % Ag — (10—16) % Ni или Mn, остальное Cu). По данным Н. Вуиха, эти припои пригодны для пайки молибдена и вольфрама.

Н. Н. Турская предложила заменить никель палладием (1—5 %), германием (9—11 %). Содержание серебра в таких припоях составляет 9—11 %, Cu — остальное. Температура пайки 940—970 °С. Соединения, паянные такими припоями, стойки в тропической атмосфере и не испаряются в вакууме.

О. Кнотек установил, что сохранение высоких механических свойств, характерных для соединений, паянных припоями с 40 % Ag, может быть обеспечено и после пайки припоями, содержащими серебро в пределах  $30 \leq \text{Ag} \leq 40$  %, при условии, если содержание меди и цинка определяется по формулам:  $\% \text{Cu} = 19 + 0,8(40 - \% \text{Ag})$  и  $\% \text{Zn} = 22 + 0,2(40 - \% \text{Ag})$ , Cd — остальное. Предложены припои, содержащие 13—28 % Ag, 25—40 % Cu, 20—35 % Zn, 10—25 % Cd, легированные 0,5—5 % Ni и 0,05—0,5 % Si. У этих припоев электросопротивление, коррозионная стойкость и механические свойства не ниже, чем у припоев, содержащих более 38 % Ag.

Полагают, что медь обеспечивает прочностные и пластические свойства серебряных припоев, кадмий — их растекаемость, олово — стабильность температурного интервала плавления, цинк улучшает технологичность припоя, особенно при пайке коррозионно-стойких сталей, марганец и никель способствует измельчению структуры и повышению пластичности припоев.

Соединения из коррозионно-стойких сталей, паянные серебряными припоями системы Ag—Cu—Zn—Cd с 50 % Ag, легированные 3 % Ni, имеют высокую стойкость в морской воде и каустике. Соединения, паянные припоями системы Ag—Cu—Zn с 40 % Ag, легированные 2 % Ni, нашли применение в пищевой промышленности [16].

Легирование палладием и никелем медно-серебряных припоев повышает их температуру плавления. Такие припои отличаются высокой смачивающей способностью при пайке сталей, почти полным отсутствием химической эрозии паяемого металла, высокой теплопроводностью и в жидком состоянии не вызывают охрупчивания паяемого материала при их контакте. Состав таких припоев (%):

1) (1—7,5) Cu—(0,5—3,5) Ni—(1—10) Pd, Ag — остальное и 2) (3,9—4,9) Cu, (0,9—1,2) Ni, (4,5—5,2) Pd, Ag — остальное. Содержание примесей в припоях не должно превышать 0,15 % [16].

По данным Р. Е. Ковалевского, аналогично действуют в серебряно-медных припоях с литием или бором добавки кобальта (0,2—2,5 %) или газопоглощающих металлов — титана, циркония, галлия, всего в количестве 0,6 %. Такие припои пригодны и для пайки металлов с керамикой.

Добавки индия и олова в серебряно-медные припои обеспечивают высокую их смачивающую способность и прочность шва.

Припои системы Ag — Cu — Sn пластичны и при определенном соотношении компонентов более легкоплавки, чем припой ПСр 72, но обладают примерно в 10 раз меньшей электрической проводимостью, чем эвтектический припой системы Ag—Cu. Припой Cu—60 % Ag—10 % Sn имеет температуру плавления на 80 °С ниже, чем припой ПСр 72; его температура плавления 598—713±5 °С, интервал кристаллизации 115 °С.

Припой (10—15) % Ag—(5—60) % Cu—(30—35) % Sn плавится в интервале температур 570—680 °С, имеет  $\sigma_b = 235,2$  МПа, а припой (20—30) % Ag—(40—50) % Cu—(25—30) % Sn плавится в интервале температур 495—680 °С и его  $\sigma_b = 235,9 \div 254,8$  МПа.

Сталь и ковар в контакте с жидким припоем такого состава склонны к охрупчиванию и поэтому должны перед пайкой гальванически быть покрыты слоем никеля (3—5 мкм). Паяные соединения из стали 50 после пайки в водороде имеют  $\tau_{ср} = 146,0 \div 430$  МПа, а после пайки в газовом пламени  $\tau_{ср} = 166,6$  МПа, т. е. ниже, чем у соединений из той же стали, паянных припоем ПСр 72 ( $\tau_{ср} = 179,3$  МПа).

Особенно заметное активирование серебряных припоев при пайке хромоникелевых сталей, бронз, керамики, ковара, композиционных сплавов с вольфрамом обеспечивается при легировании их титаном, цирконием и индием. Один из таких припоев имеет состав (%): 68,8 Ag, 26,7 Cu, 4,5 Ti. В припой могут входить кремний, олово, германий, марганец, никель, кобальт в количестве всего до 50 % [16].

Для пайки керамики в вакууме использован порошковый припой состава (%): 42 Ag, 18 Cu, 35 Pb, 5 Ti; температура плавления припоя 860 °С. Свинец введен для понижения температуры плавления и уменьшения коэффициента линейного расширения, который у такого припоя меньше, чем у керамики. Поэтому при высокотем-

пературной пайке обеспечивается плотный контакт между керамикой и кольцом припоя. Для соединения керамики из  $Al_2O_3$  с коваром использовали припой: 72 % Ag — 28 % Cu и 64 % Ag—26 % Cu—10 % Sn, в которые вводили 2—4 % Ti; пайку вели в вакууме при температуре 850—940 °C.

Припой с повышенным содержанием титана обычно изготавливают прессованием из смеси порошков, составляющих металл. Пайку керамики [ $\alpha = (7-5,5) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ] с металлами, имеющими существенно больший коэффициент линейного расширения, выполняют серебряными припоями, содержащими титан или цирконий в количестве не менее 30 %; температура плавления припоя при этом достигает 1260—1280 °C. Это позволяет избежать образования трещин в керамике и в паяном шве. Однако при содержании в припое титана или циркония более 70 % соединения имеют низкую прочность. Оптимальный по составу припой 45 % Zr—0,5 % Li — Ag. Пайку таким припоем ведут в сухом аргоне. Титан и цирконий в припой лучше вводить в виде гидратов, которые необходимо смешивать с порошком серебра с литием, точно выдерживая состав припоя.

Припой Ag—5 % Al и Al—5 % Ti при пайке титана обладают хорошей растекаемостью и образуют плавные галтельные участки. Температура плавления припоев 913 °C. Однако соединения из титана, паянные этими припоями, имеют пониженную прочность и коррозионную стойкость. Снижение температуры плавления серебряных припоев достигается при легировании их легкоплавкими элементами, например оловом, но при этом вследствие образования в шве химического соединения титана с оловом и повышения диффузионной пористости происходит снижение пластичности паяного соединения. Легирование припоев осологоплавким элементом — галлием позволяет сохранить высокие механические свойства паяного шва и снизить температуру пайки на ~60 °C.

Припой 75 % Ag—5 % Mn—20 % Pd обладает низкой эрозивной активностью при пайке коррозионно-стойких сталей и нашел применение для пайки тонкостенных трубок камер сгорания ракетного двигателя; припой 68 % Ag—27 % Cu—5 % Pd применяют для соединения магнетронных трубок, припой 65 % Ag—20 % Cu—15 % Pd — для впаивания бериллиевых окон в корпуса из молибдена в рентгеновских трубках [16].

Сплавы системы Ag—Cu—Sb с температурой плавления в требуемом интервале температур хрупкие, тем не менее некоторые из них нашли применение для пайки слаботяжелых медных изделий (главным образом электротехнического назначения) (табл. 16).

Таблица 16. Припои из сплавов системы Ag—Cu—Sb

| Состав припоя, % |    |      | Температура плавления, °C |
|------------------|----|------|---------------------------|
| Ag               | Cu | Sb   |                           |
| 60               | 20 | 20   | 480                       |
| 70               | 20 | 10   | 520                       |
| 60               | 19 | 19,5 | 480—500                   |

Примечание. Последний припой содержит 1—1,5 % Р.

Последний припой (см. табл. 26), по данным рентгеноструктурного анализа, состоит в основном из фазы  $(\text{Ag}, \text{Cu})_3\text{Sb}$ , имеющей плотно упакованную гексагональную кристаллическую структуру с параметрами:  $c = 4,71 \cdot 10^{-10}$  м;  $a = 2,91 \cdot 10^{-10}$  м;  $c/a = 1,62$ . Добавка фосфора делает припой самофлюсующим при пайке меди. Первый и третий припои применяют для пайки электрооборудования. Сделаны попытки снижения содержания серебра в припоях с сурьмой. Для этого в них введены цинк и кадмий. Припой  $\text{Ag}—40\% \text{ Cu}—20\% \text{ Zn}—10\% \text{ Cd}—20\% \text{ Sb}$  имеет температуру ликвидуса  $460^\circ\text{C}$ . Для улучшения механических свойств припой может быть легирован никелем, палладием, кремнием, кобальтом, литием, всего до  $10\%$  каждого или в сумме. Температура ликвидуса таких припоев не превышает  $549^\circ\text{C}$ , припои пластичны и пригодны для пайки металлов высокой плотности [16].

Припой  $72\% \text{ Ag}—28\% \text{ Cu}$  обладает высокой теплопроводностью и поэтому пригоден для пайки соединений из разнородных металлов, обладающих весьма различными коэффициентами теплопроводности, или при большой разностенности деталей.

Понижение высокой теплопроводности серебряных припоев достигается введением в них индия и палладия вместо серебра в количествах  $5,5\% \text{ In}$  и  $2,2\% \text{ Pd}$ . Припой  $92,5\% \text{ Ag}—7,4\% \text{ Cu}—0,2\% \text{ Li}$ , применяемый для пайки сотовых панелей из коррозионно-стойких сталей, при введении в него индия и палладия в указанных количествах приобретает низкую теплопроводность, что предотвращает передачу теплоты в паяемом изделии при эксплуатации.

Паяные соединения электровакуумных приборов, как правило, должны обладать высокой вакуум-плотностью. Поэтому они не могут содержать компоненты с высокой упругостью испарения, такие, как сурьма, цинк, кадмий. Вместо этих важнейших депрессантов серебряных припоев в них вводят легкоплавкие и особолегкоплавкие элементы, такие, как олово и галлий.

Серебряные припои с большим содержанием олова или германия малопластичны, и поэтому фольгу из них готовят в виде слоистых лент, состоящих из пластичных составляющих припоя.

Для пайки радиотехнических устройств из меди, никеля, серебра Н. Н. Тугорская и другие предложили припой ПСрОМ 425, содержащий  $41—44\% \text{ Ag}$ ,  $8,5—11,5\% \text{ Cu}$ ,  $46—49\% \text{ Sn}$ , с температурой плавления  $462—214^\circ\text{C}$ , упругостью пара при температуре  $450^\circ\text{C}$  менее  $0,133 \cdot 10^{-6}$  Па. Этот припой применяют для пайки серебра, меди, никеля в вакууме ( $p = 0,133 \cdot 10^{-2}$  Па) или в защитных средах. Припой в литом состоянии не прокатывается, и поэтому его изготавливают в виде пластичной трехслойной ленты, слою которой состоят из серебряно-медного сплава и олова. Толщина ленты припоя ПСрОМ 425  $\delta = 0,1 \div 0,3$  мм. Соединения, полученные при пайке этим припоем, способны выдерживать многократные ударные нагрузки и термоциклирование с резкими перепадами температуры от  $-60$  до  $250^\circ\text{C}$ ; они стойки при климатических испытаниях.

Припой с низкой упругостью пара системы Cu—Ag—Si состоят из 10—35 % Ag, 0,5—2,2 % Si, остальное — медь. Пригодны для пайки стали в вакууме или в восстановительной атмосфере и хорошо смачивают их. Паяные швы соединений обладают высокой прочностью на изгиб и разрыв.

Вакуум-плотные соединения могут быть получены при применении серебряных припоев, легированных галлием и оловом. По данным Л. Л. Гржимальского и В. С. Расторгуева, такой припой может содержать 69,5—70,7 % Ag, 26,3—37,7 % Cu, 1,7—2,3 % Sn, 0,8—1,2 % Ga.

Для пайки сталей и алюминиевых сплавов предложены припои без кадмия и цинка, легированные оловом и индием, с температурой плавления 580—640 °С. Температуру плавления, равную 600 °С, имеет припой Ag—31,4 % Cu—11,5 % Sn—14,9 In.

Для пайки узлов электроприборов и аппаратуры средств связи Иванага Синьитиро предложил припой системы Ag—Al—Ge с температурой плавления 500 °С. Припой малопластичен, трехслойная лента из этого припоя может быть получена путем прокатки; наружные слои ленты состоят из серебра, а между ними находится лист из сплава алюминия с германием, в котором соотношение этих компонентов припоя составляют соответственно от 7:3 до 4:6. В зависимости от соотношения алюминия и германия во внутреннем листе и толщины наружных листов содержание серебра в припое может изменяться от 5 до 50 %. Такой припой хорошо растекается по паяемому металлу. Коррозионная стойкость паяных соединений высокая.

К важнейшим тенденциям легирования среднеплавких серебряных припоев за последние 10 лет можно отнести снижение в них дефицитного серебра; исключение кадмия, образующего при пайке токсичные оксиды; упрочнение паяного шва и улучшение его сцепления с паяемым металлом; снижение упругости испарения компонентов припоев при высокотемпературной пайке и в условиях работы паяных соединений в вакууме; повышение коррозионной стойкости соединений из коррозионно-стойких сталей; увеличение смачивающей способности припоев, особенно при пайке сталей; снижение температуры плавления припоев. При этом в значительной степени были использованы современные представления о свойствах и влиянии физико-химического взаимодействия легирующих компонентов серебряных припоев между собой и с паяемыми металлами на технологические, механические, физико-химические свойства паяных соединений.

В связи с необходимостью упрочнения паяных соединений в припой были введены такие элементы, как кремний, марганец, титан, никель, литий, фосфор, палладий. Наиболее эффективными в этом отношении оказались элементы, имеющие высокое химическое сродство по отношению к компонентам и основе паяемых материалов и образующие с ними химические соединения (кремний, фосфор, титан), а также образующие непрерывные ряды твердых

растворов (марганец и палладий). Кобальт и никель менее химически активные элементы: кобальт образует монотектику с медью, нерастворим в серебре и только с железом образует перитектику и ограниченные твердые растворы и поэтому может активизировать смачивание сталей. Никель образует твердые растворы с медью и железом, а с серебром — монотектику и поэтому может относительно слабо упрочнять медную фазу шва и несколько улучшать сцепление шва с паяемым материалом. Судя по диаграммам состояния лития с серебром, медью и железом, этот элемент в припоях, образуя с ними твердые растворы и химические соединения, должен их упрочнять. С медью он образует эвтектику и не взаимодействует с железом.

Исключение кадмия потребовало введения в припой систем:  $\text{Ag—Cu}$  и  $\text{Ag—Cu—Zn}$  других элементов-депрессантов, т. е. понижающих температуру плавления припоя. В связи с этим в припой были введены кремний (2—13%), олово (1—10%), а также индий (Заявка № 54-28253), Япония, кл. 12, В 22 (В 23 К 35/28)), марганец, сурьма, галлий, фосфор.

Такие компоненты, как литий, кремний, германий, индий, бор, кроме того, являются раскислителями оксидов при пайке. Никель, фосфор, хром повышают коррозионную стойкость паяных соединений.

Составы серебряных припоев приведены в табл. 17.

Повышенной способностью к смачиванию отличаются припои № 16, 17, предназначенные для пайки неравномерных зазоров, и № 3 — для хромированных поверхностей. Пригодными для пайки в вакууме и защитных атмосферах являются припой № 4, обладающий минимальной склонностью к ликвации и хорошо заполняющий широкие зазоры, и припой № 19 — очищенный от оксидов. Низким давлением пара в высоком вакууме обладают припои № 21 и 22; сверхпроводимостью отличается припой № 24, который, однако, непригоден для приборов, чувствительных к магнитным полям; наиболее высокую прочность имеют припои № 23 ( $\sigma^{\text{nc}} = 294$  МПа) и № 1 (с кремнием  $\sigma_{\text{в}}^{\text{nc}} = 460,6$  МПа, без кремния  $\sigma_{\text{в}} = 279$  МПа) при относительно высоком удлинении (26,5%). Коэффициент линейного расширения припоя № 1 на 5% ниже, чем коэффициент линейного расширения припоев системы  $\text{Ag—Cu}$ ; малопластичны припои № 15, 24, 26, 27. При содержании марганца в припое № 23 меньше 15% ухудшаются его технологические свойства, а при содержании марганца больше 20% охрупчивается паяный шов.

Серебряные припои системы  $\text{Cu—Zn—Ag—Cd}$  при флюсовой пайке имеют наилучшую растекаемость и смачиваемость по латуни, хуже по меди и хуже всего по стали. По стали лучше всего растекается припой 35,4%  $\text{Ag—25,3\% Cu—21,1\% Cd—18,2\% Zn}$  (В  $\text{Ag-2}$ ).

Следует отметить, что среди припоев с пониженным содержанием серебра припой ПСр 15 не нашел применения как заменитель

Т а б л и ц а 17. Серебряные припой с кремнием, марганцем, никелем и другими элементами

| Номер припоя | Состав припоя, % |                     |       |      |                              | Температура плавления, °С |
|--------------|------------------|---------------------|-------|------|------------------------------|---------------------------|
|              | Ag               | Cu                  | Zn    | Sn   | Другие элементы              |                           |
| 1            | 35               | 61,5                | —     | —    | 3,5 Si                       | 460                       |
| 3            | 40—50            | 20—30               | 25—30 | 1—3  | 0,3—3 Ni                     | —                         |
| 4            | 60               | 30                  | —     | 10   | —                            | 600—720                   |
| 5            | 62               | 20                  | 15    | —    | 3 In                         | 645—495                   |
| 6            | 62               | 20                  | 15    | —    | 3 Ga                         | 650—700                   |
| 7            | 64               | 20                  | 10    | —    | 3 Ga, 3 In                   | 645—649                   |
| 8            | 60               | 20                  | 17    | —    | 2 Ga, 1 In                   | 645—675                   |
| 9            | 57               | 25                  | 15    | —    | 2 Ga, 1 In                   | 650—705                   |
| 10           | 50               | 21,5                | 27    | 1    | 0,5 Ni                       | 660—680                   |
| 11           | 45               | 25                  | 25,5  | 3    | 1,5 Ni                       | 645—700                   |
| 12           | 42               | 21                  | 27    | 2    | 4 Ni, 4 Mn                   | 665—750                   |
| 13           | 39               | 31                  | 27,5  | 2,5  | —                            | 635—710                   |
| 14           | 30               | 36                  | 32    | 2    | —                            | 655—755                   |
| 15           | 57               | 20                  | 13,0  | —    | 10 Ga                        | 530—705                   |
| 16           | 75—90            | 9—24                | —     | —    | 0,5—10 In, 0,5—7 P           | —                         |
| 17           | 37—50            | 17—30               | 17—27 | 1—5  | 0,5—5 In                     | 700                       |
| 18           | 60               | 30                  | —     | 10   | —                            | —                         |
| 19           | 42               | 33                  | —     | 25   | —                            | 540—575                   |
| 20           | 30               | Ос-<br>таль-<br>ное | 25    | 2    | 1—7 In, 1 P                  | —                         |
| 21           | 5—35             | То же               | —     | 1—10 | 0,001—0,8 Li; 10% Fe, Ni, Co | —                         |
| 22           | 5—35             | »                   | —     | —    | 2,5—13 Si; 1—10 In           | —                         |
| 23           | 8—8              | »                   | —     | —    | 15—20 Mn                     | 900                       |
| 24           | 50               | 15,5                | 15,5  | —    | 16 Cd; 3 Ni                  | 680—740                   |
| 25           | 60               | 20                  | —     | —    | 20 Sb                        | 480                       |
| 26           | 70               | 20                  | —     | —    | 10 Sb                        | 520                       |
| 27           | 60               | 19                  | —     | —    | 19,5 Sb; 1,5 P               | 480—500                   |

припоев ПСр 40 и ПСр 45 из-за слишком широкого интервала интенсивной химической эрозии меди по границам ее зерен. При пайке им сталей по границе шва образуются прослойки хрупких химических соединений.

**Медные припой.** Чистая раскисленная медь М0, М1, содержащая малое количество таких примесей, как висмут и свинец (0,02 % Bi, 0,005 % Pb), и не содержащая летучих и других вредных примесей, весьма широко применяется для пайки углеродистых и легированных сталей, никеля и его сплавов в печах.

Медь хорошо смачивает сталь и растекается по ней, имеет более высокую прочность, чем легкоплавкие припой, высокую пластичность и менее дефицитна, чем серебро.

Недостатки меди как припоя заключаются в высокой температуре плавления (1083°С), склонности к образованию кристаллизационных трещин при пайке в окислительной среде (вследствие образования эвтектики Cu—Cu<sub>2</sub>O).

Температура пайки медью находится в интервале 1100—1200 °С (чаще всего 1120—1130°С) в зависимости от легирования

сталей и сплавов. Медью паяют обычно в восстановительной или защитной газовой среде или с применением флюсов.

Особенности взаимодействия меди с другими элементами дают возможность создания припоев на ее основе с широким диапазоном температур пайки (700—1200 °С). При этом используют главным образом следующие особенности меди: образование легкоплавких эвтектик с фосфором при 707 °С и с серебром при 779 °С; образование ограниченных твердых растворов с цинком с узким интервалом кристаллизации; образование непрерывного ряда твердых растворов с марганцем, золотом, палладием, никелем. При легировании меди марганцем температура плавления припоя снижается до 870 °С (при 35 % Мп), золотом — до 889 °С (Au). Легирование меди палладием и никелем вызывает непрерывное повышение температуры плавления припоя.

Кроме перечисленных компонентов медных припоев, в них добавляют олово (для снижения температуры и повышения жидкотекучести), кремний (для снижения температуры плавления, уменьшения испаряемости цинка), для упрочнения, а также для повышения кислотостойкости. Заметное понижение температуры плавления медных припоев достигается легированием их индием. Для упрочнения добавляется железо и кобальт. Некоторые медные припои способны к самофлюсованию при добавке к ним фосфора или лития (иногда в сочетании с бором).

При дуговой пайке в среде защитных газов вместо чистой меди используют медь, содержащую следы щелочных, щелочно-земельных или редкоземельных металлов, легко отдающих электроны при зажигании дуги (например, 0,005 % Zn, 0,003 % Fe, 1,09 % Мп, 2,5 % Si; 0,07 % Се; Cu — остальное), что обеспечивает стабильность дуги при зажигании и высокую производительность процесса пайки [32].

Наиболее легкоплавки медные припои на основе эвтектики Cu—Р. Температура эвтектики считается равной 707 °С при содержании 8,23 % Р или 714 °С при 8,38 % Р. Последние данные более вероятны.

Медно-фосфористые припои очень жидкотекучи и хорошо затекают в зазоры. Вследствие повышенной склонности этих припоев к ликвации пайку следует выполнять быстро. Электрическая проводимость и теплопроводность медно-фосфористых припоев высокая, близкая к тем же свойствам меди, благодаря чему они находят применение в электропромышленности. Недостаток — невысокая пластичность, особенно эвтектического сплава; поэтому их применяют при пайке соединений, не подвергающихся значительным изгибам, ударам и обработке давлением. Медно-фосфористые припои используют для пайки меди, а также (в меньшей степени) для пайки серебра, молибдена и вольфрама.

Хорошее затекание указанных припоев дает возможность выполнять пайку при температуре ниже температуры их ликвидуса.

Припой Cu—8 % Р имеет следующие механические свойства

Т а б л и ц а 18. Механические свойства  
медно-фосфористого припоя Cu —  
8 % Р

| Температура<br>испытания, °С | $\sigma_b$ | $\sigma_t$ | $\delta$ , % | НВ   |
|------------------------------|------------|------------|--------------|------|
|                              | МПа        |            |              |      |
| 20                           | 369        | 363        | 0,27         | 1960 |
| 250                          | 246        | 100        | —            | —    |
| 300                          | 366        | 244        | 36           | 1878 |

в литом состоянии (табл. 18). Припой плохо работает при динамическом нагружении. Электросопротивление проволоки из припоя Cu — 8 % Р диаметром 1,87 мм составляет 6,369 Ом·м (для меди в тех же условиях электросопротивление составляет 6,250 Ом·м). Припой пригоден для газопламенного, печ-

ного, индукционного нагрева и нагрева электросопротивлением [40].

Прочность стыковых соединений из стали или никеля, паянных медно-фосфористым или серебряно-медно-фосфористым припоями, значительно меньше ( $\sigma_b = 237,2$  МПа), чем прочность припоя, что связано с образованием хрупкого слоя фосфидов железа или никеля. Фосфористая медь эвтектического состава имеет  $\sigma_b = 323,4$  МПа.

Медно-фосфористые припои содержат 4—8,4 % Р. Преимущество этих припоев, кроме легкоплавкости и самофлюсования при пайке меди, — хорошая обрабатываемость давлением при температуре 450—650 °С, что позволяет изготавливать из них фольгу, ленту, проволоку, таблетки. Временное сопротивление стыковых соединений из меди и латуни, паянных медно-фосфористыми припоями, составляет 147—176,4 МПа. Для нахлесточных паяных соединений сопротивление срезу равно 235,2—323,4 МПа (при нахлестке от одной до трех толщин образца).

Необходимо учитывать, что паяные соединения из меди и ее сплавов, выполненные припоями системы Cu—Р с содержанием фосфора менее 6 %, подвержены коррозии по границе шва при эксплуатации в сернистой атмосфере, например в атмосфере целлюлозно-бумажных заводов. При этом введение в припои 0,5—8 % Zn улучшает коррозионную стойкость паяных соединений.

К элементам-депрессантам, разбавляющим медно-фосфористые припои, относятся олово и свинец. Олово вводят в припои в количестве, меньшем его предела растворимости в твердой меди при температуре 770 °С. Олово, кроме понижения температуры припоя, разбавления его и снижения в нем содержания фосфидов меди, служит в известной степени упрочнителем. Припой такого типа содержит 6—7 % Р, 2,5—3,5 % Sn, а также сурьму (1—3 %), активно химически взаимодействующую с оловом и медью. Легирование припоя сурьмой в таком большом количестве не способствует повышению его пластичности.

Легирование Cu—Р припоев свинцом в пределах 5—25 % позволяет обеспечить в структуре припоя значительное количество монотектики Cu—Pb.

Т. Н. Малин предложил вводить в медно-фосфористые припои 0,05—36 % Pb. Состав такого припоя (%): 4,4—8 Р, 0,05—5 Pb, Cu — остальное или 3—8 Р, 5—25 Pb, Cu — остальное.

Другое направление легирования медно-фосфористых припоев с целью снижения в них содержания фосфора и сохранения достаточно низкой температуры плавления — введение в них 28 % Zn и (0,3—0,5 %) Ni + Sn; температура плавления припоев 700—750 °С; временное сопротивление в литом состоянии 176—215 МПа. При пайке содержание фосфора в шве снижается до 3,5 %, возрастает температура распайки. Припой хорошо заполняет большие капиллярные зазоры.

Фосфор активно соединяется с серебром и образует соединения  $\text{AgP}_2$  и  $\text{AgP}_3$ . Фосфор растворим в жидком серебре при температуре 925 °С до 1,5 %, но при затвердевании интенсивно выделяется в виде элементарного фосфора. Введение в припой системы Cu—P—Si более 3 % Ag повышает ударную вязкость паяных соединений из латуни, что, возможно, обусловлено частичным испарением фосфора из припоя в процессе пайки.

Исходя из этих соображений, С. В. Лашко, О. П. Бондарчук, Г. Н. Уполовникова предложили припой ПМФС 6-0,15 с пониженным содержанием фосфора, легированный кремнием или кремнием и серебром. Пределы содержания легирующих элементов в припое (%): 5—8 P, 0,1—1,5 Si, Cu — остальное. Припой такого состава рекомендован для пайки изделий из меди и латуни, работающих без воздействия значительных ударных нагрузок; температура плавления припоя 725 °С, температура пайки 750—780 °С. Для изделий с повышенной ударной вязкостью паяных соединений предложен припой состава (%): 5—6 P, 3 Ag, 0,15 Si, Cu — остальное; температура пайки 750—780 °С. Данные по сопротивлению срезу соединений из латуни Л63, паянных припоем ПМФС6-0,15 и другими, приведены в табл. 19.

Снижение температуры пайки латуней медно-фосфористыми припоями и некоторое улучшение их технологических и прочностных свойств достигаются введением в них 5—15 % Ag. По К. В. Фролиху, между серебром, медью и химическим соединением существует тройная эвтектика при температуре 646 °С состава (%): 17,9 Ag, 30,4 Cu и 51,7 P или 74,9 Cu, 7,2 P и 17,9 Ag. Эта эвтектика очень хрупкая и непригодна в качестве припоя. Поэтому применяют припои с меньшим содержанием фосфора.

Температура ликвидуса тройных сплавов Cu—P—Ag, так же как и двойных сплавов Cu—P, резко изменяется при незначительном изменении содержания легирующих элементов. Наиболее прочный (на срез) припой—сплав, содержащий 5 % P и 15 % Ag, Cu — остальное. Кроме наиболее распространенного припоя ПСр 15 системы Cu—P—Ag, иногда применяют и другие, приведенные в табл. 20.

Временное сопротивление разрыву соединений из латуни Л62, паянных припоем ПСр 15, равно 245—294 МПа, а предел прочности на срез 480—421,4 МПа. Электросопротивление припоя ПСр 15 составляет  $22 \cdot 10^3$  Ом·м, припоя ПСр 25— $180 \cdot 10^3$  Ом·м.

Более высокую температуру плавления, чем у припоев на основе

Т а б л и ц а 19. Свойства припоев систем Cu — P — Si и Cu — P — Si — Ag и паянных ими соединений из латуни Л63

| Свойства припоев<br>и паяных соединений               | Припой        |                  |
|---|---------------|------------------|
|   | Cu — P — Si   | Cu — P — Si — Ag |
| Температура, °C:                                      |               |                  |
| ликвидуса   | 695—705       | 675—710          |
| солидуса  | 725—745       | 725—735          |
| пайки   | 745—780       | 750—780          |
| Временное сопротивление припоя, МПа                   | 519—539       | 480—637          |
| Площадь растекания, мм <sup>2</sup>                   | 427—430       | 415—417          |
| Краевой угол смачивания, рад                          | 0,0349—0,0355 | 0,0436—0,0442    |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                          | 8 ± 0,09      | 8,2—8,21         |
| Удельное электросопротивление ρ · 10, Ом · м          | 0,423—0,426   | 0,398—0,412      |
| Теплопроводность, Вт/(м · К)                          | 41,8—42,3     | —                |
| Сопротивление срезу паяных соединений, МПа            | 245—360       | 254—455,7        |
| Ударная вязкость паяных соединений, Дж/м <sup>2</sup> | 29,4—58,8     | 52,2—78,4        |
| Пористость швов, %                                    | 2—4           | 2—4              |
| Температура распайки, °C                              | 910           | —                |

Примечание. Пайка образцов с флюсом 209 по режиму:  $t_n = 750 \div 780$  °C,  $t_n = 1$  мин; зазор шириной 0,05 мм; нахлестка 1, 2...3 мм.

системы Cu—P, имеют припой на основе сплавов системы Cu—Zn (латуни).

Т а б л и ц а 20. Некоторые припои системы Cu — P — Ag

| Припой                  | Состав припоя, % |           |           |                     |
|-------------------------|------------------|-----------|-----------|---------------------|
|                         | Cu               | P         | Ag        | примеси<br>не более |
| В CuP-3 (США)           | 89,25—88,25      | 6,0—6,6   | 4,75—5,25 | 0,15                |
| В CuP-4 (США)           | 87,55—95,95      | 6,75—7,8  | 5,75—6,25 | 0,15                |
| В CuP-5 (США)           | 80,65—79,25      | 4,75—5,25 | 14,5—15,5 | 0,15                |
| ПСр 15 (ГОСТ 19738—74)  | 80,2 ± 1,0       | 4,8 ± 0,3 | 15 ± 0,5  | 0,30                |
| ПСр 25Ф (ГОСТ 19738—74) | 70 ± 1,0         | 5 ± 0,5   | 25 ± 0,5  | 0,15                |

| Припой                  | Температура, °C |                |         | Ширина<br>зазора, мм |
|-------------------------|-----------------|----------------|---------|----------------------|
|                         | соли-<br>дуса   | ликви-<br>дуса | пайки   |                      |
| В CuP-3 (США)           | 646             | 815            | 705—840 | 0,05—0,025           |
| В CuP-4 (США)           | 646             | 750            | 705—815 | 0,025—0,075          |
| В CuP-5 (США)           | 646             | 815            | 705—815 | 0,075—0,125          |
| ПСр 15 (ГОСТ 19738—74)  | 640             | 810            | —       | —                    |
| ПСр 25Ф (ГОСТ 19738—74) | 645             | 725            | —       | —                    |

Широкое распространение латунных припоев для пайки сталей объясняется их относительно низкой температурой плавления, узким интервалом кристаллизации, большой растворимостью цинка в меди и недефицитностью. Температура пайки сталей латунными припоями 850—950 °С. Температура ликвидуса латуни непрерывно снижается с увеличением содержания цинка.

Прочность литых латуней, состоящих из  $\alpha$ -фазы, непрерывно увеличивается с повышением содержания цинка. Наиболее прочна латунь с содержанием  $\sim 42\%$  Zn. Латунные припой, содержащие 60 % Cu, имеют температуру плавления 900 °С. Введение в них добавок олова, кадмия или увеличенное содержание цинка позволяет снизить их температуру плавления максимум на 50 °С.

Образование небольшого количества  $\beta$ -фазы наряду с  $\gamma$ -фазой повышает прочность, но снижает пластичность;  $\gamma$ -фаза очень хрупкая, поэтому латуни, содержащие ее, малопрочны и малопластичны. Припой, содержащие  $\beta$ - и особенно  $\gamma$ -фазу, несмотря на относительно невысокую прочность, применяют при пайке некоторых медных сплавов ввиду низкой температуры плавления. Сплавы, содержащие менее 42 % Cu, в качестве припоев малопригодны ввиду их хрупкости.

Наибольшее распространение получили припой латуней Л63 и Л68. Латуни с 48 или 54 % Cu применяют для пайки соединений, не подвергающихся удару, изгибу и вибрации. Латуни Л63 и Л68 в качестве припоев используют для пайки соединений, работающих в сравнительно напряженных условиях, при которых требуется высокая пластичность шва.

Латуни могут быть использованы взамен серебряных припоев для пайки сталей, никеля и его сплавов, в изделиях, работающих в интервале температур — 60 ÷ 200 °С. При этом используют пайку газопламенную, индукционную или электросопротивлением (с зазором 0,1 мм). Припой в виде лент, прутков и фольги обеспечивают высокое качество соединений и снижение себестоимости изделий.

Значительное уменьшение испарения цинка в латуни достигается введением в нее 0,1—0,5 % Si. Кремний задерживает диффузию цинка и понижает растворимость водорода в латунях; при этом уменьшается опасность образования пористости при кристаллизации паяного шва.

Уменьшение пористости в медно-цинковых сплавах, содержащих кремний, способствует повышению прочности паяных соединений. По данным ряда других исследований, пористость в латунях связана не с испарением цинка, а с выделением газов (главным образом водорода). Кремний, а также олово заметно уменьшают растворимость цинка в меди, поэтому при введении их в припой Cu—Zn увеличивается количество  $\beta$ -фазы.

При введении в припой Cu—Mn кремния (0,3—3 %), по данным Г. В. Снидера, на них образуется тонкая пленка этого элемента малой толщины, предотвращающая окисление их в жидком

Т а б л и ц а 21. Латунные припой,

| Припой             | Состав припоя |           |           |  |
|--------------------|---------------|-----------|-----------|--|
|                    | Cu            | Si        | Sn        |  |
| ЛК62-05            | 60,5—63,5     | 0,3—0,7   | —         |  |
| ЛОК62-06-04        | 60,5—63,5     | 0,3—0,4   | 0,4—0,6   |  |
| ЛОК59-1-03         | 58—60         | 0,2—0,4   | 0,7—1,1   |  |
| ЛКН56-03-06        | 55—57,5       | 0,25—0,30 | —         |  |
| В CuZn-3 * (США)   | 56            | 0,25      | 1,1—1,25  |  |
| В CuZn-6 ** (США)  | 46—50         | 0,15      | —         |  |
| В CuZn-7 *** (США) | 46—48         | —         | —         |  |
| 423227 (ЧССР)      | 58,0—60,5     | 0,1—0,3   | 0,15—0,40 |  |
| 423228 (ЧССР)      | 59—61         | 0,1—0,2   | 0,13—0,23 |  |
|                    | 59—61         | 0,2—0,5   | —         |  |
| 423371 (ЧССР)      | 49—51         | 0,15—0,45 | 0,5       |  |

\* 1,0 % Мп.

\*\* 0,2 % Р.

\*\*\* 0,5 % Р.

состоянии при раздуве струей воды. При этом получается светлый, неокисленный порошок припоя, пригодный для изготовления паяльной пасты. Температура плавления такого порошка 916,6—1027,7 °С. При введении кремния в латунные припои повышается также их временное сопротивление, обеспечивается самофлюсимость, высокая коррозионная стойкость паяных соединений из коррозионно-стойких сталей; при этом пластичность припоя не снижается, но повышается его склонность к упрочнению при деформации, а при разливке увеличивается вязкость припоя, склонность его к испарению и окислению, образованию несплошностей и раковин.

Введение в двухфазные латуни кремния и серебра увеличивает их прочность, пластичность, жидкотекучесть и коррозионную стойкость (табл. 21).

В связи с большим химическим сродством кремния с железом и марганцем, чем с медью, при пайке углеродистой стали латунными припоями, содержащими кремний, на границе паяного шва образуются прослойки твердых растворов в стали, обогащенные кремнием, или при достаточно большом содержании кремния — прослойки  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ; начиная с некоторой ее толщины, это приводит к охрупчиванию и понижению прочности паяного соединения. Содержание кремния, по данным И. Кольбуса, в латунных припоях с 60 % Cu должно быть ограничено (до 0,2 %).

В латунном припое, содержащем кремний и марганец, значительная часть последнего связывается с кремнием в виде химического соединения. Для улучшения свойств соединений из стали и чугуна, паянных латунными припоями, содержащими кремний, в них добавляют никель. Никель и марганец повышают прочность

**содержащие кремний**

| (остальное Zn), % |           |      |           | Температура, °C |           |
|-------------------|-----------|------|-----------|-----------------|-----------|
| Ag                | Ni        | Pb   | Fe        | солидуса        | ликвидуса |
| —                 | —         | 0,08 | 0,2       | —               | 905       |
| —                 | —         | 0,10 | 0,2       | 900             | 905       |
| —                 | —         | 0,08 | 0,1       | —               | 905       |
| —                 | 5,5—6,0   | 0,10 | 0,2       | —               | 905       |
| 1,0               | 1,0       | 0,05 | 0,25—1,25 | 830             | 880       |
| 0,2               | 9,0—11,0  | 0,05 | 0,25      | 920             | 940       |
| —                 | 10,0—11,0 | —    | —         | 920             | 940       |
| 0,2—0,4           | 0,05      | 0,05 | 0,05      | 870             | 900       |
| —                 | 0,06      | 0,05 | 0,05      | 800             | 850       |
| 1,0—0,6           | —         | —    | —         | 893             | 896       |
| 1,0               | 7,5—1,0   | 0,02 | 0,1       | 820             | 900       |

и надежность латунных припоев. При введении в латуни марганца несколько снижается температура их плавления.

Легирование латуни марганцем (1,5—2 %) и никелем ( $\leq 5$  %) повышает их пластичность и деформируемость. Припой Cu—(0,3—5) % Zn—(0,3—10) % Si имеет высокую электрическую проводимость (26 %) от электрической проводимости меди и высокое временное сопротивление  $\sigma_b = 62 \pm 2$  МПа [38].

Припой Cu—40 % Zn с 10 % Ni обеспечивает высокую прочность паяных соединений из сталей (до  $\sigma_b = 800$  МПа). Среди сплавов системы Cu—Mn известен только один припой, применяемый для пайки коррозионно-стойких сталей; он содержит 15 % Mn, температура его плавления 950 °C, температура пайки 970 °C.

Изменение механических свойств сплавов Cu—Mn со временем в зависимости от содержания марганца связано с распадом  $\delta$ -твердого раствора. Эти сплавы куются при температурах существования  $\gamma$ -фазы при любом содержании марганца (до 95 %). Устойчивость  $\gamma$ -фазы в сплавах Cu—Mn повышается при введении никеля. Распад  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma$  в тройных сплавах происходит намного медленнее, чем в двойных сплавах Cu—Mn. Никель способствует также снижению окисляемости припоев в жидком состоянии и улучшению смачиваемости ими поверхности коррозионно-стойких сталей. Поэтому для основы припоев более пригодны сплавы системы Cu—Mn—Ni.

Никель, как и медь, образует с марганцем непрерывный ряд твердых растворов с наименьшей температурой плавления 1018 °C при 60 % Mn. Однако эта система отличается тем, что в сплавах, содержащих 20—70 % Mn, в твердом состоянии возникают интер-

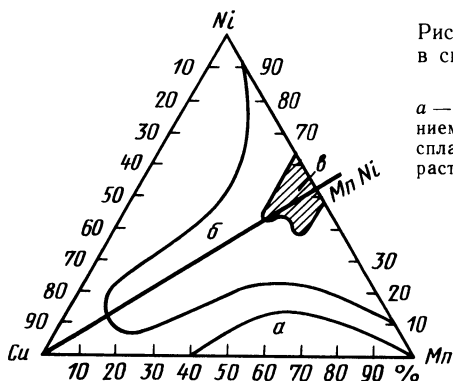


Рис. 25. Области упрочнения и хрупкости в сплавах системы Cu—Mn—Ni (по данным Р. Дина и Х. Андерсена):

*а* — область сплавов, упрочняемых разложением  $\gamma$ -фазы на  $(\gamma + \alpha)$ -фазу; *б* — область сплавов, упрочняемых в процессе упорядочения растворов на базе соединения MnNi; *в* — область хрупких сплавов

металлиды NiMn и  $Ni_3Mn$  упорядоченной структурой. Сплавы с 40—70 % Mn, в которых образуется упорядоченная фаза  $Ni_3Mn$ , хрупкие. Область

хрупких сплавов Ni—Mn сохраняется и при добавке к ним 10—15 % Cu (рис. 25).

Наиболее легкоплавкие и прочные сплавы системы Cu—Mn—Ni — сплавы, содержащие 32—39 % Mn и до 5 % Ni. Эти сплавы представляют собой твердые растворы, упрочняемые в результате разложения  $\gamma \rightarrow \gamma + \alpha$  и упорядочения на базе фазы NiMn. С увеличением содержания никеля температура плавления сплавов Cu—Mn—Ni и склонность к ликвации повышаются. Понижение температуры плавления и упрочнение сплавов этой системы могут быть достигнуты при легировании небольшими количествами кремния (1,5—3,5 %). Упрочнение сплавов Cu—Ni—Mn при введении кремния связано с образованием фазы  $Ni_3Si$ , не содержащей медь, что способствует также повышению теплостойкости этих сплавов. Введение кремния в сплавы Cu—Mn—Ni повышает их коррозионную стойкость.

Небольшие количества железа в припоях Cu—Mn—Ni способствуют растеканию по стали. Однако легирование железом должно быть ограничено в связи с образованием самостоятельной фазы, снижающей коррозионную стойкость. Исследованы технологические характеристики ряда припоев системы Cu—Mn—Ni с добавками кремния, железа, а также лития или лития и бора (табл. 22).

Н. Бредз и Н. Шварцбарт полагали, что самофлюсующее действие лития обусловлено образованием эвтектики  $Li_2O—Li_2CrO_4$  с температурой плавления 570 °С, т. е. ниже температуры пайки.

Бор, обладающий большим химическим сродством к кислороду и образующий с литием комплексный легкоплавкий оксид  $LiBO_2$  с температурой плавления 861 °С, обеспечивает самофлюсуемость припоев при введении в них лития и бора.

При пайке в сухой атмосфере припой с литием менее эффективен, чем в инертной газовой среде с парами воды, что, вероятно, связано с образованием гидрооксида лития с температурой плавления 450 °С.

В припоях, содержащих одновременно литий и бор, образуются комплексные гидриды типа  $m \cdot Li_2O \cdot n \cdot B_2O_3 \cdot kH_2O$ .

Введение небольших добавок лития (0,2—0,8 %) в припой

системы Cu—Mn—Ni сообщает им способность к самофлюсованию, но менее эффективно, чем введение лития и бора (0,1—0,2 %) вместе. Для сохранения способности припоев системы Cu—Mn—Ni—Si прокатываться в фольгу и самофлюсоваться содержание кремния в них не должно превышать 2,5 %.

В промышленности нашли применение самофлюсующие припои системы Sn—Mn—Ni марок ВПр-2 и ВПр-4. Наиболее легкоплавкий и прочный самофлюсующий припой этой системы — припой ПМ38МЛ с хорошими технологическими свойствами: рабочая температура пайки высоколегированных сталей в среде проточного аргона 920—930 °С; он обладает удовлетворительной способностью к самофлюсованию на воздухе при индукционной пайке и пайке электросопротивлением.

Припой ПМ38МЛ может быть использован в виде литых прутков, колец, стружки и фольги, полученной прокаткой из жидкого состояния. Припои ВПр-2 и ВПр-4 могут быть получены в виде прокатанной фольги входную с промежуточными отжигами.

Существенная особенность припоев Cu—Mn—Ni — склонность к образованию пористости в паяных швах, выполненных

Т а б л и ц а 22. Некоторые припои системы Cu—Mn—Ni

| Марка<br>или номер<br>припоя                        | Состав припоя (остальное Cu), % |       |         |         |           |           | Температура пайки стали 12Х18Н9Т, °С |                      |
|---|---------------------------------|-------|---------|---------|-----------|-----------|--------------------------------------|----------------------|
|   | Mn                              | Ni    | Si      | Fe      | Li        | B         | с индукционным<br>нагревом           | в печи               |
| ПМ38МЛ<br>ВПр-2<br>ВПр-4 *<br>1<br>2<br>3<br>4<br>6 | 36—40                           | 4—6   | 1,5—2,5 | —       | До 0,15   | До 0,1    | 950 (без флюса)                      | 920—930 (в аргоне)   |
|   | 22—26                           | 5—6   | —       | 0,8—1,2 | 0,15—0,25 | —         | —                                    | 980—1000 (в аргоне)  |
|   | 27—30                           | 28—30 | 0,8—1,2 | 1—1,5   | 0,15—0,30 | 0,15—0,25 | —                                    | 1000—1050 (в аргоне) |
|   | 8—16                            | 3—8   | —       | —       | 0,3—0,8   | 0,15      | —                                    | 1000 (с флюсом)      |
|   | 30                              | 30    | 3,5     | —       | 0,3       | 0,1       | 1100 (без флюса)                     | 1020 (с флюсом)      |
|   | 25                              | 20    | 3,5     | —       | 0,3       | 0,1       | —                                    | 1020 (с флюсом)      |
|   | 25                              | 10    | 3,5     | —       | 0,6       | —         | 1100 (с флюсом)                      | —                    |
|   | 15                              | 10    | 1,5—3,2 | —       | 0,4       | —         | 1200 (с флюсом)                      | —                    |

\* 4—6 % Co; 0,01—0,2 % K; 0,05—0,15 % Na; 0,1—0,2 % P.

с нагревом в кислородно-ацетиленовом пламени. Эта склонность тем больше, чем больше в припое марганца и меньше никеля. Высокое давление паров марганца при высоких температурах дает основание полагать, что повышенная пористость швов, выполненных газопламенной пайкой с применением припоев системы  $\text{Cu—Mn—Ni}$ , обусловлена усиленным испарением марганца в газовые поры при перегреве. Пайка в слегка окисленном пламени и с подогревом после пайки для удаления газов в течение 3—5 мин предотвращает образование пористости в швах. При пайке в печах в среде аргона и вакуума или с индукционным нагревом на воздухе при отсутствии перегрева припоя в жидком состоянии образуются плотные, беспористые паяные швы.

Существенная особенность припоев  $\text{Cu—Mn—Ni}$  — слабое их эрозионное действие по отношению к паяемому металлу, отсутствие склонности к межзеренному проникновению в коррозионно-стойкие стали при пайке и охрупчивающему действию при облуживании. Припой ВПр-2 и ВПр-4 обеспечивают более высокую теплостойкость соединений из коррозионно-стойких сталей (до  $\sim 600^\circ\text{C}$ ), чем серебряные (до  $370\text{—}500^\circ\text{C}$ ).

По данным Э. Н. Дорофеевой, применение припоев  $\text{Cu—36 \% Mn—9 \% Ni}$  в виде смеси порошков составляющих компонентов одинакового гранулометрического состава для пайки коррозионно-стойкой стали 12X18H10T по режиму  $t_n=1150^\circ\text{C}$ ,  $\tau=1$  мин в вакууме ( $p=0,00266$  Па), встык, электросопротивлением и под давлением 17,6—21,6 МПа обеспечивает более высокое временное сопротивление разрыву соединения  $\sigma_b=343$  МПа), чем при пайке порошком готового припоя того же состава ( $\sigma_b=196$  МПа).

Припой системы  $\text{Cu—Mn}$ , легированные мишметаллом и (или) алюминием, прокатывают в фольгу толщиной 0,2—0,6 мм) и используют для печной пайки сталей в вакууме ( $p=0,133$  Па) и в среде инертных газов, например, припой: 1)  $\text{Cu—(15—40) \% Mn—(0,1—4) \% мишметалла}$  и (или)  $(0,1—4) \% \text{Al}$  ( $t_{\text{пл}}=890^\circ\text{C}$ ); 2)  $\text{Cu—35 \% Mn—3 \% Al}$  ( $t_{\text{пл}}=950^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_b=372,4$  МПа); 3)  $\text{Cu—60 \% Mn—1 \% Al}$  ( $t_{\text{пл}}=1000^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_b=343$  МПа).

Припой  $\text{Cu—(9—11) \% Mn—(2,5—3,5) \% \text{Co}}$ , активированный фосфором (0,01—0,5 %), хорошо смачивает твердые сплавы и стали и пластичен в твердом состоянии [16].

Введение титана в сплавы меди с оловом, кремнием, германием, марганцем, никелем, кобальтом обеспечивает высокую активность смачивания ими карбидов титана, керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при пайке в вакууме ( $p=1,33\cdot 10^{-3}$  Па). Припой такого типа запатентованы Н. Мицухара (табл. 23). Припой № 1 изготовлен методами порошковой металлургии, припой № 2—6 отлиты в медную изложницу и прокатаны на лист до 3 мм.

Хрупкий припой, содержащий 100 м.ч. меди, 10—30 м.ч. олова (с добавлением никеля или без него), может быть получен в виде

пластичной фольги при быстром охлаждении из жидкого состояния путем подачи расплава на быстро вращающийся охлаждаемый валок. Снижение температуры пайки припоями на основе Cu—Ni, не содержащими цинка, марганца и фосфора (или содержащими их в количествах, не оказывающих заметного влияния на упругость пара), может быть достигнуто введением в них кремния и бора. Кремний, введенный в эти сплавы, заметно повышает их коррозионную стойкость, жаропрочность, а также благодаря образованию соединений с никелем — и прочность при дисперсионном твердении. Введение кремния способствует повышению прочности и кислотостойкости припоев в серной кислоте (табл. 24).

Для напайки деталей, работающих при высоких температурах, особенно подвергающихся трению (вентили и т. п.), по В. (Эспе, используют медные припои, содержащие 2,5—10 % Fe, с температурой ликвидуса 1180—1230 °С или содержащие 20—30 % Fe, с температурой ликвидуса 1200—1230 °С. Припой, содержащий 75 % Cu и 25 % Ni ( $t_n=1205$  °С), пригоден также для пайки вольфрама и молибдена.

Медные припои, предназначенные для пайки узлов электровакуумных приборов, должны быть легированы элементами-депрессантами и элементами-упрочнителями с малым давлением паров. Их интервал кристаллизации должен быть достаточно узким, чтобы предотвратить возникновение усадочной пористости и обеспечить вакуумную плотность швов. Припои должны хорошо

Таблица 23. Припои с высокой активностью при смачивании

| Номер припоя | Состав припоя, % |    |    |    |                 | Температура пайки, °С |
|--------------|------------------|----|----|----|-----------------|-----------------------|
|              | Cu               | Ti | Sn | Mn | Другие элементы |                       |
| 1            | 93               | 1  | 6  | —  | —               | 1100                  |
| 2            | 95               | 1  | 4  | —  | —               | 1070                  |
| 3            | 88               | 2  | —  | —  | 10 Ge           | 1050*                 |
| 4            | 58               | 2  | —  | 40 | —               | 1100                  |
| 5            | 50,5             | 3  | —  | 37 | 9,5 Ni          | 1100                  |
| 6            | 56               | 3  | —  | 31 | 10 Co           | 1110                  |

\* Температура плавления 890—990 °С.

Таблица 24. Припои на основе системы Cu — Ni и Cu — Ni — Si

| Припой      | Состав припоя, % |       |       |        |       | Температура, °С |           |
|-------------|------------------|-------|-------|--------|-------|-----------------|-----------|
|             | Cu               | Ni    | Si    | Fe     | Mn    | плавления       | пайки     |
| КП ВПр-1 *  | 71,5—69          | 19—20 | 4,5—5 | 5—6    | —     | 950—960         | 1000      |
|             | Остальное        | 27—30 | 1,5—2 | До 1,5 | —     | 1080—1120       | 1150—1200 |
| ПЖ45(81) ** | То же            | 32    | 2     | 2,5    | 2,5   | —               | 1200      |
| ПМН10       | 90               | 10    | —     | —      | —     | 1140            | —         |
| ГПФ         | 66—72            | 10—14 | 1—1,8 | 12—14  | 4,2—5 | 1190—1280       | 1280      |
| —           | 75               | 25    | —     | —      | —     | —               | 1205      |
| —           | 85               | 10    | —     | 5      | —     | —               | —         |

\* 0,1—0,3 % В.

\*\* 3 % Cr.

смачивать паяемый металл и растекаться по нему в вакууме или защитной среде. Среди компонентов медных сплавов, пригодных для таких припоев,— германий, кобальт, олово. Обычно высокая пластичность медных припоев сохраняется при содержании этих компонентов в пределах их растворимости в припое. Упрочнение припоев достигается легированием твердого раствора, а также образованием структуры с высокодисперсными включениями твердых химических соединений в пластичной матрице сплава.

Упрочнение медных припоев тонкодисперсными частицами химических соединений может быть достигнуто, в частности, при легировании их компонентами, более активно взаимодействующими между собой, чем с медью. К таким парам элементов относятся железо или кобальт с кремнием, железо, никель или кобальт с германием, а также бор с никелем или железом. Кремний, германий и бор — неметаллы, и их содержание для сохранения пластичности припоя должно быть ограничено.

Все элементы-депрессанты образуют с медью припой с узким интервалом кристаллизации, что в известной мере гарантирует отсутствие в паяном шве усадочной пористости и кристаллизационных трещин, а следовательно, обеспечивает высокую его вакуумную плотность.

Припой на медно-германиевой основе Cu— (15—20) % Ge перспективен для пайки многих материалов — меди, вольфрама, молибдена, никеля, железа, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т. Припой, содержащий до 10 % Ga, хорошо обрабатывается давлением в холодном состоянии с промежуточным отжигом. При введении в них кремния, никеля и олова до 3—5 % величина краевого угла смачивания составляет 8—27°, т. е. не хуже, чем у золотых припоев. Из припоев изготавливают фольгу и проволоку. Припой такого класса отличается низкой эрозионной активностью, низкой упругостью пара в высоком вакууме при 700 °С и обеспечивают высокую прочность паяных соединений. Паяные соединения сохраняют вакуум-плотность после длительного хранения в условиях тропиков и работают при температуре до 600 °С в циклическом режиме, после холодной деформации и отжига имеют структуру твердого раствора (ТУ 48-31-443—75 и ТУ 48-21-534—76) [21].

Припой системы Cu—Ni—В, содержащий ~97 % Cu, не испаряется в пустотах, но соединения из стали, паянные такими припоями, более склонны к окислению и химической эрозии, чем соединения, паянные припоями с палладием. Бор является компонентом медных припоев, наиболее активно влияющим на межкусталлитное проникновение припоя в сталь (при  $B \geq 0,5\%$ ). Зазоры при пайке высоколегированных сталей такими припоями должны находиться в пределах 0,05—0,2 мм.

Для пайки узлов электровакуумных приборов с целью уменьшения интервала кристаллизации медного припоя и снижения его температуры плавления и температуры пайки Р. Е. Ковальским

были введены германий (2—6 %) и галлий (12—20 %). Предельная растворимость галлия в меди при температуре 900 °С составляет 17,6 %. Оба эти компонента обеспечивают узкий интервал кристаллизации припоя и вакуумную плотность шва.

Вместо бора в качестве упрочняющих элементов медных припоев могут быть использованы алюминий, железо и кремний, образующие также высокодисперсные включения химических соединений, упрочняющие пластичную матрицу припоя.

Такие припои применяют и для пайки твердосплавного инструмента. Это латунные или бронзовые припои, в которые для предотвращения образования трещин в паяном соединении введены никель, железо, для упрочнения припоя — кремний, а для снижения температуры плавления — марганец.

Для увеличения теплостойкости паяного соединения в латунные припои для пайки твердосплавного инструмента вводят хром. Эвтектика  $\text{Cu—Cr}$  содержит 8,4 %  $\text{Cr}$ .

Добавка фосфора резко снижает температуру плавления медных припоев. Введение в припои системы  $\text{Cu—P}$  кремния, бора, никеля обеспечивает их пригодность для пайки меди при зазорах 0,3—0,6 мм, повышает прочность и пластичность паяных соединений при сохранении температуры пайки в пределах 750—780 °С (рис. 26).

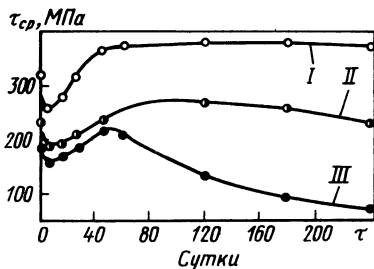
Для использования сплавов  $\text{Cu—P}$  в качестве заменителей серебряного припоя ПСр 45 потребовалось увеличить их прочность и пластичность. Одним из путей достижения этой цели было легирование припоев  $\text{Cu—P}$  кремнием или кремнием и малыми количествами серебра.

Введение в припои  $\text{Cu—P}$  дешевого и недефицитного кремния в количестве десятых долей процента приводит к измельчению (модифицированию) хрупких включений фосфидов меди, понижению температуры солидуса, торможению испарения цинка при пайке латуни, повышению коррозионной стойкости паяных соединений, раскислению металла шва, повышению прочности паяных соединений. Введение в припои  $\text{Cu—P—Si}$  даже малых добавок серебра (0,05 %) снижает температуру их плавления, увеличивает ударную вязкость паяных соединений из латуни.

Припой МПФС 6-0,15 и другие припои системы  $\text{Cu—P}$  чувст-

Рис. 26. Сопротивление срезу образцов из латуни Л63, паянных пастой, содержащей порошок припоя ПМФС6-0,15, в зависимости от дисперсности порошка и срока хранения его в смеси с сухим флюсом ПВ209:

I — 5—300 мкм, II — 125—300 мкм, III — 71—125 мкм



вительны к скорости деформации, и для их прокатки нужны умеренные скорости деформирования  $(1-10) 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  [2].

Припои системы  $\text{Cu-P}$  непригодны для пайки труб, транспортирующих среды, содержащие серу, так как последняя разлагает припой [38].

**Золотые припои.** Припои на основе золота обладают весьма ценными свойствами, характерными для этого металла: они жаро- и термостойки, по крайней мере до температуры  $500^\circ\text{C}$ ; имеют высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях и в контакте с многими агрессивными средами, пластичны (ГОСТ 6835—80).

Длительное время золотые припои предназначались главным образом для пайки ювелирных изделий и зубных протезов. Однако уже с 50-х годов их все чаще стали применять при вакуумной пайке изделий, работающих при повышенных температурах в условиях термоциклирования, а также при пайке сталей и других металлов с полупроводниковыми кристаллами.

Золото образует непрерывные ряды пластичных твердых растворов с никелем, серебром, палладием, медью. На диаграммах состояния  $\text{Au-Ni}$  и  $\text{Au-Cu}$  имеет место минимум температуры плавления: наименьшая температура плавления твердых растворов меди, содержащих 18 %  $\text{Au}$ , —  $905^\circ\text{C}$  и 82,5 %  $\text{Au}$  —  $960^\circ\text{C}$ . Несколько менее интенсивно снижают температуру плавления золота железо и кобальт, образующие с ним диаграммы состояния перитектического типа; со стороны золота в системе  $\text{Au-Fe}$  образуется непрерывный ряд твердых растворов с наинизшей температурой плавления, со стороны золота в системе  $\text{Au-Co}$  — эвтектика.

Хром, германий, кремний образуют с золотом простые эвтектические системы сплавов без химических соединений. Наиболее тугоплавкая из них — эвтектика  $\text{Au-Cr}$  — содержит 8,4 %  $\text{Cr}$  и плавится при температуре  $996^\circ\text{C}$ ; легкоплавкие эвтектики золота с германием ( $t_{\text{пл}} = 365^\circ\text{C}$  при 12 %  $\text{Ge}$ ) и с кремнием ( $t_{\text{пл}} = 370^\circ\text{C}$  при 6 %  $\text{Si}$ ) пластичны и являются хорошей основой при разработке припоев с температурой пайки в интервале  $350-500^\circ\text{C}$ . Припои на основе этих эвтектик склонны к химической эрозии некоторых металлов.

Бор, рутений, индий, сурьма, олово резко снижают температуру плавления золота, но образуют с ним химические соединения. Поэтому введение этих элементов в золотые припои ограничивается их предельной растворимостью в них. Предельная растворимость в двойных сплавах с золотом достигает 1,2 %  $\text{Ge}$  при  $356^\circ\text{C}$ ; 4,2 %  $\text{Sn}$  при  $498^\circ\text{C}$ ; 7,7 %  $\text{In}$  при  $647^\circ\text{C}$ . Растворимость рутения в золоте ничтожно мала. Эти элементы нашли применение в качестве депрессантов и в некоторых случаях как упрочнители припоев, так как при их взаимодействии с золотом образуются мелкодисперсные включения твердых химических соединений.

Титан также образует с золотом химические соединения, но

при этом температура плавления припоя при введении титана повышается.

Хром и никель повышают термостойкость и жаропрочность золотых припоев. Припой на основе золота, легированные этими компонентами, кроме того, окалиностойки, жаростойки и прочны; стабильны по составу при пайке в вакууме. Припой Au — 18 % Ni нашел применение для пайки коррозионно-стойких сталей и образует с ними паяные соединения, обладающие особенно высокой прочностью ( $\sigma_b = 784$  МПа), низкой упругостью испарения. Поэтому золотые припой, легированные этими элементами, с успехом используются при пайке изделий из сталей, работающих в условиях высокого нагружения и повышения температур ( $\sim 500^\circ\text{C}$ ); например, турбин ракет и других узлов авиационной и космической техники США. Температура плавления таких припоев обычно несколько ниже  $1000^\circ\text{C}$ .

Припой № 1 (табл. 25) обладает жаростойкостью при температуре  $500^\circ\text{C}$ , имеет высокую прочность и смачивающую способность. Припой № 2 образует герметичные паяные соединения с невысоким временным сопротивлением разрыву ( $\sigma_b = 137$  МПа). Для сохранения пластичности паяных швов паяемое изделие необходимо быстро охлаждать от температуры  $500^\circ\text{C}$  в связи с тем, что в этих сплавах ниже температуры  $390^\circ\text{C}$  образуются упорядоченные твердые растворы, понижающие пластичность сплава. К положительным свойствам припоев Au—Cu следует отнести весьма узкий интервал кристаллизации, что обеспечивает высокую размерную точность при монтаже тонкостенных конструктивных элементов изделий. Эти припои применяют при пайке металлов высокой чистоты, имеющих высокую коррозионную стойкость, а также для пайки электронных трубок, при изготовлении вакуумного оборудования и т. п.

Т а б л и ц а 25. Золотые припой, образующие жаростойкие прочные соединения

| Номер припоя | Состав припоя, % |           |                |            |                 | Температура пайки, $^\circ\text{C}$ |
|--------------|------------------|-----------|----------------|------------|-----------------|-------------------------------------|
|              | Au               | Cu        | Ni             | Cr, B, Pd  | Другие элементы |                                     |
| 1            | 68               | 21,9      | 9              | 1Cr; 0,1 B | —               | $< 1000$                            |
| 2            | 40—90            | Остальное | —              | —          | —               | —                                   |
| 3            | 65—82            | —         | Остальное      | —          | —               | 950                                 |
| 4            | 50               | 7         | 11             | 13,5 Pd    | 18,5 Ag         | —                                   |
| 5            | 54               | 10        | 12             | 7 Pd       | 17 Ag           | —                                   |
| 6            | 65               | —         | 0,1            | 33,2 Pd    | 1,7 Ru          | —                                   |
| 7            | Остальное        | —         | 10             | 10 Cr      | 1 Fe            | 1035                                |
| 8            | 5—15             | Остальное | 10—40 (или Co) | —          | 5—15 In         | 1000—1100                           |
| 9            | 15—30            | 40—50     | 18—31 (или Co) | —          | 8—12 In         | —                                   |

Припой № 3 был применен фирмой «Грумман Диркрафт инжиниринг» (США) для пайки трубопроводов из стали 3041 в лунном модуле космического корабля «Аполлон» и для специальных конструктивных элементов реактора из инконеля 718. Припой обладает высокой прочностью и окалинстойкостью при высоких температурах. Температура пайки в вакууме 950 °С.

Припои № 4 и 5 предназначены для пайки изделий, работающих при повышенных температурах. Припои хорошо смачивают хромосодержащие теплостойкие сплавы на основе кобальта, обеспечивают хорошую пластичность паяных соединений и растекаются при температуре ниже 1036 °С. Примеси в таких припоях строго ограничены: при содержании в припое более 0,5 % алюминия, титана или кремния резко ухудшается растекаемость припоев. Содержание в них  $Al + Ti + Si$  должно быть меньше 0,1 %, лучше 0,02 %.

По данным фирмы «Филькинсон Денталь Мануфактуринг» (США), припой № 6 обладает достаточно высокой прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью при нормальных и повышенных температурах. Он применяется при пайке металлов с керамикой типа  $Al_2O_3$ . Паяные швы не окисляются даже при сгорании керамики. Припой имеет хорошую электрическую проводимость.

Припой № 7 разработан для пайки коррозионно-стойкой стали с керамикой ( $Al_2O_3$ ), образует вакуум-плотные и коррозионно-стойкие швы на воздухе и термостойкие соединения в условиях нагрева до 700 °С в течение 500 ч. Керамику перед пайкой металлизировать молибденом и паяют со сталью 321 (с толщиной листа 0,3 мм). Паяные соединения термостойки в течение 250 циклов нагрева (20—880 °С) при скорости нагрева и охлаждения 80 °С/мин [16].

Припои № 8 и 9 обладают пониженной окисляемостью при испытаниях (менее 3 мг/см<sup>2</sup> за 1000 ч при 500 °С), но невысокой прочностью, низкой пластичностью паяного шва, что обусловлено, по-видимому, содержанием в них индия сверх предельной его растворимости (7,7 % In).

Золотые припои с кремнием, германием, оловом, сурьмой и медью благодаря невысокой температуре их плавления получили применение при изготовлении полупроводниковых вакуумных приборов [22].

Для обеспечения высокой электрической проводимости (не менее 75 % электрической проводимости чистой меди) соединения контактов медных элементов протонных ускорителей с коррозионно-стойкими сталями паяют припоями 50 % Cu—50 % Au или 35 % Au—62 % Cu—3 % Ni в печи, в среде водорода или в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-5}$  Па) при температуре 1180 °С.

Припои для ювелирных изделий должны обладать по сравнению с другими припоями еще двумя особенностями: проба и цвет их и паяемого сплава должны быть одинаковыми. Снижение тем-

пературы плавления золотых припоев и подбор цвета достигаются легированием их медью, кадмием, цинком.

В ювелирной промышленности нашел применение предложенный Б. А. Холопаниным припой с пониженным содержанием золота, обеспечивающий образование паяных швов, по цвету не отличающихся от основного металла. Состав припоя (%): 6,5—10,5 Ag, 2,5—9,5 Cu, 7,5—11,5 Zn, 1,5—2,5 % Ni, Au — остальное. Относительно легкоплавкий припой (с рабочей температурой пайки 740 °С) ЗлСрМ 538—80 (ГОСТ 6835—80) содержит 58,5 % Au, 8 % Ag, 33,5 % Cu, остальное примеси.

Для пайки платины рекомендованы золотые припои системы Au—Pd—Cu—Ag с добавками цинка, никеля и марганца, вводимыми для повышения их пластичности.

**Припой с палладием.** Припой с палладием, несмотря на их дороговизну и дефицитность, в последнее время интенсивно исследуют и рекламируют. Палладий в качестве основы припоев интересен во многих отношениях. Во-первых, он менее дефицитен, чем другие металлы платиновой группы; во-вторых, образует непрерывный ряд твердых растворов с металлами первой (серебро, медь, золото) и восьмой (железо, кобальт, никель) групп периодической системы, а со многими другими элементами образует относительно широкую область твердых растворов.

Краевой угол смачивания технического железа серебром довольно большой (70°). Угол смачивания железа серебром (после пайки при температуре 850—1100 °С с флюсом), по данным Д. В. Руза и В. А. Андерсена, снижается с 70 до 20 °С при добавке 5 % Pd. Припой ПСр 72 после добавки палладия пригоден для пайки коррозионно-стойких сталей в сухом аргоне без флюса. Добавка к припоям системы Ag—Cu—Pd 0,2—0,5 % Li способствует еще большему уменьшению краевого угла смачивания жидкого припоя на поверхности паемого металла.

Способность палладия образовывать непрерывный ряд твердых растворов с металлами группы железа и ограниченные твердые растворы с металлами 5-й и 6-й групп периодической системы (Nb, Ta, Mo, W), в противоположность металлам первой группы (Ag, Cu, Au), позволяет палладиевым припоям конкурировать с никелевыми припоями при пайке жаропрочных сплавов и серебряно-медными припоями при пайке тугоплавких сплавов. В последнее время за рубежом наблюдается тенденция к замене известного эвтектического припоя, содержащего 72 % Ag и 28 % Cu, а также припоев на его основе при пайке вакуумных приборов (в электронике, радиотехнике и т. д.) сплавами, содержащими палладий; упругость пара серебра при температуре его плавления 960 °С равна 0,344 Па, а пара палладия при температуре его плавления 1552 °С — 1,37 Па.

Использование палладия в качестве основы или в качестве легирующего элемента позволяет получать припои с температурой ликвидуса от 810 °С до температуры плавления палладия

Т а б л и ц а 26. Припой, содержащие палладий

| Номер припоя | Состав припоя, % |      |      |    |                              | Температура, °С |           |       |
|--------------|------------------|------|------|----|------------------------------|-----------------|-----------|-------|
|              | Pd               | Ag   | Cu   | Ni | Другие элементы              | солидуса        | ликвидуса | пайки |
| 1            | 5                | 68,4 | 26,6 | —  | —                            | 807             | 810       | 815   |
| 2            | 96,5             | —    | —    | —  | 3,5 В                        | 845             | 845       | 850   |
| 3            | 10               | 58,5 | 31,5 | —  | —                            | 824             | 852       | 860   |
| 4            | 15               | 65   | 20   | —  | —                            | 850             | 900       | 905   |
| 5            | 20               | 52   | 28   | —  | —                            | 879             | 898       | 905   |
| 6            | 25               | 54   | 21   | —  | —                            | 901             | 950       | 955   |
| 7            | 5                | —    | 25   | —  | 70 Au                        | 940             | 967       | 980   |
| 8            | 5                | 95   | —    | —  | —                            | 970             | 1010      | 1015  |
| 9            | 15               | —    | 34   | —  | 51 Au                        | 998             | 1031      | 1040  |
| 10           | 18               | —    | 82   | —  | —                            | 1060            | 1090      | 1095  |
| 11           | 20               | 75   | —    | —  | 5 Mn                         | 1000            | 1120      | 1120  |
| 12           | 21               | —    | —    | 48 | 31 Mn                        | 1120            | 1120      | 1125  |
| 13           | 59,25            | —    | —    | 40 | 0,50 Si; 0,25 Be             | 1115            | 1160      | 1165  |
| 14           | Остальное        | —    | —    | 40 | 0,05—0,30 Li;<br>0,01—0,10 В | —               | —         | 1175  |
| 15           | 35               | —    | 50   | 15 | —                            | 1163            | 1171      | 1175  |
| 16           | 24               | —    | —    | 39 | 4 Si; 33 Cr                  | —               | —         | 1175  |
| 17           | 33               | 64   | —    | —  | 3 Mn                         | 1180            | 1200      | 1120  |
| 18           | 60               | —    | —    | 40 | —                            | 1237            | 1237      | 1250  |
| 19           | 43               | —    | —    | 29 | 28 Cr                        | 1215            | 1250      | 1260  |
| 20           | 54               | —    | —    | 36 | 10 Cr                        | —               | —         | —     |

(1552 °С). Наиболее исследована тройная диаграмма Pd—Cu—Ag. Палладий в качестве основы жаропрочных припоев не имеет большой перспективы, так как образуемые им химические соединения с другими элементами не являются высокими упрочнителями, как, например, фаза  $Ni_3(Al_2Ti)$  в железных и никелевых жаропрочных сплавах. Палладий в основном используют в качестве основы твердых растворов с хорошими физическими и механическими характеристиками.

Большое разнообразие свойств палладиевых сплавов создается при сочетании его со следующими элементами: серебром, медью, золотом, хромом, марганцем, никелем, бором, бериллием, кремнием (табл. 26). Хром вводится в припой главным образом для повышения жаростойкости. Хорошей смачиваемостью, жаростойкостью, малой химической эрозией и небольшой способностью к проникновению по границам зерен, а также неспособностью образовывать интерметаллиды при пайке коррозионно-стойких сталей и никелевых жаропрочных сплавов, упрочненных алюминием и титаном, обладает эвтектический припой, содержащий 60 % Pd и 40 % Ni. Он имеет минимальную температуру плавления 1237 °С в системе сплавов Pd—Ni. Хорошая смачиваемость палладиевыми сплавами многих металлов позволяет изменять зазоры при пайке в широких пределах (0,05—0,50 мм).

Прочные твердые растворы Pd—Ni, легированные хромом, имеют высокую жаростойкость. Наименьшая температура ликвидуса таких сплавов 1250 °С. Дополнительное легирование спла-

вов Pd—Ni—Ge кремнием, предназначенным для снижения температуры ликвидуса, предпочтительно по сравнению с другими элементами (бором и фосфором), так как последние при пайке никелевых жаропрочных сплавов, по данным В. А. Баркера и других, могут вызвать проникновение припоя по границам зерен. Припой состава (%): 24 Pd, 33 Cr, 39 Ni, и 4 Si предложен для пайки жаропрочного сплава, содержащего 0,12 % C; 1,5 % Al; 3,15 % Ti; 9,75 % Mo; 19 % Cr; 11 % Co;  $\leq 5$  % Fe; 0,07 % B; Ni — остальное. При более высоком содержании кремния припой интенсивно растворяет паяемый металл.

Припой с палладием состава (%): 39—60 Pd; 20—47,5 Ni при легировании по крайней мере одним элементом из группы Ag, Sn, In (0—35 Ag, 0—32 Sn, 0—32 In), одним элементом из группы Au, Ge, Si (0—10 Au, 0—4,4 Ge, 0—3,9 Si) и элементом-раскислителем, например литием ( $\sim 0,025$  %), имеет хорошую прочность, коррозионную стойкость при повышенных температурах и пригоден для пайки хрома, сплавов с хромом, например в зубоорудительной технике.

Припой № 11 (см. табл. 26) использован в США для пайки тонкостенных трубок камеры сгорания ракетного двигателя, а припой № 1 — для соединения магнетронных трубок. Бериллиевые окна рентгеновских трубок впаивают в корпус из монеля 407 припоем № 4.

Припой № 6 получил название паллабрейз 950 и нашел применение для пайки аустенитных и ферритных коррозионно-стойких сталей. Он обеспечивает прочность и коррозионную стойкость паяных соединений при температурах до 400 °C. Пайка этим припоем возможна в восстановительных газовых средах и с флюсом на воздухе. Припой № 15 обеспечивает получение соединений из коррозионно-стойких сталей повышенного качества.

В последние 10 лет палладиевые припои применяют также для пайки керамики и графита со сталью или тугоплавкими металлами. Палладиевые припои, легированные тугоплавкими металлами — ниобием, молибденом и ванадием, образуют паяные швы повышенной стойкости в парах щелочных металлов. Припои № 1 и 3 предназначены для пайки керамики с металлами, соединения которых работают в парах щелочных металлов. Введе-

Т а б л и ц а 27. Палладиевые припой, легированные тугоплавкими металлами и хромом

| Номер припоя | Состав припоя, % |      |       |                                |
|--------------|------------------|------|-------|--------------------------------|
|              | Pd               | Cr   | Ni    | Другие элементы                |
| 1            | 10—50            | 2—12 | 10—30 | До 30 Cu; (5—30) Mo            |
| 2            | 43—68            | 2—12 | 30—45 | —                              |
| 3            | 20—60            | —    | —     | (80—40) V или Nb               |
| 4            | 88—98            | —    | —     | (2—12) Ti                      |
| 5            | 23,5             | 6,5  | 23,4  | 0,1 J; до 2 W, Ta, Mo, 46,5 Au |

ние иттрия и тугоплавких металлов в припой системы Pd—Au—Cr—Ni (припой № 5) обеспечивает высокую стойкость паяных соединений против окисления при температуре 870—982 °С в течение более 400 ч (табл. 27).

Палладиевые припои с титаном относятся к высокоплавким припоям и имеют температуру солидуса 1440 °С (припой № 14). Соединения, паянные таким припоем, могут работать до температуры 1640 °С [18]. Припой № 2 (см. табл. 27) применяют также для пайки графита с графитом или с тугоплавкими металлами — молибденом, вольфрамом или их сплавами. Такие паяные соединения работают в условиях нейтронного облучения в ядерных реакторах и выдерживают 10 циклов при температуре до 700 °С и в высоком вакууме при температуре 1250 °С в течение 10 мин, не обнаруживают химической эрозии после выдержки 1000 ч при температуре 700 °С в расплаве фторидов. М. В. Радзиевский показал, что палладиевый припой ПКЖ-1000 системы Pd—Ni обеспечивает равнопрочные соединения из легированных ферритных сталей.

## Глава 4

### СПОСОБЫ ПАЙКИ ПО УДАЛЕНИЮ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ

На поверхности паяемого металла при его взаимодействии с газовой средой, а также с органическими или неорганическими материалами — красками, жировыми смазками, пылью, грязью — образуются адсорбированные слои с ван-дер-ваальсовской связью, хемосорбционные слои с ковалентной связью и оксиды, преимущественно с ионной валентной связью. Все эти прослойки слабо связаны с поверхностью металла и плохо или вообще не смачиваются жидкими припоями. Поэтому для обеспечения физического контакта паяемого металла с жидким припоем такие неметаллические прослойки должны быть тщательно удалены с паяемой поверхности.

При хранении очищенных перед пайкой деталей на поверхности некоторых металлов и сплавов вновь могут возникнуть пленки оксидов, а при последующем нагреве до температуры пайки на воздухе, в котором парциальное давление кислорода достигает 28 Па, поверхность большинства металлов и сплавов снова интенсивно окисляется, так как температура диссоциации оксидов обычно значительно превышает температуру их плавления. Исключением являются платина, золото, серебро, оксиды которых способны диссоциировать при температурах ниже температуры плавления этих металлов (300, 250 и 300 °С соответственно).

При нагреве до температуры пайки и окислении большинства сплавов происходят сложные процессы диффузии их легирующих компонентов из внутренних слоев к поверхности, а также диффузии адсорбированного кислорода через оксидную пленку с поверхности в глубь металла. При окислении металлов и сплавов, у которых превалирует процесс диффузии их ионов к поверхности через оксидную пленку, последняя продолжает расти. В случае образования твердых растворов металла с кислородом может преобладать процесс диффузии последнего (через оксидную пленку внутрь металла, например, при высокотемпературном окислении титана). Характер диффузионных процессов зависит также от строения оксидной пленки, ее рыхлости, градиента концентрации легирующих компонентов, а также термодинамических условий, способствующих приближению системы к равновесию.

С окисленной поверхности в глубь сплава обычно растут слои

оксидов с уменьшающимся содержанием связанного кислорода ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  — в железе;  $\text{TiO}_2$  и  $\text{TiO}$  — в титане и др.). Содержание металлов в оксидах отличается от среднего состава сплава. Элементы, имеющие большое химическое сродство с кислородом, находятся в оксидах в большей концентрации. В некоторых случаях, особенно в процессе окисления при высоких температурах, на поверхности сплавов образуются главным образом оксиды легирующих элементов, а не оксиды основы сплава. Поверхностные слои сплава при этом обедняются легирующими элементами.

Стойкость оксидов металлов тем выше, чем труднее отделить их ион кислорода от иона металла, т. е. чем выше теплота образования оксида, отнесенная к молю кислорода. В табл. 28 приведены данные по теплотам образования оксидов некоторых металлов. Из таблицы видно, что особенно большие трудности при пайке могут возникать для металлов и сплавов, покрытых оксидами бериллия, алюминия, циркония, титана, тантала и хрома из-за весьма высокой теплоты их образования.

Т а б л и ц а 28. Теплота образования некоторых сплавов, отнесенная к 1 молю кислорода  $\text{O}_2$ , Дж

| Оксиды                  | Теплота образования | Оксиды                               | Теплота образования | Оксиды                  | Теплота образования |
|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| $\text{Au}^2\text{O}$   | — 30 563            | $\text{H}_2^{\circ}$ (жид-<br>кость) | 4 839 941           | $\text{MnO}$            | 774 558             |
| $\text{Ag}_2\text{O}$   | 61 127              | $\text{H}_2\text{O}$ (пар)           | 71 917              | $\text{ZnO}$            | 698 358             |
| $\text{PdO}$            | 175 845             | $\text{NiO}$                         | 489 018             | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 751 949             |
| $\text{CuO}$            | 314 010             | $\text{CdO}$                         | 520 838             | $\text{Ta}_2\text{O}_5$ | 835 685             |
| $\text{Cu}_2\text{O}$   | 343 318             | $\text{Fe}_2\text{O}$                | 540 097             | $\text{TiO}_2$          | 916 909             |
| $\text{CoO}$            | 4 814 820           | $\text{Fe}_2\text{O}_3$              | 544 284             | $\text{ZrO}_2$          | 1 082 288           |
| $\text{Co}_3\text{O}_4$ | 411 144             | $\text{Fe}_3\text{O}_4$              | 559356,5            | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 948 729             |
|                         |                     |                                      |                     | $\text{BeO}$            | 1 233 431           |

Для предохранения от окисления подготовленной поверхности паемого материала при пайке его нагрев производят в средах, содержащих незначительное количество кислорода. Такими средами могут быть слой жидкого флюса, не окисляющего паемый металл, слой слабоокисляющего припоя, чистые инертные или активные газовые среды, вакуум. В соответствии с этим в настоящее время нашли применение две группы способов пайки по удалению оксидной пленки: флюсовая и бесфлюсовая.

К последней группе способов пайки относят механические и физические способы удаления оксидной пленки. Они включают в себя абразивный, ультразвуковой и абразивно-кавитационный способы пайки, используемые главным образом при температуре

до 450 °С, а также способы, основанные на диссоциации оксидов и восстановлении из них металлов или связывании оксидов в легко-удаляемые летучие или нелетучие химические соединения, которые применяют главным образом при высокотемпературной пайке и значительно реже при низкотемпературной пайке.

При нагреве в инертных и активных газовых средах или в вакууме сплавов с предварительно очищенной поверхностью, вследствие малого количества кислорода в окружающей газовой среде оксидная пленка хотя и образуется, но ее рост весьма замедлен и неравномерен по поверхности сплава и достаточно тонок. Это обстоятельство наряду с возможными разрывами тонкой, неравномерной по толщине оксидной пленки (например, в результате различия коэффициентов линейного расширения ее и паяемого материала и недостаточной пластичности такой пленки при перестройке решетки оксида) облегчает наступление локального контакта паяемого материала и припоя при нагреве.

В случае достаточно большой предельной растворимости паяемого материала в жидком припое для его смачивания нет необходимости полного удаления оксидной пленки с поверхности паяемого материала. Для этого достаточно лишь образование локальных нарушений ее сплошности. Полное удаление пленки от мест контакта жидкого припоя с паяемым материалом происходит при последующей диспергации ее.

Важнейшим условием диспергации оксидной пленки является ее несплошность и достаточная растворимость паяемого металла в жидком припое.

Для появления в пленке трещин при нагреве она должна быть достаточно тонкой и иметь меньший коэффициент расширения при нагреве, чем паяемый металл.

Диспергация оксидной пленки может иметь место при всех способах пайки. При этом, если жидкая фаза имеет низкое предельное значение растворимости  $C_{\text{ж}}$  в ней паяемого металла, то процесс подплавления оксидной пленки будет идти весьма медленно и для полного ее удаления потребуются более длительная выдержка.

Для ускорения процесса диспергации необходимо увеличить растворимость паяемого металла в жидком припое или оксиде во флюсе или повысить температуру процесса пайки, обеспечив более высокое значение растворимости  $M_{\text{к}}$  в  $M_{\text{п}}$ . Оценка активности флюса или газовых сред по времени полного удаления оксидной пленки с паяемого металла без учета вклада в этот процесс диспергации неправомерна.

Среди флюсов наиболее активны те, при пайке с которыми на паяемой поверхности высаживается металл, способный к контактно-реактивному или контактному твердожидкому плавлению с паяемым материалом или припоем (реактивный флюс). Это связано с повышенной химической активностью высаживаемого вещества в момент протекания химической реакции.

## 1. ФЛЮСОВАЯ ПАЙКА

Для защиты от окисления основного металла в процессе пайки флюс должен иметь температуру плавления ниже температуры солидуса припоя, так как флюс в твердом состоянии не способен защищать паяемый металл и припой от окисления на воздухе. Флюс должен хорошо смачивать поверхность паяемого металла и припоя, растекаться и затекать в зазор между соединяемыми деталями, удалять адсорбированные на них газы, сохранять покрывное действие до конца пайки. Флюс должен быть легче припоя и образовывать с ним два несмешивающихся слоя. При нарушении последнего требования в шве образуются флюсовые включения, имеющие выход наружу, ослабляющие паяемый шов, а при высокой коррозионной их активности способствующие развитию коррозии в паяемом соединении после вскрытия пор (например, при механической обработке), заполненных флюсом.

Флюс в условиях неконтролируемого нагрева, например, при газопламенной или индукционной пайке, имеющий температуру плавления на  $50^{\circ}\text{C}$  ниже температуры плавления припоя, является своеобразным индикатором для определения момента подачи припоя в зазор. Кроме того, только при этом условии он успевает очистить паяемую поверхность от тонкого слоя оксидов до расплавления жидкого припоя. При более высокой температуре плавления флюса, чем температура плавления припоя, поверхность паяемого металла к моменту плавления припоя останется неофлюсованной и сильно окислится.

К важнейшим составляющим паяльных флюсов относятся их активаторы и растворитель. В отдельных случаях в них могут быть введены ингибиторы, понижающие коррозионную активность их остатков и шлаков после пайки и поверхностно-активные вещества (ПАВ), понижающие поверхностное натяжение на границе металла с флюсом и другие вещества. Активаторами флюсов, участвующих в реакциях при пайке, являются, главным образом восстановительные органические и неорганические кислоты.

Согласно ГОСТ 19250—73 флюсы классифицируются по следующим признакам: температурному интервалу их активности, природе растворителя, природе активаторов, по механизму действия, агрегатному состоянию при поставке. По температурному интервалу активности различают флюсы для низко- и высокотемпературной пайки. Температурный интервал активности у флюсов для низкотемпературной пайки находится не выше  $450^{\circ}\text{C}$ , а у флюсов для высокотемпературной пайки — выше  $450^{\circ}\text{C}$ .

По характеру взаимодействия на оксиды различают флюсы электрохимического, химического и растворо-химического действия. Флюсы защитного действия предохраняют очищенный предварительно от грязи, жиров и оксидов паяемый металл от окисления при хранении перед пайкой. К флюсам электрохимического действия относятся гигроскопичные хлоридные флюсы для низко-

температурной пайки, хлоридно-фторидные флюсы для высоко-температурной пайки. Как показали исследования, боридно-фторидные флюсы, применяемые для пайки сталей и медных сплавов, относятся к флюсам растворо-химического действия. Вероятно, к этому же классу относятся боратно-хлоридные и боратно-фторидные флюсы, используемые для пайки сталей и никелевых сплавов.

**Флюсы для низкотемпературной пайки меди, ее сплавов и сталей.** К флюсам для низкотемпературной пайки с выраженным электрохимическим действием относятся неорганические флюсы хлоридного типа, состоящие из слабодиссоциирующего растворителя и активатора. В качестве растворителя для таких флюсов используют воду, спирты, а в качестве активаторов — соляную кислоту и хлориды тяжелых металлов.

К флюсам преимущественно химического действия относятся органические флюсы. Те из них, которые активированы хлоридами, также имеют электрохимическое действие.

По природе растворителей флюсы могут быть полярными (вода) и неполярными (одно- и многоатомные спирты). Активаторами флюсов являются неорганические кислоты (соляная и фосфорная) и некоторые органические кислоты. Эти активаторы можно подразделить на два типа:

1) растворяющиеся в полярных жидкостях (воде); такие активаторы могут ионизировать и приводить к коррозии (соли неорганических кислот, сахара и др.);

2) растворяющиеся в неполярных жидкостях (жирах, канифоли, маслах, этиловом спирте) и не вызывающие коррозии; к ним относятся органические кислоты, например абетиновая кислота, плавящаяся при  $173^{\circ}\text{C}$ , которая является основным активатором канифоли. Канифоль не растворяется в воде, а растворяется только в неполярных жидкостях (например, в этиловом спирте). Спиртовой раствор белой канифоли в этиловом спирте с 0,5 % хлоридов тяжелых металлов имеет повышенную активность при пайке.

Главной составной частью канифоли является абетиновая кислота  $\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$ , плавящаяся при  $173^{\circ}\text{C}$ . Расплавленная канифоль может растворить очень тонкий слой оксида меди (оранжево-красного цвета), т. е. она является очень слабым растворителем оксидов. Слой канифоли, остающийся после пайки, защищает паяный шов от коррозии (в умеренном климате).

При температуре  $200^{\circ}\text{C}$  канифоль активна; с повышением температуры она начинает испаряться; при  $300^{\circ}\text{C}$  испаряется 7 % канифоли. При нагреве выше  $300^{\circ}\text{C}$  канифоль обугливается, что затрудняет процесс пайки. При достаточно быстром нагреве (пайка электросопротивлением, открытыми нагревателями и т. п.) паять с канифольсодержащими флюсами можно и при более высоких температурах ( $350\text{—}370^{\circ}\text{C}$ ). Для предотвращения обугливания канифольных флюсов и появления пористости в швах

нагрев до 350—370 °С можно вести в среде чистого проточного аргона.

Канифольные флюсы пригодны для пайки серебра, кадмия или деталей, покрытых серебром или кадмием, а также меди, латуни и фосфористой бронзы, особенно при пайке погружением в оловянные припои.

Канифоль применяют в виде порошка или раствора в спирте, глицерине, смесях керосина и бензина. Канифольный флюс в смеси керосина и бензина может быть такого состава: 40 % канифоли, 50 % бензина, 10 % керосина.

Недостатком канифольных флюсов является то, что они прочно пристаю к металлу и смываются только спиртом, бензином, скипидаром или щелочью. Добавка к 25 %-ному спиртовому раствору канифоли около 50 % стеарина улучшает технологические свойства флюса — он стирается тряпкой.

Рекомендован флюс, содержащий 10 % канифоли, 20 % стеарина, остальное — спирт.

Для усиления флюсующего действия в канифольные флюсы, кроме малоактивных веществ, вводят неорганические или органические соединения — кислоты, галогениды и др. Флюсы этой группы при добавке небольших количеств подобных активирующих веществ могут быть слабо коррозионно-активными, а при больших количествах — коррозионно-активными.

В качестве активирующих компонентов флюсов применяется ортофосфорная кислота. Метафосфорная кислота при нормальной температуре твердая, гигроскопичная и неудобна для пайки. Жидкая ортофосфорная кислота в виде 40—60 %-ных спиртовых растворов эффективна при пайке алюминиевой бронзы и коррозионно-стойкой стали.

Фосфорная кислота, вероятно, может не только влиять на удаление оксидов с поверхности коррозионно-стойкой стали, но и вызывать образование тонкой пленки фосфатов, которые в противоположность оксидам смачиваются оловянно-свинцовыми припоями. Продукты распада ортофосфорной кислоты после пайки вызывают коррозию паяного соединения. Поэтому кислоту смешивают с канифолью, применяя в качестве растворителя этиловый спирт.

Водный раствор соляной кислоты эффективно воздействует при пайке на сталь, монель и сплавы никеля с медью.

Из органических кислот, активизирующих канифольно-спиртовой флюс, применяют водный раствор молочной кислоты  $\text{CH}_3\text{CHOH}\cdot\text{COOH}$  (15 % молочной кислоты, 84,8 % воды и 0,2 % смачивающей присадки) или смесь ее с канифолью (20 % канифоли, 5 % молочной кислоты и 75 % этилового спирта). Последний флюс слабо коррозионно-стойкий и малоэлектропроводный, применяется для пайки электрической аппаратуры. Молочная кислота плавится при температуре 18 °С.

В качестве компонента флюсов был предложен один из азо-

товодородов — гидразин  $N_2H_4$  и его производные (соли). Соли — гидрохлориды гидразина  $N_2H_4 \cdot HCl$  и  $N_2H_4 \cdot 2HCl$  и другие обладают сильной восстанавливающей способностью и токсичностью.

Наиболее пригодны хлориды и бромиды гидразина. При температуре 200—250 °С происходит медленное разложение этих солей с образованием хлоридов или бромидов аммония, что повышает активность флюсов и исключает коррозионно-активные осадки на изделии. В связи с этим отпадает необходимость промывать изделие после пайки. В качестве флюсов такого типа применяют 5—7 %-ные водные или спиртовые растворы солянокислого, сернокислого или фосфорнокислого гидразина или их смеси с хлоридами олова и аммиака.

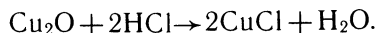
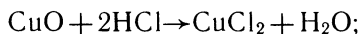
Гидразин плавится при температуре 2 °С и кипит при температуре 113,5 °С. Гидразин и его соли гигроскопичны и взрывоопасны. Гидрохлорид гидразина  $N_2H_4 \cdot 2HCl$  плавится при температуре 198 °С. Остатки гидразиновых флюсов легко смываются спиртом или водой. В качестве примера приведем состав одного из гидразиновых флюсов: 5—7 % солянокислого гидразина, 15—20 % глицерина, остальное — дистиллированная вода. Некоторые флюсы, содержащие производные гидразина, при использовании их для пайки алюминиевых или медных сплавов не вызывают коррозии последних.

Наибольшее распространение среди активаторов флюсов для пайки имеют хлористые соли.

Хлорид цинка — соль белого цвета, легко растворяется в воде и в спирте и присоединяет пары воды из воздуха, образуя при этом жидкий раствор; температура плавления его 283 °С.

Действие хлорида аммония как флюса заключается в том, что он переводит оксиды металлов в их хлориды, которые с хлоридом аммония образуют легкоплавкие, летучие или легко растворяющиеся соединения или эвтектики. С хлоридом железа  $Fe_3Cl_3$  хлорид аммония, например, образует эвтектику с температурой плавления 220 °С.

Хлорид аммония в твердом состоянии употребляется также для очистки медных паяльников от образующихся на них оксидов меди  $Cu_2O$  и  $CuO$ . При взаимодействии хлорида аммония с оксидами меди образуются хлорид меди, аммиак и вода:



Аммиак диссоциирует при нагреве на  $N_2$  и  $3H_2$ , и получаемый при этом водород может служить восстановителем и защитной средой. При взаимодействии хлорида меди с хлоридом аммония образуются растворимые двойные соли ( $CuCl \cdot 6NH_4Cl$ ). Хлорид

меди с хлоридом аммония образует эвтектику, плавящуюся при температуре 140 °С.

В результате гидролиза раствора хлорида цинка образуются пары хлористого водорода, которые, воздействуя на оксиды металла, переводят их в более растворимые хлориды.

Продукты гидролиза хлорида цинка вызывают интенсивную коррозию паяного соединения.

Р. С. Ден и Р. В. Вильсон предложили ряд флюсов, не растворимых в воде (не способных к гидролизу) и при нагреве выделяющих хлористый водород, но не образующих продуктов реакции, способных вызвать коррозию паяемых сплавов. Это — нафтаден тетрахлорид, нафтаден тетрабромид и др. Однако, как указывают авторы, во влажном воздухе пары хлористого водорода конденсируются на паяном соединении и могут способствовать его коррозии. Смеси хлорида цинка с хлоридом аммония обладают большей активностью, чем каждый из них в отдельности. Температура плавления у смеси ниже, чем у хлорида цинка. При содержании 27 мол. %  $\text{NH}_4\text{Cl}$  образуется эвтектика между  $\text{ZnCl}_2$  и соединением  $2\text{ZnCl}_2 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$ , плавящаяся при температуре 232 °С.

Соединение  $2\text{ZnCl}_2 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$  имеет температуру плавления 249 °С. При содержании 49 мол. %  $\text{NH}_4\text{Cl}$  образуется вторая, более легкоплавкая эвтектика с температурой плавления 180 °С. Смеси хлорида цинка и хлорида аммония неустойчивы и при нагреве могут разлагаться с образованием цинкаммонийных хлоридов  $\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}$  и  $\text{Zn}(\text{NH}_4)\text{Cl}$ , являющихся также активными флюсами. Хлорид железа с хлоридом цинка образует эвтектику, плавящуюся при температуре 214 °С.

В качестве флюса рекомендуется эвтектика  $\text{ZnCl}_2\text{—NH}_4\text{Cl}$  (28 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) или близкая по составу смесь 65—75 %  $\text{ZnCl}_2$  и 35—25 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , а также смесь, состоящая из 50 %  $\text{ZnCl}_2$  и 50 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Последний флюс пригоден для пайки с легкоплавкими припоями, имеющими повышенную температуру плавления (92 % Pb и 8 % Sn; 98,5 % Pb и 1,5 % Ag; Zn и т. д.).

Флюсы, содержащие хлориды цинка и аммония, следует хранить в стеклянной, керамической или деревянной таре, но не в металлической. Эти флюсы не должны содержать солей меди, свинца, железа, так как при пайке железа указанные металлы восстанавливаются из солей и образуют на поверхности паяемой детали черный налет. Очистку флюсов от примесей солей тяжелых металлов производят гранулированным цинком, который помещают во флюс на несколько дней. В хорошо очищенном флюсе новая порция гранулированного цинка не должна покрываться черным налетом.

В некоторые флюсы, содержащие хлориды цинка и аммония, добавляют 5—10 % глицерина, который улучшает смачиваемость поверхности металлов флюсом (например, флюс «Прима 1»).

Остатки флюсов, содержащих хлориды цинка, аммония, кад-

мия, олова, способствуют развитию коррозии в паяном шве и должны быть тщательно удалены после пайки промывкой водой или спиртом. К флюсам (смесь  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), предназначенным для пайки с легкоплавкими припоями, рекомендуется добавлять фториды. Фториды более активны, чем хлориды, но многие из них ядовиты.

Хлоридные флюсы применяют в виде твердой смеси, порошков, водных растворов, пасты. При изготовлении хлоридных флюсов в виде пасты к ним добавляют вазелин (например, смешивается 25 г хлорида и 100 г вазелина при температуре  $75^\circ\text{C}$ ), минеральное масло, глицерин, веретенное масло, воск, клейстер и другие безводные смеси (например, 20 ч. хлорида цинка, 12 ч. глицерина и 3 ч. спирта).

Для пайки с легкоплавкими припоями применяют хлориды  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{SnCl}_2$  и др. Хлорид свинца слабо растворим в воде и малоактивен в качестве компонента флюса. Хлорид кадмия повышает температуру плавления хлорида цинка. Смесь хлоридов цинка и алюминия с глицерином рекомендуется для пайки с безоловянными легкоплавкими припоями.

Характерно, что при пайке золотых и позолоченных деталей припоями, богатыми свинцом, с применением активированных флюсов ЛК2, ЛТИ-120, плохое смачивание, вероятно, связано с пассивированием паяемой поверхности. Поэтому пайка таких деталей может быть выполнена качественно с применением слабоактивных флюсов, например с флюсом ВТС.

Все активные флюсы для пайки легкоплавкими припоями позволяют паять металлы без предварительной подготовки; при применении слабоактивных флюсов иногда требуется облуживание металла.

Компонент флюсов триэтаноламин  $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$ , с температурой кипения  $279^\circ\text{C}$ , токсичен, растворим в воде, хранить его нужно в металлической таре.

Флюс 38Н высокоактивен, но вызывает заметную коррозию; наивысшая активность флюса при  $350^\circ\text{C}$  вследствие термического разложения его компонентов и выделения веществ, активно удаляющих оксидную пленку металлов. Остатки флюса легко смываются водой или спиртом.

Остатки флюсов (ФИМ, ЛМ1), содержащих ортофосфорную кислоту, после пайки способствуют коррозии паяного соединения, их необходимо удалять спиртом.

Флюсы, в которых солянокислый анилин ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_3$ )Cl является основной составляющей, так же эффективны, как и анилинфосфат. При нагреве таких флюсов выделяется хлористый водород, способствующий удалению оксидов на паяемом шве; он применяется для тех же целей, что и анилинфосфат. Солянокислый анилин плавится при температуре  $199^\circ\text{C}$ , испаряется при температуре  $245^\circ\text{C}$  и легко растворяется в воде и спирте. Остатки анилинофосфатных флюсов после пайки слабо растворимы в воде.

Эти остатки можно и не удалять ввиду их нейтральности при коррозии. Анилинофосфатные флюсы применяют для пайки деталей, покрытых оловом, серебром и кадмием, и при пайке меди, латуни, кремнистой и фосфористой бронзы.

При пайке некоторых токопроводящих деталей — телефонной, радио- и другой электрической аппаратуры — неприемлемы коррозионно-активные флюсы, так как они могут способствовать коррозии паяных швов и разрушению изоляционных материалов или снижению их влагостойкости. Такую аппаратуру паяют почти исключительно с канифольно-спиртовым флюсом.

Солянокислый анилин не растворяется в канифоли и может после испарения спирта осаждаться на паяемой детали и оказывать корродирующее действие.

Для улучшения смачивания поверхности во флюсы вводят иногда смачивающие присадки, например сульфорициновый аммоний.

Среди канифольных флюсов светлая канифоль является в известной степени идеальным флюсом, так как при нормальной температуре она коррозионно-инертна и является электроизолятором, ее остатки, в том числе конденсат, обладают теми же свойствами. После расплавления канифоль активно флюсует золото, серебро, медь и некоторые сплавы. Однако ее активность недостаточна для других металлов. Светлую канифоль применяют для гарантии от коррозии при пайке медных проводов в телефонной и телевизионной связи, в микроэлектронике.

По данным Г. А. Кондратовича и других, активность канифоли повышается при ультразвуковой обработке ( $f = 18 \div 22$  кГц) дисперсной смеси канифоли в растворителе в течение 1—20 мин, что сокращает время отмывки остатков флюса и повышает производительность труда.

Следует отметить, что предельная концентрация дыма от канифоли и ее флюсов при пайке составляет  $0,1 \text{ мг/м}^3$ . При больших количествах дыма возможны насморк, слезотечение, раздражение кожи, астма. Астма может быть и от изоцианидов, выделяющихся при нагреве изоляционных эмалей на основе полиуретанов на проводах. Предельная концентрация изоцианидов  $2 \cdot 10^{-6} \%$  [32].

Активность при низкотемпературной пайке и коррозионная активность флюсов существенно зависят от степени их кислотности и тем выше, чем ниже кислотность флюса при температуре пайки. Вместе с тем повышение кислотности флюсов до и после пайки способствует развитию коррозии в паяных соединениях и изделиях. Поэтому идеальным был бы флюс с высокой кислотностью при температуре пайки и низкой кислотностью до и после пайки.

Кислотность жидких растворов характеризуется величиной рН. Кислотность флюса зависит от его состава и может изменяться при нагреве по термическому циклу пайки вследствие

испарения или окисления, химического взаимодействия его с оксидами или металлом. При значении  $pH > 7$  флюс имеет щелочную реакцию; при  $pH = 7$  — нейтральную; при  $pH < 7$  — кислотную. Чем меньше  $pH$ , тем выше кислотность флюса. Все это требует правильного выбора температурно-временного режима пайки и строгого дозирования флюса.

Для низкотемпературной пайки меди и ее сплавов применяют четыре типа флюсов [31]. Флюсы первого типа характеризуются неизменностью значений  $pH$  до и после пайки [12]. Если при этом  $pH \leq 7$ , то флюс достаточно активен при пайке, но его высокая гигроскопичность до и после пайки способствует развитию коррозии паяного соединения. К таким флюсам относится, например, флюс 38Н. При  $pH$ , близком к 5—6, флюс слабо активен при пайке, а при температуре 20 °С до и после пайки не вызывает существенной коррозии. К таким флюсам относятся КЭ и ВТС (табл. 29, 30).

К флюсам второго типа отнесены такие,  $pH$  которых достаточно высок до пайки, уменьшается при нагреве и остается таким же после пайки при охлаждении до 20 °С (флюсы «Прима 1» и Ф55). Подобный характер изменения  $pH$  при нагреве и охлаждении обусловлен слабым испарением  $HCl$ , образующейся при разложении солянокислого гидразина (240 °С), хлорида аммония  $NH_4Cl$  (337 °С), солянокислого диэтиламина в растворе двух- и трехатомных спиртов.

К флюсам третьего типа отнесены такие, у которых  $pH \leq 7$  до и после пайки и возрастает при пайке и особенно после нее. К таким флюсам относятся КЭЦ, гидразиновый, «Прима 2».

Такой характер изменения кислотности у флюсов для низкотемпературной пайки при нагреве и последующем охлаждении обусловлен тем, что испарение  $HCl$  при нагреве в присутствии воды или одноатомного (этилового) спирта происходит интенсивнее, чем в двух- и трехатомных спиртах (например, в глицерине).

К четвертому типу относятся флюсы с относительно высоким значением  $pH$  (4—5) до и после пайки и низким его значением (1—2) при температуре пайки, например, флюсы ЛТИ-120, ЛК2, паста НИСО.

Для низкотемпературной пайки в качестве растворителей паяльных флюсов используют спирты: одноатомные (метанол, этанол, изопропиловый спирт и др.; двухатомные (гликоли); трехатомные (глицерин) или их смеси или полиэферы на основе спиртов. С увеличением относительной молекулярной массы в гомологическом ряду одноатомных спиртов уменьшается их растворимость в воде и появляется резкий запах, что характерно для высших спиртов.

К спиртам с высокой температурой кипения (разложения), высокими поверхностно-активными свойствами, без запаха, бесцветных и малотоксичных при температуре пайки 150—300 °С и растворимых в воде относятся глицерин, неонол, полиэтилен-

**Т а б л и ц а 29. Коррозионно-неактивные или слабоактивные флюсы для пайки металлов легкоплавким припоем ПОС 61**

| Флюс                     | Состав флюса  | Температурный интервал активности, °С | Назначение  |
|--------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Канифольно-спиртовой КЭ  | 30 % канифоли; 70 % этилового спирта (ректификат)   | 250—280                               | Для пайки меди припоями, содержащими 30 % Sn и выше. Для пайки латуней и бронз менее эффективен                   |
| Стеарино-парафиновый     | 30 % стеарина; 68 % парафина; 2 % триэтанолamina  | 130—300                               | Для пайки меди и латуни оловянно-свинцовыми и оловянно-кадмиевыми припоями (паяльником, в струе припоя, в ваннах) |
| ЛТИ-120                  | 70 % этилового спирта (95 %-ный) 24 % канифоли; 4 % солянокислого диэтиламина; 21 % триэтанолamina                            | 250—280                               | Для пайки меди, медных сплавов, углеродистой стали и цинка легкоплавкими припоями                                 |
| ЛМ-1                     | 100 мл ортофосфорной кислоты (плотность 1,6—1,7 г/см <sup>3</sup> ) 400 мл этиленгликоля или метилового спирта; 30 г канифоли | 200—250                               | Для пайки хромоникелевых коррозионно-стойких сталей припоями, содержащими более 30 % Sn                           |
| ЛК-2                     | 1 % хлорида аммония; 3 % хлорида цинка кристаллического; 30 % канифоли; 66 % этилового спирта                                 | 275—320                               | Для пайки меди, латуней и оцинкованного железа  |
| Флюсующие пасты          | 1) 10 м. ч канифоли; 5 м. ч животного жира; 2 м. ч нашатыря; 1 м. ч хлорида цинка; 1 м. ч воды                                | 180—300                               | Для пайки меди, стали и свинца легкоплавкими припоями   |
|                          | 2) 45 % технического вазелина; 30 % канифоли; 15 % глицерина; 6 % хлорида цинка (безводного); 4 % парафина                    | 180—300                               | Для пайки медных деталей приборов   |
| Раствор молочной кислоты | 15 % молочной кислоты; 85 % воды  | 180—280                               | Для пайки меди, латуни, бронзы; менее эффективен для сталей   |
| Гидразиновый             | 5 % солянокислого гидразина; вода остальное   | 150—330                               | Для пайки меди, латуни, бронзы  |

| Флюс | Состав флюса  | Температурный интервал активности, °С | Назначение   |
|------|---|---------------------------------------|--|
| Ф38Н | 50 % этиленгликоля или глицерина или их смеси 1 : 1; 25 % солянокислого диэтиламина; 25 % ортофосфорной кислоты | 300                                   | Для пайки нихрома, бериллиевой и алюминиевой бронз, константана, магнанина, коррозионно-стойких сталей |
| ФИМ  | 200 мл ортофосфорной кислоты; 1 мл этилового спирта; 1 мл воды  | —                                     | Для пайки алюминиевой и бериллиевой бронз, коррозионно-стойких сталей                                  |
| ВТС  | 100 г вазелина; 10 г салициловой кислоты; 10 г триэтаноламина; 40 г этилового спирта                            | 240—300                               | Для пайки меди, серебра, золота, платины и их сплавов  |

Т а б л и ц а 30. Коррозионно-активные флюсы для пайки легкоплавким припоем ПОС 61

| Флюс                | Состав флюса  | Температурный интервал активности, °С | Назначение флюса   |
|---------------------|---|---------------------------------------|--|
| Хлоридный           | 40 % хлорида цинка (безводного); 60 % воды  | 290—350                               | Для пайки углеродистых и низколегированных сталей, меди, никеля и их сплавов |
| Хлоридно-аммониевый | 48 % хлорида цинка (безводного); 12 % хлорида аммония; 40 % воды                                    | 150—320                               | Для пайки углеродистых и низколегированных сталей, меди, никеля и их сплавов |
| Гидразино-хлоридный | 70 % солянокислого гидразина (плавленого); 21,5 % хлорида цинка (плавленого); 8,5 % хлорида аммония | 150—280                               | Для пайки меди и ее сплавов  |
| Прима 1             | 73 г хлорида цинка; 27 г хлорида аммония; 60 г глицерина; 1000 мл метилового спирта; 1000 мл воды   | 280—290                               | Для пайки меди, медных сплавов и металлов платиновой группы                  |
| Прима 2             | 4 % хлорида аммония; 6 % хлорида цинка; 5 % соляной кислоты; 85 % воды                              | 330—370                               | Для пайки медных и железных сплавов  |
| № 3                 | 2 объема 30—40 %-ного водного раствора $ZnCl_2$ ; 1 объем соляной кислоты                           | 280—390                               | Для пайки коррозионно-стойких сталей, в частности 12Х18Н9Т                   |

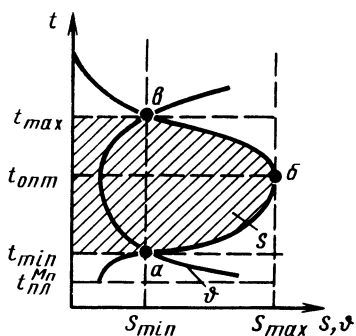


Рис. 27. Область температурного интервала активности ( $a-b$ ) флюса  $M_\phi$  с паяемым материалом  $M_k$  и припоем  $M_n$ :

$S$  — площадь растекания припоя;  
 $t_{\min}$ ,  $t_{\max}$  — нижняя и верхняя температурные границы активности флюса

гликоль, полиэфир. По данным В. Г. Самойленко, эти растворители флюса не обладают флюсующими свойствами при пайке меди сплавом Розе при  $150^\circ\text{C}$ . Флюсующая активность этих растворителей флюсов оценивается по времени флюсования и увеличивается с повышением температуры до  $300^\circ\text{C}$ . С увеличением относительной молекулярной массы полиэтиленгликолей от 600 до 3500 время смачивания при температуре  $240-390^\circ\text{C}$  ( $350^\circ\text{C}$ ) снижается. Поэтому для флюсов лучше использовать смеси высококипящих растворителей (например, глицерина или ПЭГ-400, ТУ 6-01-911-74), в которые добавляют 5 % неонала а для увеличения адгезионных свойств флюсов — до 15—20 % полиэфира П2200 (ТУ 6-05-1607-73).

Температурный интервал активности флюса при пайке зависит от состава применяемого припоя, паяемого материала и времени выдержки при температуре пайки. Критерием активности флюса может быть площадь растекшейся дозированной порции припоя или его контактный угол смачивания.

Существующие данные о температурных интервалах активности известных флюсов для различных пар  $M_k-M_n$  пока ограничены. В большинстве случаев ограничиваются данными о температуре пайки, ориентировочно определяемыми по испаряемости или термостойкости компонентов флюсов без указания оптимальной температуры пайки и допустимого времени сохранения активности флюса (его «живучести») при этой температуре. Форма области, определяющей температурный интервал активности флюса  $M_\phi$  с паяемым материалом  $M_k$  и припоем  $M_n$ , имеет в общем виде форму, представленную на рис. 27.

Важными признаками при оценке пригодности флюса, кроме его активности при пайке и коррозионной активности его остатков после пайки, являются его электрическая проводимость и влияние на свойства паяемого материала. Желательно, чтобы флюс, а также его конденсат не вызывали коррозии после пайки, были электропроводными при пайке и являлись изоляторами при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Флюс не должен ухудшать свойства паяемого металла и паяных соединений в результате насыщения его, например, бором, развития межзеренной или химической эрозии и др.

Существующие в настоящее время флюсы для низкотемпера-

турной пайки меди и стали можно классифицировать на канифольные, органические без канифоли и неорганические.

**Флюсы для низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов.** В табл. 31 приведены состав, температурные интервалы активности и назначение некоторых флюсов, разработанных с 1973 по 1984 г. [23]. По данным В. И. Павлова, среди органических кислот и других веществ, пригодных в качестве активатора флюсов

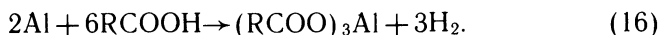
**Т а б л и ц а 31. Некоррозионно-активные и слабокоррозионно-активные флюсы для низкотемпературной пайки и лужения алюминия**

| Марка или номер флюса | Состав флюса, %   | Температурный интервал активности, °С | Примечание   |
|-----------------------|---|---------------------------------------|--|
| 1                     | 4—7 борофтористого аммония; 4—7 борофтористого кадмия; эпоксидная смола остальное                         | < 450                                 | Для пайки алюминия и сплава Al — 2 % Mg. Высокая коррозионная стойкость                                    |
| Ф59А                  | 10 ± 0,5 фторбората кадмия; 2,5 ± 0,5 фторбората цинка; 5 ± 0,5 фторбората аммония; 82 ± 1 триэтанолamina | 150—320                               | Для пайки алюминия или сплава АМц с медью и сталью припоями на основе: Sn — Zn, Zn — Cd                    |
| Ф61А                  | 10 фторбората цинка; 8 фторбората аммония; 82 триэтанолamina  | 150—320                               | Для пайки алюминия, бериллиевой бронзы, оцинкованного железа, меди припоями на основе Sn — Zn, Zn — Cd     |
| Ф54А                  | 10 фторбората кадмия; 8 фторбората аммония; 82 триэтанолamina   | 150—320                               | То же  |
| 3                     | 7 бромида висмута; 47,9 уксусной кислоты; 55,1 олеиновой кислоты  | < 380                                 | Для лужения в жидком олове более активен, чем флюс Ф54А  |
| 4                     | 4,2—10 иодида титана; 16,8—22 канифоли; капроновая кислота — остальное                                    | < 350                                 | Для лужения алюминиевых сплавов слабокоррозионно-активен   |
| 5                     | 1,5 триэтанолamina; 4 салициловой кислоты; 94,5 этилового спирта  | 150—320                               | Для пайки алюминия с медью, бериллиевой бронзой, оцинкованным железом припоями на основе Sn — Zn и Zn — Cd |
| 6                     | 30 г иодида лития; 200 мл олеиновой кислоты   | < 450                                 | Для пайки алюминия   |
| 7                     | 4,2—10 иодида титана; 16,8—22 канифоли; капроновая кислота — остальное                                    | < 450                                 | То же  |

| Марка или номер флюса | Состав флюса, %  | Температурный интервал активности, °С | Примечание  |
|-----------------------|--|---------------------------------------|---|
| 8                     | 5—8,6 BiBr <sub>2</sub> ; 23—39,8 капроновой кислоты; канифоль — остальное       | < 450                                 | »   |
| 9                     | 10—15 тетрафторбората цинка; триэтаноламин остальное                             | ≥ 350                                 | Для пайки алюминиевых проводов с изоляцией (повышает ее стабильность) * |
| 10                    | 7,5 фторгидрата анилина; 92,5 канифоли   | < 250                                 | То же   |
| 11                    | 83 триэтанолamina; 9 фторбората кадмия; 7 кислого фтористого аммония; 1 канифоли | > 150                                 | »   |

\* Пат. 79633 СРР, МКИ<sup>3</sup> В23 К 35/22, В 23 К 35/34

для пайки алюминия и его сплавов при температуре < 300 °С, пригодны только алифатические кислоты, их амиды, а также триэтаноламин, имеющий свойства основания. Среди алифатических кислот наиболее активны одноосновные кислоты: стеариновая, элаидиновая, олеиновая, лауриновая, коприновая, каприловая, капроновая, валериановая, масляная, пропионовая, уксусная, муравьиная. Активность этих кислот повышается с увеличением их относительной молекулярной массы и температуры плавления. При взаимодействии их с оксидом Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> протекают следующие реакции:



Наиболее энергично протекает реакция (14) с муравьиной и уксусной кислотами, менее энергично с капроновой кислотой. Однако введение этих кислот во флюсы мало перспективно вследствие их интенсивного выкипания при температуре пайки и снижения энергии разрыва связи COO—HC — с возрастанием молекулярной массы кислоты. Соли карбоновых кислот, получаемые по реакциям (15) и (16), термически неустойчивы. Например, уксуснокислый алюминий разлагается при температуре 200 °С.

Среди двуосновных предельных кислот, более сильных, чем одноосновные, первые три члена гомологического ряда кислот (щавелевая, малоновая, янтарная) не обладают активностью при пайке алюминия, что обусловлено декарбоксилированием их при

нагреве. Высшие кислоты имеют во флюсах такую же активность, как и одноосновные кислоты, с тем же числом атомов в радикале.

Ангидриды кислот не активны при пайке. Более высокую активность во флюсах для пайки алюминия имеют галогензамещенные кислоты, что объясняется одновременным воздействием на оксид алюминия как карбоксильной группы, так и атома галогена.

Обнаружено, что активны во флюсах некоторые твердые аминокислоты:  $\alpha$ -аминопропионовая и фениланитрониловая, которые обеспечивают хорошее растекание припоя.

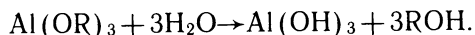
С учетом физических свойств, степени токсичности и активности во флюсах среди органических кислот наиболее пригодными можно считать высшие жидкие незамещенные кислоты, их твердые аналоги и аминокислоты. Флюсующая способность смесей кислот в любых соотношениях не превышает активности компонента с наиболее высокой молекулярной массой.

Салициламид и мочевина по активности равноценны действию капроновой или элаидиновой кислоты.

Активность аммонийных солей органических кислот близка к активности исходных одно- и двухосновных кислот. Эти соли имеют преимущества перед амидами — меньшую летучесть при пайке и лучшую растворимость в кислотах. Характерно, что введение органических кислот и их производных в триэтаноламин не повышает его активности при флюсовании алюминиевых сплавов.

Дальнейшее повышение флюсующей активности кислотных органических растворов достигается при добавке в них галлоидных солей аминов или металлов. Введение в дециловый спирт (температура кипения 231 °C) LiI и SnCl<sub>2</sub> или в капроновую кислоту (температура кипения 205 °C) LiBr, LiI, NaI, SnCl<sub>2</sub> в виде кристаллогидратов активизирует раствор.

Введение в кислотные флюсующие растворы солей 95 %-ного этилового спирта дезактивирует их из-за вытеснения воды по реакции:



Однако присутствие кристаллизационной воды в спиртовом растворе хлорида олова не влияет на активность его при пайке.

Для пайки алюминия легкоплавкими припоями М. А. Максимихин, В. Д. Нестерова, В. Д. Орловой были предложены реактивные органические флюсы. Основой этих флюсов является органический аминокислотный триэтаноламин, а активаторами фторбораты тяжелых металлов и аммония. В местах контакта фторборатов с алюминием через несплошности в оксидной пленке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> высаживаются металлы: кадмий и цинк. Остатки триэтаноламина в процессе нагрева переходят в инертное вещество смолообразного вида, не вызывающее коррозии паяных соединений. Эти флюсы и их остатки после пайки имеют рН=8, что также подтверждает

их некоррозионно-активность. Все эти флюсы не отличаются по коррозионной активности при пайке алюминия, но при пайке его со сплавом АМц, медью и ее сплавами наиболее эффективным является флюс Ф59А. Температурный интервал активности этих флюсов 150—300 °С. Флюсы этого типа непригодны для пайки в нахлестку с укладкой припоя у зазора деформируемых сплавов АМг, Д1, Д16, В95 и литейных алюминиевых сплавов. Ими можно пользоваться только при облуживании паяемой поверхности алюминия с последующей пайкой, например с флюсом ЛТИ-120. При этом температура между паяемыми деталями при пайке не должна отличаться более чем на 10 °С. Остатки флюсов легко смываются водой или протираются влажной салфеткой, смоченной водой или этиловым спиртом, и не вызывают сколько-нибудь заметной коррозии в течение более 1000 ч. Исследования показали, что по сравнению с флюсами, содержащими в качестве растворителя уксусную, капроновую, олеиновую, лауриновую кислоты, а в качестве активатора хлорид висмута, флюс Ф54А обеспечивает большую площадь растекания припоя П250А по алюминию АД1; но он менее активен при пайке коррозионно-стойкой стали, латуни и меди, чем флюсы, содержащие хлорид висмута.

Флюсы Ф54А, Ф59А и Ф61А пригодны для пайки в указанном интервале температур припоями П200А, П250А, П300А, П170А и П150А. Для этого используют терморегулирующие электропаяльники, индукционный нагрев, а также пайку погружением в расплавленный припой. Недопустима пайка с этими флюсами при нагреве открытым пламенем из-за возможности их сгорания. При температуре выше 350 °С в паяных швах соприкасающихся соединений, выполненных этими флюсами, образуются непропаи. При быстром нагреве (электроконтактным, индукционным способами) в среде чистого аргона пайка с этими флюсами возможна при температуре 320 °С.

Есть данные о применении для пайки алюминиевых сплавов легкоплавкого припоя  $\text{Sn} - (8-15)\% \text{Zn} - (2-5)\% \text{Pb}$  с температурой плавления 190 °С с флюсом в виде раствора борнофтористого и фтористого аммония в моноэтаноламине. Во флюсах для низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов вместо канифоли предложено использовать пентаэритрит бензоата, который более термостоек, чем канифоль, а остатки его некоррозионно-активны и в виде эластичной пленки предохраняют паяные швы от окисления. В качестве активатора флюса используют карбоновые кислоты. Паяные соединения (припой П250) не разрушаются в солевом растворе в течение 200 суток. Припой из проволоки ( $\text{Sn}-\text{Pb}-\text{Ag}$ ) с сердцевинкой из указанного флюса пригоден для пайки всех алюминиевых материалов, в которых содержится менее 3 % Mg и 3 % Si.

**Флюсы для высокотемпературной пайки меди, ее сплавов и сталей.** Для успешного выполнения важнейшей функции паяльных флюсов — удаления оксидов с поверхности меди и сталей при

высокотемпературной пайке необходимо их химическое взаимодействие с оксидной пленкой на поверхности паяемого материала и припоя. Для этого среди компонентов флюса должны быть более сильные окислители, чем кислород. По окислительной способности активнее кислорода являются хлор и фтор. Поэтому высокоактивные флюсы, как правило, содержат хлориды и (или) фториды. При этом состав флюсов должен обеспечивать их температуру плавления ниже температуры плавления припоя.

При пайке меди, медных сплавов и сталей в качестве других компонентов флюсов применяют боридные соединения, например буру  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , борную кислоту  $\text{H}_3\text{BO}_3$  и борный ангидрид  $\text{B}_2\text{O}_3$ .

Борная кислота растворима в спирте, воде и минеральном масле; ее плотность  $1,5 \text{ г/см}^3$ . При нагреве до  $100^\circ\text{C}$  из нее удаляется часть воды и борная кислота превращается в  $\text{HBO}_2$ . При более высоком нагреве из нее удаляется вся вода и образуется борный ангидрид  $\text{B}_2\text{O}_3$ , застывающий в виде стеклообразной массы, имеющей температуру плавления  $580^\circ\text{C}$  и испаряющийся при относительно невысокой температуре. Основное свойство  $\text{B}_2\text{O}_3$  как компонента флюса в том, что он образует с оксидами меди, цинка, никеля, железа сравнительно легкоплавкие бораты, метабораты и другие сложные соединения.

Бораты имеют хорошие раскисляющее и защитные свойства и длительно защищают паяемый металл и припой от окисления. Большинство боратов плавятся и эффективны при температурах вблизи  $760^\circ\text{C}$ . Для них характерна относительно высокая вязкость в расплавленном состоянии, и поэтому их обычно смешивают с другими солями. Бораты малорастворимы в  $\text{B}_2\text{O}_3$  и при избытке образуют два жидких слоя, что снижает активность таких флюсов. Борный ангидрид  $\text{B}_2\text{O}_3$  — компонент флюсов для пайки при температуре от  $900^\circ\text{C}$  и выше. Однако в нем мало растворимы оксиды хрома, цинка, кремния и алюминия, и поэтому он не пригоден в качестве компонента флюсов для пайки сталей и сплавов, на поверхности которых образуются оксиды этих металлов.

Бура образует бесцветные прозрачные кристаллы моноклинной структуры. Ее плотность  $1,75 \text{ г/см}^3$ . Бура растворима в воде. При нагреве из буры удаляется кристаллизационная вода: при  $100^\circ\text{C}$  — 5 молей, при  $130^\circ\text{C}$  — 7 — 8 молей; при  $150^\circ\text{C}$  — 9 молей; выше  $200^\circ\text{C}$  — вся вода. Поэтому, чтобы при нагреве бура не кипела, ее необходимо использовать во флюсах в прокаленном виде. Она плавится при температуре  $743^\circ\text{C}$ , а в жидком состоянии распадается на натрийметаборат и борный ангидрид  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \rightleftharpoons 2\text{NaBO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ . Бура используется во флюсах для пайки при относительно невысоких температурах, например, серебряными припоями.

Фториды более жидкотекучи, но хуже защищают паяемый металл от окисления, чем бораты. Фториды имеют и более высокие раскисляющие (флюсующие) свойства. Их используют во

флюсах вместе с боратами или щелочными соединениями, такими, как например карбонаты.

В качестве составляющих флюсов наибольшее распространение получили смеси буры и борной кислоты ( $B_2O_3 \cdot Na_2O \cdot 2B_2O_3$ ), которые образуют два соединения:  $Na_2O \cdot 3B_2O_3$  и  $Na_2O \cdot 4B_2O_3$ . Продукты взаимодействия буры с оксидами образуют твердую стеклообразную корку, трудноудаляемую с поверхности паяного соединения механическим путем и плохо растворимую в воде.

Соли борной кислоты  $K_4B_4O_7$  и  $Na_2B_4O_7$  образуют непрерывный ряд твердых растворов с минимумом при  $660^\circ C$  и при содержании 35 молей  $K_2B_4O_7$ . Соли  $KF$  и  $K_2B_4O_7$  образуют эвтектику с температурой плавления  $680^\circ C$  и содержащую 80 молей  $K_2B_4O_7$ . Соли  $Na_2F$  и  $K_2B_4O_7$  образуют эвтектику с температурой плавления  $712^\circ C$  при содержании 44 моля  $K_2B_4O_7$ .

Некоторые смеси солей системы  $KF-NaF-B_2O_3$ , пригодные в качестве флюсов и содержащие гигроскопичные компоненты  $KF$  и  $B_2O_3$ , совершенно негигроскопичны [12].

Смеси борного ангидрида и буры оказывают слабое флюсующее действие при пайке сталей, легированных большими количествами хрома. Для их активирования добавляют разные соли. Наиболее активны добавки фторидов щелочных металлов или фторборатов. Фториды металлов добавляются во флюсы, предназначенные для пайки при температурах  $850-1200^\circ C$ , а фторбораты — для пайки при температурах ниже  $850^\circ C$  (табл. 32, 33). Стеклообразные остатки флюса ПБ200 (табл. 33) наиболее надежно и быстро удаляют при погружении паяных соединений в водный раствор кислого сернокислого калия  $KHSO_4$  (100 мл  $KHSO_4$  на 900 мл воды); промывку ведут при  $20$  или  $60^\circ C$  в течение 60 и 10 мин соответственно. После чего паяное соединение промывают в проточной воде и сушат на воздухе.

При использовании пасты из флюсов ПБ200 или ПБ201 (табл. 33), замешанной на воде или спирте, шов может получиться пористым. Этот дефект отсутствует при замешивании пасты на специальных растворителях — многоатомных спиртах: глицерине и этиленгликоле. Такая паста однородна и хорошо прилипает к паяемому металлу, растворители хорошо испаряются и не вызывают коррозии.

Бораты слабо растворимы в жидком борном ангидриде, поэтому при нагреве до температуры  $900^\circ C$  в их смесях образуются два жидких несмешивающихся слоя: борного ангидрида и боратов. Активность борного ангидрида, несмотря на то, что его температура плавления равна  $580^\circ C$ , проявляется только при температуре выше  $900^\circ C$ . Образующийся в таких флюсах метаборат  $NaBO_4$  активизирует процесс растворения оксидов, поэтому активность буры как компонента флюса проявляется при температурах немного выше ее температуры плавления и ниже температуры активного действия борного ангидрида.

Борный ангидрид, бура и их смеси непригодны для пайки

Т а б л и ц а 32. Состав, температурные интервалы активности и назначение флюсов электрохимического действия для высокотемпературной пайки

| Флюс                         | Состав флюса, %   | Температурный интервал активности, °С | Назначение   |
|------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| ПВ209*                       | 41—43 KF; 34—36 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 22—24 KBF <sub>4</sub>  | 500—750                               | Для пайки коррозионно-стойких сталей (по данным С. Н. Лощманова)                   |
| ПВ209Х*                      | 34,8—36,8 H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> ; 27,9—29,9 КОН; 34,3—36,3 KF  | 600—750                               | То же  |
| ПВ284*                       | 25±2 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 35±2 KF (обезвоженный); 40±2 KBF <sub>4</sub>  | 500—750                               | Для пайки коррозионно-стойких сталей (по данным С. Н. Лощманова, В. М. Гостениной) |
| ПВ284Х*                      | 29—31 H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> ; 25—27 КОН; 43—45 KF  | 500—750                               | Для пайки коррозионно-стойких сталей   |
| «Салют 1»<br>(ТУ 48-0537—78) | 39 H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ; 3,5 KNO <sub>3</sub> ; 40 KF·2 H <sub>2</sub> O; 6,0 KBF <sub>4</sub> ; 4,5 KCl; 7,0 KHF <sub>2</sub>         | 550—750                               | Для пайки латуней (по данным Б. С. Шеера С. В. Лашко, Г. А. Асиновской и др.)      |
| —                            | 52—58 KBF <sub>4</sub> ; 26—28 ZnCl <sub>2</sub> ; 8—10 BaCl <sub>2</sub> ; 8—10 LiF  | 450                                   | Для пайки алюминиевых бронз (по данным В. Р. Бойко)                                |
| —                            | 55 K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; 12,5 CdCl <sub>2</sub> ; 32,5 H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>  | 450                                   | Для пайки алюминиевых бронз (по данным В. Р. Бойко, С. В. Лашко)                   |
| —                            | 15—22 KBF <sub>4</sub> ; 8—10 криолит; 5—8 ZnCl <sub>2</sub> ; 8—10 CaF <sub>2</sub> ; 9—11 MgCl <sub>2</sub> ; тетраборнокислый натрий остальное | 450                                   | Для пайки алюминиевых бронз (по данным М. Р. Леписко и др.)                        |

\* ГОСТ 23178—78.

Т а б л и ц а 33. Флюсы для высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов и коррозионно-стойких сталей

| Флюс    | Состав флюса, %  | Температур-<br>ный интервал<br>активности,<br>°С | Назначение   |
|---------|--|--|--|
| ПВ200 * | 65—67 В <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 18—20 Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ; 14—16 CaF  | 850—1200   | Для пайки сталей, медных и алюминиевых сплавов. Образует стеклообразные шлаки (по данным С. Н. Лощманова)  |
| ПВ201 * | 76—78 В <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 11—13 Na <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·10 Н <sub>2</sub> O; 0,9—1,1 CaF <sub>2</sub> ; 0,9—1,1 лигатура (4 Mg, 48 Cu, 48 Al) | 850—1200   | То же  |
| —       | 5—15 Н <sub>3</sub> ВО <sub>3</sub> ; 20—25 LiF; 20—55 NH <sub>4</sub> F; 5—10 марганцовистого калия; 10—22 азотнокислого никеля; 5—8 кремниевокислого натрия                    | 1050—1150  | Для пайки коррозионно-стойких сталей. Не образует стеклообразных шлаков  |
| Бура    | 100 буры   | 880—1150   | Для пайки углеродистых сталей, чугуна, меди, латуни, бронзы, твердых сплавов с припоями системы Cu—Zn, Ag—Cu   |
| —       | 80—50 буры; 20—50 борной кислоты   | 850—1150   | То же при помощи систем Cu—Zn, Ag—Cu, Cu—Ni  |
| 18В     | 40 KF (обезвоженного); 60 борной кислоты   | 650—850  | Для пайки коррозионно-стойких, конструкционных жаропрочных сталей, а также никелевых, медных, серебряных, латунных припоев (по данным С. Н. Лощманова) |
| АНП1    | 62 В <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 16 Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ; 10 KF; 9 KB <sub>5</sub> O <sub>7</sub> ; 3 K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>                | 850—1260   | Для пайки высоколегированных сталей. Температура плавления 720 °С (по данным Ю. И. Людвига)  |
| АНП2    | 68 В <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 20 Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ; 9 KB <sub>5</sub> O <sub>8</sub> ; 3 K <sub>2</sub> ZrC <sub>6</sub>                       | 800—1100   | Для пайки высоколегированных сталей. Температура плавления 650 °С (по данным Ю. И. Людвига)  |
| —       | 90 буры; 2,2—2,8 NaF; 7,2—7,4 NaCl   | 800—1150   | Для пайки чугуна и латунных припоев  |
| Ф100    | 46,5 KBF <sub>4</sub> ; 36,5 Na <sub>2</sub> ВО <sub>7</sub> ; 13,5 WO <sub>3</sub> ; 3,5 Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 900—1100<br>( <i>t<sub>пл</sub></i> = 500 °С)    | Для твердосплавного инструмента (по данным Н. А. Ключко и др.)   |

\* ГОСТ 23178—78.

металлов и сплавов серебряными припоями с температурой плавления 600—850 °С. Для этого используют смеси борного ангидрида с фторидами или смеси тетраборатов с борным ангидридом и бурой.

Фториды взаимодействуют с большинством оксидов металлов при высокотемпературной пайке и потому используются как активный компонент, особенно если на поверхности паяемого металла присутствуют оксиды хрома и алюминия. Фториды часто добавляют во флюсы для увеличения жидкотекучести жидких боратов и улучшения заполняемости жидким припоем капиллярных зазоров.

Более активны флюсы из смесей борного ангидрида, буры, фторидов и фторборатов (особенно тетраборатов  $\text{Me}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ;  $\text{R}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  и фторборатов  $[(\text{BF}_{4n}\text{Me})]$ . При этом достигается высокая флюсующая способность и относительно слабое коррозионное воздействие остатков флюсов на паяное соединение. В качестве компонентов для флюсов пригодны следующие фторбораты:

- 1)  $\text{BF}_4\text{Me}'$  или  $\text{BF}_3 \cdot \text{Me}'\text{F}$ , где  $\text{Me}' = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}, \text{Cs}, \text{Rb}, \text{NR}_4$ ;
- 2)  $(\text{BF}_4)_2\text{Me}''$  или  $2\text{BF}_3 \cdot \text{Me}''\text{F}_2$ , где  $\text{Me}'' = \text{Cu}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Mg}, \text{Zn}, \text{Co}, \text{Pb}$ ;
- 3)  $(\text{BF}_4)_3\text{Al}$  или  $\text{BF}_3 \cdot \text{AlF}_3$ .

Тетрабораты калия и натрия хорошо смачивают поверхность металлов и активно влияют на разложение их оксидов. Тетрафторборат калия как компонент флюсов труднее диссоциирует, чем фторборат натрия, и потому он менее желателен в качестве компонента паяльных флюсов. Тетрафторборат калия был предложен как компонент флюсов для пайки хромистых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей еще в 1976 г. Он пригоден также для пайки золотых и серебряных изделий. Нашли применение только некоторые смеси, содержащие борный ангидрид, буру, бораты и фториды, подобранные опытным путем (см. табл. 32, флюсы ПВ209 и ПВ284). Эти флюсы не образуют стекловидных шлаков и легко удаляются кипячением в воде или в 10 %-ном водном растворе лимонной кислоты. Флюс ПВ209 можно наносить перед пайкой в виде сухого порошка или пасты, замешанной на воде или спирте. При изготовлении пасты флюс вводят небольшими порциями в воду, так как при его растворении выделяется сравнительно большое количество теплоты. Нанесение сухого флюса ПВ209 на паяемый металл перед пайкой иногда приводит к его пригоранию. Поэтому лучше наносить свежий флюс непосредственно при пайке. Остатки флюса 209 после пайки способствуют коррозии паяных соединений, и их необходимо тщательно смывать в холодной, а затем в горячей проточной воде. Пайку с флюсами ПВ209 и ПВ284 необходимо проводить под приточно-вытяжной вентиляцией, так как тетрафторборат калия при нагреве до 750 °С распадается с образованием ядовитого газообразного фтористого бора  $\text{BF}_3$ .

Фторид калия образует с 33 % NaF простую эвтектику с температурой плавления 700 °С. Флюс из смеси таких компонентов может быть изготовлен в виде пасты, замешанной на воде, спирте и четыреххлористом углероде.

Хлориды действуют аналогично фторидам, но имеют более узкий интервал действия и при более низких температурах, чем фториды.

Введение хлоридов во флюсы на фторидной основе понижает их температуру плавления. Хлориды имеют тенденцию окислять паяемый металл.

Щелочи — поташ и гидроокись натрия — используют для повышения температурного интервала активности флюсов; при этом даже следы влаги могут существенно уменьшать продолжительность действия флюса (его «живучесть»).

Среди высокотемпературных различают флюсы:

1) галогенидные (хлоридно-фторидные с температурными интервалами активности 400—625 °С и 600—1000 °С);

2) с простыми и комплексными фторидами (с температурными интервалами активности 550—860 °С и 750—11 000 °С);

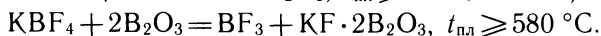
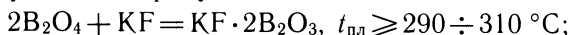
3) из фосфатов и силикатов с соединениями бора (с температурным интервалом активности выше 1000 °С);

4) без соединений бора с фторидами и хлоридами; время действия флюсов обычно менее или равно 5 мин.

Составы важнейших флюсов и их ориентировочные температуры активности приведены в табл. 43, 44.

Флюсы ПВ209 и ПВ284 (ГОСТ 23178—78) первоначально были разработаны для пайки коррозионно-стойких сталей серебряными припоями, содержащими 40—45 % Ag при температуре 620—750 °С. Обнаружено, что при газопламенной пайке крупногабаритных изделий из латуней серебряными припоями с этими флюсами в паяных швах возникает значительное число пор и непропаев, снижающих герметичность соединений, а после удаления галтельных участков — ухудшающих микрогеометрию их поверхности. Подпайка дефектных мест увеличивает трудоемкость изготовления и снижает эксплуатационные характеристики изделий. В связи с этим разработан флюс «Салют 1» для газопламенной пайки латунных, в том числе крупногабаритных изделий [16].

Термографические, рентгеноструктурные и химические исследования флюсов ПВ209, «Салют 1» и их шлаков после переплава, после растекания их по латуни и меди, а также после пайки серебряными припоями показали, что в процессе нагрева флюса ПВ209 происходят реакции между его компонентами с расплавлением образующихся продуктов:



При температуре 400—445 °С плавятся KF и KBF<sub>4</sub>. При температуре 500 °С во флюсе образуются простые и комплексные соединения фторидов, которые при дальнейшем повышении температуры растворяются в жидком флюсе. При нагревании до 750 °С и выше образуются комплексные соединения боратов.

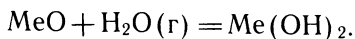
Растекание жидкого флюса по поверхности латуни происходит с образованием четырех зон, различающихся по фазовому составу. Во второй зоне содержится больше соединений бора, чем в первой, центральной зоне. В результате окислительно-восстановительных реакций и обесцинкования поверхностных слоев латуни на них появляется слой чистой меди.

Как показали рентгенограммы шлаков, образовавшихся на поверхности латуни, подвергнутой предварительно флюсованию, и оксидов, образовавшихся на нефлюсованной поверхности, окисление металла под слоем флюса происходит более интенсивно, чем без него. Медь в контакте с флюсом окисляется в 2 раза быстрее, чем латунь.

Взаимодействие жидкого припоя с паяемым металлом, флюсом и компонентов флюса между собой способствует увеличению продуктов реакции. Изменение состава флюса в процессе его растекания и затекания в зазор между деталями ухудшает условия смачивания паяемого металла жидким припоем, а выделение газообразных составляющих BF<sub>3</sub>, H<sub>2</sub> и других в зазоре при недостаточно быстром их дрейфе в галтельные участки паяных швов способствует образованию газовых пор в шве.

Процесс флюсования при газопламенной пайке, таким образом, является сложным: при повышении температуры происходят различные электрохимические и химические процессы взаимодействия компонентов флюсов между собой и с парами воды, с оксидами и паяемым металлом, продуктов реакции между собой.

В начале нагрева на поверхности паяемого металла оксиды, образовавшиеся под действием паров воды из пасты флюса и газового пламени, переходят в гидроксиды меди и цинка: Zn(OH)<sub>2</sub> и Cu(OH)<sub>2</sub>. При нагреве выше 80 °С гидроксиды разлагаются, что приводит к нарушению сплошности оксидной пленки на металле:



Расплав флюса через несплошности в оксидной пленке растворяет под ней паяемый металл вследствие преимущественного протекания процесса по термодинамически менее равновесным местам. В результате этого, как и при растворении паяемого металла в жидком припое, оксидная пленка диспергирует и переходит в расплав флюса с образованием комплексных соединений фторидов цинка в результате обмена катионами между фторидами щелочных металлов и диссоциированными оксидами цинка. Дальнейшее повышение температуры ускоряет этот процесс; медь и цинк восстанавливаются, взаимодействуют с компонентами флю-

са и при температуре 600 °С образуют соединения, растворимые во флюсе.

При дальнейшем повышении температуры до 700 °С из расплава флюса испаряются борный ангидрид и соединения  $\text{BF}_3(\text{BOF}_2)$ , что приводит к выпадению избыточных комплексных соединений меди и цинка, диссоциирующих вслед за этим с образованием простых фторидов. Эти фториды взаимодействуют с парами воды, гидролизуются с образованием оксидов и фтористого водорода. При 700—800 °С появляются комплексные соединения боратов типа  $\text{K}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$ , а ионы  $\text{O}^{2-}$  и катионы  $\text{K}^+$  образуют высокоактивный оксид, который далее соединяется с борным ангидридом, а последний взаимодействует с оксидами меди и цинка, образуя с ними комплексные соединения. Все эти процессы активизируются в присутствии жидкого припоя. В результате этих процессов активность флюса понижается.

Состав шлаков после газопламенной пайки латуни с флюсом ПВ209 зависит от массы паяемых узлов вследствие ее влияния на продолжительность нагрева, степень завершенности процесса флюсования и снижения активности флюса. В шлаках этого флюса при пайке мелких деталей содержатся соединения  $\text{KZn}_4\text{F}_7$  и  $\text{K}_3\text{Zn}_2\text{F}_7$ , которые отсутствуют в шлаках, образующихся при пайке более крупных и массивных изделий. Вместе с тем в шлаках появляются новые фториды  $\text{K}_3\text{CuF}_4$ ,  $\text{ZnF}_2$ , что характерно для более длительного процесса флюсования. Независимо от массы деталей в шлаках флюса ПВ209 после пайки латуни Л63 присутствуют оксиды  $\text{ZnO}$  и следы  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

Различие процессов флюсования меди и латуни состоит в том, что в последнем случае комплексные соединения фторидов не образуются: при более высоких температурах получают простые бораты цинка и меди, которые гидролизуются парами воды.

Таким образом, непропаи при газопламенной пайке массивных изделий из латуни обусловлены большей продолжительностью процесса их нагрева и окисления, после чего активность флюса оказывается недостаточной и окисленные участки препятствуют равномерному смачиванию паяемого материала жидким припоем.

При газопламенном нагреве газовая пористость в шве возникает главным образом вследствие воздействия  $\text{BF}_3$ , а также водорода и частично азота, попадающих в зону пайки из газового пламени. При этом применение слабовосстановительного пламени способствует некоторому снижению пористости в швах.

Флюс «Салют 1», основу которого составляют соединения  $\text{H}_3\text{BO}_3\text{—KF}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  с отношением 0,9, содержит также компоненты, препятствующие скоплению газов в зазоре, более эффективно защищающие паяемый металл от окисления и способствующие растворению оксидной пленки. Введение  $\text{KNO}_3$  во флюс «Салют 1» защищает металл от окисления и понижает число непропаев в шве. Установлено, что  $\text{KNO}_3$  защищает латунь в интервале температур 400—700 °С, но окисляет медь, начиная от 500 °С,

и поэтому для высокотемпературной пайки меди флюс «Салют 1» не рекомендуется.

В процессе растекания состав флюса «Салют 1» не изменяется, газовые включения не образуются, что способствует затеканию припоя в зазор ровным фронтом; флюс имеет больший интервал температурно-временной активности, чем флюс ВП209.

При пайке с флюсом «Салют 1» величины зазора (0,01—0,5 мм) и нахлестки (2—5 мм) существенно не влияют на качество паяного соединения. Это обусловлено отсутствием в шлаках оксидов металлов. Температурный интервал активности флюса «Салют 1» при пайке с серебряными припоями составляет 650—750 °С.

Остатки и шлаки коррозионно-активных флюсов-электролитов, имеющих  $pH < 7$ , удаляют с поверхности паяного изделия путем тщательного промывания его в растворителях, например воде.

Введение во флюсы для пайки серебряных припоев 5 %  $SiO_2$  в виде очень мелких частиц избавляет от необходимости просушки флюса перед пайкой.

**Флюсы для высокотемпературной пайки алюминия.** При высокотемпературной пайке алюминия используют флюсы следующих систем: 1)  $KCl-LiCl-NaCl-ZnCl_2$  (с добавкой фторидов); 2)  $KCl-LiCl-NaCl-ZnCl_2$  ( $CdCl_2$ ); 3)  $KCl-LiCl-NaCl$  (с криолитом или  $KF$  и  $AlF_3$ ); 4)  $KCl-NaCl-BaCl_2$ .

Флюсы систем 1 и 2 относятся к реактивным; они нашли применение при пайке в печах (система 2), газопламенным нагревом и погружением (система 1). Флюсы систем 3 и 4 — неактивные — применяют в основном для пайки во флюсовых ваннах.

В процессе флюсования алюминия и его сплавов в расплавах систем 3 и 4 имеет место механизм электрохимического разрушения оксидной пленки на паяемом металле и твердом припое [24]. Поверхность окисленного алюминия в расплавах хлоридных и хлоридно-фтористых солей заряжена положительно. Поэтому на первой стадии флюсования на межфазной границе оксид — расплав флюса адсорбируются поверхностно-активные ионы — преимущественно анионы. Ионы  $Al^{3+}$  из металла мигрируют через несплошности в слое оксида, обусловленные нестехиометричностью его состава, к границе раздела его с флюсом под действием поля напряжением  $\sim 100$  В при толщине пленки 100 нм. Оксидная пленка разрушается, когда стационарный потенциал алюминия  $E_{ст}$  в расплаве флюса становится более положительным, чем потенциал активации  $E_a$ . При потенциале  $E_a$  галогениды вытесняют ионы гидрооксида с поверхности алюминия, препятствуя его электрохимическому окислению. При этом химическое сродство алюминия к кислороду уменьшается и становится меньше, чем сродство алюминия к иону  $Cl^-$ .

Условие  $E_{ст} > E_a$  возможно при образовании в расплаве флюса аниона (ион  $F^-$ ), активно разрушающего оксид алюминия, и деполяризатора катодного процесса (комплексный катион

( $\text{AlF}$ ) $^{2+}$ ). Последний возникает при термической диссоциации криолитовой группировки ( $\text{AlF}_6$ ) $^{3-}$ .

При пайке алюминия реактивными флюсами 1 и 2 (табл. 34) деполяризатором катодного процесса, по мнению Е. И. Сторчая, служат катионы солей тяжелых металлов, разряжаемые в дефектных местах оксидной пленки. Дефектные места образуются в оксидной пленке при нагреве (в условиях защиты ее от воздуха) вследствие разницы коэффициентов линейного расширения пленки и металла, присутствия в металле включений других фаз, скопления дислокаций на границе пленки с металлом из-за несоответствия параметров и структур кристаллических решеток оксидной пленки и металла. Нарушение сплошности оксидной пленки при флюсовой пайке происходит также под действием галогенидов, особенно ионов  $\text{F}^-$ . Дальнейшее удаление оксидной пленки с алюминиевых сплавов интенсифицируется в результате ее диспергирования при твердожидком плавлении алюминия под ней в контакте с жидким припоем или с вытесненным из флюса тяжелым металлом.

Термическая стойкость флюсов системы  $\text{KCl—LiCl—NaCl—AlF}_3$  относительно мала вследствие образования легко гидролизующегося и летучего  $\text{AlCl}_3$ . По данным Е. И. Сторчая, такие флюсы могут быть стабилизированы при введении в них  $\text{KF}$ , подавляющего образование  $\text{AlCl}_3$ . Наиболее термостойкие солевые системы, содержащие 4 % ( $n\text{—KF—AlF}_3$ ), с мольным отношением  $\text{KF: AlF}_3 > 2$ . Все флюсы для пайки алюминиевых сплавов коррозионно-активны.

Составы флюсов для пайки алюминиевых сплавов приведены в табл. 34.

Механизм действия флюсов реактивного класса, используемых для газопламенной и печной пайки алюминия и его сплавов, электрохимический; в данном случае деполяризатором катодного процесса являются катионы солей тяжелых металлов, которые разряжаются в дефектных местах оксидной пленки:  $\text{Me}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Me}$ . Возникновению дефектов в оксидной пленке алюминия способствуют ионы фтора, поэтому флюсы, кроме хлоридов, должны содержать некоторое количество фторидов металлов. При этом высаживающийся из солей легкоплавкий тяжелый металл на поверхности алюминия приводит к контактному твердожидкому плавлению паяемого материала, развивающемуся прежде всего по межфазной границе металла со слоем оксидной пленки, и отделению последней от подложки в местах нарушения ее сплошности (диспергация). Такой механизм активирования металла реактивными флюсами возможен при условии, если тяжелый металл, входящий в компоненты флюса, образует с алюминием монотектическую или эвтектическую диаграмму состояния с малой растворимостью алюминия в высаженном тяжелом жидком металле. Учитывая, что большинство флюсов в жидком состоянии являются электролитами, были развиты новые представления о механизме

Таблица 34. Реактивные флюсы для высокотемпературной пайки алюминиевых сплавов АД1, АМц, АМг-2, АВ, АЛ9

| Марка или номер флюса | Состав флюса, % |       |     |                   |       |       | Температурный интервал активности, °С | Назначение  |
|-----------------------|-----------------|-------|-----|-------------------|-------|-------|---------------------------------------|---|
|                       | NaF             | NaCl  | KF  | ZnCl <sub>2</sub> | LiCl  | KCl   |                                       |   |
| Ф34А                  | 9—11            | —     | —   | 8—12              | 29—30 | 54—56 | 420—620                               | Для газопламенной пайки *   |
| Ф3                    | 10              | —     | —   | —                 | 38    | 47    | 420—620                               | Для пайки в печи  |
| Ф5                    | 10              | —     | —   | —                 | 38    | 45    | 420—620                               | То же   |
| ФВ3                   | 8               | —     | —   | —                 | 36    | 40    | 450                                   | Для пайки в печи с припоями на основе цинка   |
| 1                     | —               | 12    | 4,6 | 0,1 **            | 34    | 44    | 450                                   | Для пайки в печи или погружением с припоями на основе Al—Si                         |
| 2                     | —               | —     | —   | —                 | 60    | 30    | 610—620                               | Для пайки крупногабаритных конструкций с вертикальным зазором по замкнутому контуру |
| Ф320                  | 6               | —     | —   | 24                | 42    | 28    | 420—620                               | Для пайки нагружением во флюсовую ванну   |
| Ф320                  | 5               | —     | —   | 10                | 38    | 47    | 560—620                               | То же   |
| 17                    | —               | —     | —   | —                 | 41    | 51    | 560—620                               | »   |
| —                     | —               | —     | —   | —                 | 44—55 | 55—57 | 480—615                               | »   |
| Ф435АП                | 3—5             | 15—17 | 3—5 | —                 | 23—25 | 49—51 | > 570                                 | Для пайки с погружением с припоём силумин   |
| —                     | —               | 8—12  | 4,6 | —                 | 30—40 | 40—50 | 580—590                               | То же   |
| —                     | 5,4             | 12    | 4,5 | 0,1               | 34    | 44    | 580—590                               | »   |
| —                     | —               | —     | —   | 20—40             | —     | —     | 500—600                               | Для реактивно-флюсовой пайки при 500—600 °С   |

\* За исключением кислородно-ацетиленового пламени.

\*\* ZnCl<sub>2</sub> или CdCl<sub>2</sub>.

флюсования алюминиевых сплавов при высокотемпературной пайке погружением в их расплавы.

При соприкосновении металла с электролитом происходит электрохимическое его растворение, т. е. переход положительных ионов металла в электролит. По мере накопления ионов металла в растворе начинается обратная реакция, обусловленная образованием отрицательно заряженной поверхности на паяемом металле по мере ухода с нее положительных ионов в электролит. При этом возникает разность потенциалов между металлом и электролитом, которая препятствует дальнейшему растворению металла. Такой двойной слой образуется практически мгновенно. Когда взаимодействие отрицательно заряженного металла и положительных ионов в электролите станет таким, что процесс ионизации (растворения) прекратится, наступит равновесие. Тем не менее, образование равновесного состояния на границе металл — электролит не означает прекращения процесса ионизации: при нем скорости реакции ионизации и обратного процесса лишь равны. При этом устанавливается равновесный потенциал между слоем свободных зарядов на поверхности металла и слоем заряженных ионов в растворе. Если при этом не протекает других реакций на границе металл — электролит, скачок равновесного потенциала зависит от концентрации ионов и температуры, определяется по уравнению Нернста (для обычной реакции элемента):

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C^c D^d}{A^a B^b},$$

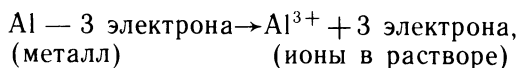
где  $R$  — газовая постоянная;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — концентрации реагирующих веществ и продуктов реакции;  $n$  — число электронов на один атом металла;  $F$  — число Фарадея.

При погружении металла в электролит, содержащий ионы и молекулы других веществ, последние могут также адсорбироваться на поверхности металла; при этом может протекать электрохимическая реакция, соответствующая данному равновесному потенциалу. Протекание этой реакции при условии, что ее равновесный потенциал отрицательнее водородного потенциала, может привести к расходу электронов и сдвинет потенциал металла в положительную сторону, т. е. поляризует его. Возврат в равновесное состояние может быть достигнут вновь при последующем растворении металла в электролите по реакции  $\text{Me} \rightarrow \text{Me}^+ + e$ . При свободном протекании процесса растворения металла освобожденные электроны могут снова поглощаться при реакции восстановления водорода, т. е. процесс будет проходить непрерывно. При прекращении одной из этих электрохимических реакций процесс прекратится. Потенциал, который устанавливается на границе металл — электролит при непрерывном протекании процесса растворения металла и ассимиляции электронов деполяризатором, называют стационарным.

Деполяризация может быть обусловлена не только образова-

нием молекулы водорода, но и другими реакциями, протекающими на границе металл — электролит. В этом случае на этой границе могут накапливаться продукты реакции (коррозии), например оксиды металла.

По современным представлениям поверхность металла состоит обычно из непрерывно перемещающихся анодных участков, на которых происходит процесс окисления (потеря электронов) и переход металла в раствор по соответствующей реакции, например



Для протекания этой реакции на катодном участке должен одновременно происходить процесс восстановления (приобретения электронов).

Выведено положение [24], что активность флюса может быть оценена по значению стационарного потенциала и анодной поляризационной кривой. Поляризационная кривая представляет собой зависимость между значением равновесного потенциала для металла, погруженного в электролит, и соответствующим значением его поляризации  $i$  (рис. 28).

Эта кривая может иметь следующие характерные участки:  $AB$  — участок активного растворения погруженного в электролит металла,  $BC$  — неустойчивого и  $CD$  — устойчивого пассивного состояния металла и  $DF$  — участок нарушения пассивного состояния металла (пассивность торможения или предотвращение реакции). Разрушение оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ионами галлоидов в электролите происходит при увеличении скорости анодного процесса на участке  $DF$ . Таким образом, оксидная пленка на алюминии при погружении его в расплав электролита отсутствует или не защищает его на участках анодного растворения  $AB$  и  $DF$ , а электролит при этом может играть роль флюса, если значение анодного разрушения оксидной пленки достигается при введении в солевой расплав активного иона, разрушающего оксидную пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и при существовании во флюсе деполяризатора, достаточно активного для того, чтобы обеспечить условие  $E_{\text{ст}} > E_a$ . Для большинства алюминиевых сплавов деполяризатором катодного процесса является растворенный в расплаве флюса кислород, а активным ионом — ион фтора  $\text{F}^-$ .

Введение в расплавы хлоридов добавок  $\text{KF}$  и  $\text{AlF}$  способствует смещению стационарного потенциала сплава систе-

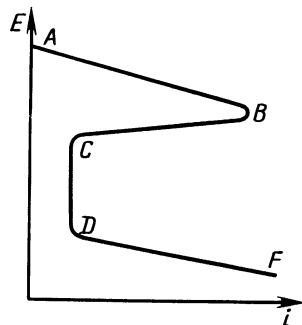
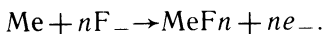


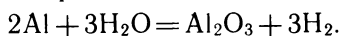
Рис. 28. Поляризационная кривая

мы Al — Мп вследствие облегчения анодного процесса. Самопроизвольное разрушение оксида алюминия на поверхности паяемого алюминиевого сплава при добавках  $\text{AlF}_3$  происходит активнее, чем при введении KF. Активизирующее действие ионов фторидов обусловлено их способностью при определенном значении потенциала вытеснять кислород из оксида металла, вступая с ним в реакцию

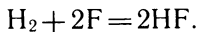


Термическая устойчивость расплавов флюсов, используемых для пайки погружением алюминия и его сплавов, является важной характеристикой, так как от нее зависят качество паяемых изделий и необходимая частота корректировки солевых (флюсовых) ванн. Как показали исследования [24], это, в частности, зависит от реактивной способности добавляемых в ванну фторидов. Так, например, в системе  $\text{KCl}—\text{LiCl}—\text{AlF}_3$  значительная часть  $\text{AlF}_3$  при нагреве до  $620^\circ\text{C}$  в течение 60 ч переходит в другие соединения. Это обусловлено протеканием процесса гидролиза в расплаве флюса, приводящего к повышению температуры ванны и ее загрязнению. Поэтому в такую систему флюса необходимо введение стабилизаторов. Таким стабилизирующим компонентом, например, является KF, образующий с  $\text{AlF}_3$  криолит  $\text{K}_3\text{AlF}_6$ . Процесс гидролиза в расплаве  $\text{KCl}—\text{LiCl}—\text{KF}—\text{AlF}_3$  происходит главным образом благодаря наличию влаги солей. Для предотвращения потерь фторидов при гидролизе расплавы предварительно обезвоживают. Расплавы, содержащие криолит с модулем  $M=2,4$ , имеют наибольшую термическую устойчивость.

В расплавах флюсов, содержащих фториды щелочных и щелочно-земельных элементов, оксидная пленка не растворяется. Удаление пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  определяется содержанием во флюсе химически связанной (в солях) воды. При взаимодействии алюминия с водой происходит реакция



Часть водорода сгорает на поверхности ванны, а часть реагирует с фтором по реакции



Этот газ через трещины в оксидной пленке проникает к поверхности алюминия, отделяя при этом оксидную пленку от металла, после чего она переходит в расплав. Экспериментально показано, что отсутствие влаги в расплаве флюса и образование HF предотвращают флюсование алюминия в расплавах неактивных флюсов.

Для повышения термической стойкости неактивного флюса при пайке погружением предложен его состав с повышенным содержанием KF (%): 23—25 LiCl, 15—17 NaCl, 3—5 KF, 3—5  $\text{AlF}_3$ , 49—51 KCl (см. табл. 34, флюс Ф435АП). Этот флюс отличается более низкой температурой начала активного действия ( $560^\circ\text{C}$ ) и технологичен при длительной эксплуатации. При пайке

с припоем, содержащим 6—8 % Si, временное сопротивление разрыву паяных соединений при 20 °С и при —196 °С составляет соответственно 137 и 245 МПа.

Для сохранения активности флюсовой ванны в режиме холостого нагрева рекомендовано снижать ее температуру до ~500 °С, а корректировку ванны производить путем введения недостающих компонентов после удаления из нее гидроокисных соединений алюминия, образующихся при гидролизе и флюсовании.

Флюсовые расплавы системы  $KCl-LiCl-NaCl-AlF_3$  обладают малой термической устойчивостью, так как при их эксплуатации образуется летучее и легко гидролизующееся соединение  $AlF_3$ . Для стабилизации термической устойчивости флюсов такой системы в них предложено вводить KF. Оптимальная термическая устойчивость такого флюса имеет место при содержании KF— $AlF_3$  свыше 4 % и при мольном соотношении  $KF/AlF_3 > 2$ . Содержание KF в аналогичных флюсах увеличивают до 6,3 % при следующем содержании других компонентов (%): 22—25 LiCl, 15—17 NaCl, 5,1—6,3 KF, 3—3,79  $AlF_3$ . Флюс технологичен при длительной эксплуатации и рекомендован к применению с припоем, содержащим 6,8—8 % Si; временное сопротивление разрыву паяных соединений, выполненных с указанным флюсом и припоем при температуре 26 °С и —196 °С, равно соответственно 137 и 245 МПа.

Для уменьшения расхода дорогостоящего и дефицитного компонента флюса для пайки погружением — соли лития — Е. И. Сторчаем и Н. С. Барановым предложен другой состав флюса (%): 39—42 CaCl, 39—46 KCl, 12—17 NaCl и 2—3 ( $NaF + AlF_3$ ) или ( $LiF + AlF_3$ ). Температура плавления флюса свыше 530 °С. Он становится жидкотекучим при температуре 560 °С и почти не испаряется при нагреве вплоть до 700 °С. Введение  $CaCl_2$  в расплав компонентов флюса обеспечивает более длительное поддержание необходимой концентрации ионов фтора в соляной ванне. При последующем взаимодействии кальция и фтора в расплаве, которое может происходить в течение одного — семи дней, флюс теряет свою активность. Добавки других фторидов обычно обеспечивают активность флюсовой ванны примерно в течение одного дня. Флюсы для высокотемпературной пайки алюминия погружением, содержащие  $CaCl_2$ , могут иметь составы (%): 1 (3,5—3,2 NaCl; 34,2—51  $CaCl_2$ ; 27,5—32 LiCl; 2) 17—20 NaCl; 40—45 KCl; 17—20  $CaCl_2$ ; 6—7  $AlF_3$ . Эти флюсы являются сплавами в области концентрационного треугольника  $KCl-CaCl_2-NaCl$  и пригодны для пайки металлов с припоями Al—Si (в виде готовых форм или плакирующего слоя на паяемом металле).

В последние годы разработаны новые флюсы для высокотемпературной пайки алюминия и его сплавов; такие флюсы состоят из смеси фторидов с температурой плавления 562—600 °С. Пайка с этими флюсами возможна в среде чистого азота; в чистом водороде или диссоциированном аммиаке (с предварительным

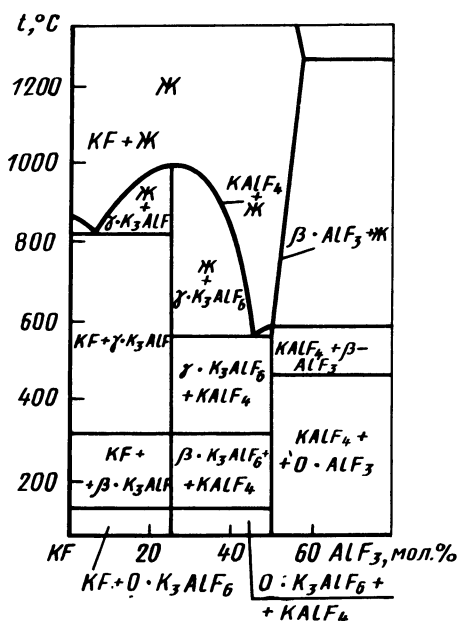


Рис. 29. Диаграмма состояния солевых расплавов системы  $\text{KF}-\text{AlF}_3$

Один из подобных флюсов содержит (мол. %) 30—55  $\text{AlF}_3$ ; 35—60  $\text{KF}$ ; 20 фторида металла, например  $\text{ZnF}_2$ , обладающего способностью высаживаться на паяемом металле (Заявка 58-159995 Япония, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 35/362). Кроме того, флюс может содержать до 25 % (мол.) одного или нескольких фторидов из группы  $\text{LiF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{PbF}$ ,  $\text{CsF}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{CoF}$ , например ~ 1—5 %  $\text{NaF}$ , 0,1—10 %  $\text{LiF}$ , 0,1—5 %  $\text{CaF}_2$  и < 10 % ( $\text{NaF} + \text{LiF} + \text{CaF}$ ). В подобные флюсы могут быть введены сложные фториды металлов  $\text{K}_2\text{LiAlF}_4$ ,  $\text{KAlF}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Zn}_2\text{F}_2$  как источники фторидов металлов  $\text{KF}-\text{AlF}_3$  или  $\text{ZnF}_2$ . Флюсы могут содержать смесь нерастворимых в воде фторидно-алюминатных комплексов из  $\text{Al}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{Li}$  или их смеси с фторидом алюминия в форме простых соединений: 53—62 %  $\text{AlF}_3$ , 35—44 %  $\text{KF}$ , 2—7 %  $\text{LiF}_2$  и 2 % примесей. Такие флюсы готовят путем сплавления исходных продуктов. Флюсы применяют в виде водной суспензии с 5—50 % сухого порошка флюса. Смыть остатки флюса не нужно, так как они не вызывают коррозии паяного соединения. Водная суспензия с 10 % сухого измельченного флюса наносится на паяемую поверхность предварительным распылением (Заявка 2119407 Англия, МКИ<sup>3</sup> В23 К 35/362, В 23 К 1/04, НКИ С7М). Флюс этого типа в расплавленном состоянии хорошо смачивает алюминий. Состав флюса такого типа (мол. %): 32—35  $\text{AlF}_3$ , 42—65  $\text{KF}$  и кроме  $\text{KF}$  еще один фторид щелочного металла из группы  $\text{LiCl}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{PbF}$ ,  $\text{CsF}$  или  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  в количестве 20 % (лучше 3—15 %) [71, 72].

вакуумированием пространства печи до 9,806 Па). Основой флюсов является наиболее легкоплавкая эвтектика системы  $\text{KF}-\text{AlF}_3$  (рис. 29), состоящая из  $\gamma\text{-K}_3\text{AlF}_6$  и  $\text{KAlF}_4$ . Флюс получил название «Нокол» и применяется в виде пасты [33].

Остатки флюса этого типа прочно сцепляются с паяемым материалом, но не вызывают коррозии паяного соединения, и на них могут быть нанесены лакокрасочные покрытия. Температура пайки с такими флюсами составляет 590—620 °C припоем состава  $\text{Al}-8\text{Si}$ . Введение во флюсы до 4—20 %  $\text{LiF}$  позволяет паять с такими флюсами припоем, содержащим более 50 %  $\text{Zn}$ .

**Дозирование флюса и нанесение его перед пайкой.** Во многих случаях дозирование флюса при пайке облегчает процесс последующего удаления остатков флюса и улучшает качество изделия (предотвращает попадание флюса на участки изделия, не подвергаемые пайке). При избытке флюса его остатки мешают затеканию припоя в зазор, а при недостатке флюса ухудшается процесс флюсования и могут измениться свойства флюса. Флюс при пайке дозируют различными способами: введением его в виде водного раствора, в смеси с порошком, зернами или стружкой припоя, иногда в виде таблетированной смеси с зернами припоя, в виде трубки припоя, заполненной флюсом-порошком. В трубчатых припоях весьма важно соотношение масс припоя и флюса. В трубчатых припоях ПОС 40 и ПОС 61, например, количество флюса составляет  $\approx 2\text{--}2,5\%$  массы припоя. При пайке трубчатым легкоплавким припоем флюс и припой подводят при пайке одновременно, что облегчает процесс, особенно в труднодоступных местах конструкции, уменьшает потери флюса на 50 % и припоя на 20 % по сравнению с процессом пайки, при котором припой и флюс вводятся порознь. Применение трубчатых припоев во внутренней полости фасонного сечения или в нескольких каналах круглого сечения обеспечивает более равномерную подачу флюса. Внутренний диаметр трубчатого припоя обычно в 2 раза меньше наружного диаметра. Трубчатые припои изготавливают прессованием.

По данным Иозима Имира, для улучшения смачивания припоем поверхности периферийные каналы трубчатых припоев Sn—Pb иногда заполняют кристаллической канифолью, смешанной с 5—7 % хлоргидрата толуидина или другого активатора. Центральный канал заполняют жидкой канифолью, смешанной в равных долях с одним или несколькими активаторами: гликолевой, молочной, глутаминовой кислотами.

Проволока припоя может иметь вместо сквозных внутренних продольных каналов сплошные или прерывистые углубления с поверхности вглубь, заполненные флюсом. Такие углубления обычно направлены поперек оси проволоки и могут располагаться по спирали. Использование таких углублений для закрепления флюса на поверхности проволоки припоя предотвращает его выкрашивание при изгибе припоя (рис. 30). Длина углублений

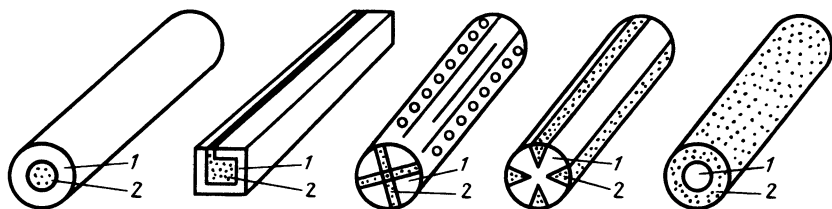


Рис. 30. Варианты расположения флюса на прутке или проволоке припоя:  
1 — припой; 2 — флюс (по данным С. Бернсдорфа и В. Рубела)

$\leq 2$  мм. Их наносят режущим инструментом или путем накатки. Подготовленную таким образом проволоку припоя погружают в жидкий флюс, заполняющий внутреннюю полость углублений, после чего снаружи проволоки стирают излишки флюса, затвердевающие в углублении. Для улучшения затекания флюса в углубления на поверхности проволоки перед погружением в жидкий флюс их заполняют быстро испаряющейся, хорошо смачивающей металл жидкостью, например спиртом.

Дозирование флюса почти полностью устраняет необходимость в трудоемкой операции удаления остатков продуктов флюсования после пайки.

По данным Утихаси Хисао, нашло применение дозированное флюсовое покрытие, наносимое с двух сторон ленты припоя. Наносимый флюс состоит из канифоли и синтетической смолы типа полихлорвинила, эпоксидной или фенольных смол, органических составляющих — аминосоляной кислотой и других органических кислот. В качестве связующего флюса служит смесь раствора канифоли в воде и натурального каучука.

По данным Тамада Минору, применение мелких зерен припоя с охлажденной на них тонкой пленкой флюса предотвращает окисление их поверхности в течение длительного времени.

Флюс может быть нанесен на места, подвергаемые пайке, также с помощью кисти или погружением в суспензию или эмульсию жидкой составляющей, в которой флюс нерастворим. Флюс может быть нанесен и в виде нестабильной пены (Пат. 4419146 США, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 35/36, НКИ 148/23) в аэрозольной упаковке.

Покрытие прутков или проволоки припоя может быть осуществлено в гидравлическом электрообмазочном прессе при пропускании их через фильтр, в котором происходит соосное соединение прутков и флюса в виде порошка, смешанного со связующим веществом. В качестве связующего в последнее время используют термопласты (этилен, пропилен, изобутилизопрен и др.). Опресовку смеси производят при температуре термопластичного состояния, смесь выдавливается в кольцеобразное пространство между фильерой пресса и прутком. Термопласт при этом является и клеем и пластификатором; он может быть использован в виде крошек, гранул, порошка. Электрически заряженный порошок посредством электростатического поля наносят на паяемые кромки, предварительно смоченные водой или минеральным клеем. Деталь предварительно нагревают до 120 °С.

Флюс перед пайкой может быть нанесен путем распыления с помощью ультразвуковой установки [41]. Установка состоит из бачка с флюсом, вентилятора и раструба. Флюс из бачка поступает по трубке в наконечник, установленный в трубе. Выходя из торцевой поверхности наконечника, флюс распыляется, сбоку к трубе крепится вентилятор, воздушный поток которого подхватывает распыленные частицы флюса и через раструб направляет их к месту пайки. Размер частиц распыленного флюса  $\sim 10$  мкм.

При автоматической пайке плат волной припоя для предварительного флюсования нашли применение флюсы в виде пены, состоящие из сосновой канифоли и высокомолекулярной синтетической смолы. Для этого жидкую канифоль под давлением сжатого воздуха пропускают через поропласт из синтетической смолы, имеющей поры диаметром 50—500 мкм. По другому способу вспенивающийся флюс, состоящий из флюсующей составляющей и испарителя (например, изопропилового спирта), пропускают через специальный пористый материал, в котором нагнетают воздух. Над насадкой образуется пенная подушка, через которую пропускают собранные под пайку узлы. Устройство для получения пенистого флюса состоит из ванны с флюсом, установленного под ней, насоса и насадка. Флюс нагнетается в ванну через насадку с пористым материалом (Заявка 2042957 Англия, МКИ<sup>3</sup> кл. В 3Р (В 23 К 3/00, В 23 К1/20)). Флюсовое покрытие может быть нанесено в виде эластичного опрессованного слоя, содержащего, кроме флюса, специальные компоненты, улучшающие смачивание, и компоненты, обедненные кислородом и повышающие прочность соединения. Такое покрытие применено на серебряных припоях. Для дуговой пайки сталей и медных сплавов в электротехнической промышленности использованы припой, помещаемые вместе с флюсом в трубку.

Применение серебряных припоев систем  $\text{Ag—Cu—Zn}$ ,  $\text{Ag—Cu—Zn—Cd}$ ,  $\text{Ag—Cu—Zn—Sn}$  в виде прутков, заполненных флюсом, позволило понизить требования к точности подгонки и сборки под пайку.

## 2. БЕСФЛЮСОВАЯ ПАЙКА

В связи с высокой коррозионной активностью многих паяльных флюсов, удаление остатков которых после пайки требует дополнительных средств и снижает надежность изделий, а также в связи с актуальностью защиты окружающей среды с 60-х годов наблюдается тенденция к постепенной замене флюсового способа пайки бесфлюсовыми.

Защита паяемого металла и припоя от непосредственного контакта с кислородом воздуха при бесфлюсовой пайке возможна путем ведения процесса в нейтральных инертных газах, вакууме или герметизированном от внешней среды контейнере, а также путем покрытия паяемых поверхностей тонкими слоями слабоокисляющихся при пайке жидких металлов.

Удаление оксидов с поверхности паяемого металла и припоя может быть достигнуто при создании условий их диссоциации в результате снижения парциального давления кислорода в окружающей атмосфере, а также под воздействием химически активных компонентов газовых сред, растворения кислорода в паяемом металле, связывания его с парами металлов, применения механических и физических способов. При этом используют также

специальное легирование припоев компонентами, обеспечивающими его самофлюсуемость в условиях низкого содержания в окружающей атмосфере кислорода.

Покрытие перед пайкой паяемого металла или ленты среднеплавкого припоя жидкими оловянными слабо окисляющимися припоями осуществляют путем предварительного их лужения с применением механических или физических способов. Поверхностное натяжение на границе твердой и жидкой фаз изменяют путем микролегирования припоев поверхностно-активными веществами, а также использования при пайке активирующих покрытий, вступающих с паяемым металлом или припоем в контактное плавление (контактно-реактивное, контактное твердо-жидкое или контактно-твердогазовое).

**Абразивная пайка.** Абразивную пайку применяют преимущественно для алюминия и его сплавов при условии предварительного лужения поверхности легкоплавкими припоями абразивным способом. Детали паяют по облуженным поверхностям при повторном нагреве плотно прижатых деталей до полного расплавления облуженного слоя.

При лужении оксидную пленку с поверхности алюминия под слоем жидкого припоя можно удалить шабером, металлическими щетками, абразивными частицами, погруженными в расплавленный припой и разрушающими оксидную пленку в процессе обратного-поступательного или вращательного перемещения по облуживаемой поверхности. В качестве абразивных частиц при лужении могут быть использованы асбест, металлические порошки или первичные кристаллы в интервале жидкотвердого состояния припоев (абразивно-кристаллический способ лужения). Асбест в качестве абразива при лужении поверхности алюминиевого сплава применяют в мелкоизмельченном виде после равномерного перемешивания со стружкой припоя (например, 90 % припоя и 10 % асбеста) и прессования из этой смеси прутков или кругов.

В практике используют также лужение поверхности нагретых алюминиевых деталей короткими прутками припоя, так как при применении длинных прутков происходит сильный теплоотвод от паяемой детали, что приводит к необходимости перегрева облуживаемой детали или замедлению процесса лужения. При лужении прутком припоя роль абразива играет его твердая торцовая часть. Прутки припоев с широким интервалом затвердевания легко обламываются при натирании поверхности облуживаемой детали. Поэтому для этого способа применяют прутки припоя с узким интервалом затвердевания.

Абразивное лужение возможно без предварительного удаления слоя оксидов механическим или химическим способом. Перед лужением поверхность алюминиевого сплава достаточно обезжирить и протереть сухой ветошью. Процесс лужения состоит в нагреве детали до температуры, превышающей температуру плавления припоя на 25—50 °С, и обработке поверхности абразивными

карандашом, прутком или кругом с нанесенным на него припоем до появления равномерного слоя.

Абразивное лужение легко поддается механизации при использовании, например, кинематической схемы плоскошлифовального станка. Этот способ лужения пригоден при любом расположении облуживаемой поверхности, для любой ее кривизны в достаточно широком температурном интервале (до 450 °С). Преимущества способа состоят в возможности лужения алюминиевой фольги толщиной до 10 мкм и больше, тогда как при ультразвуковом способе можно лудить фольгу толщиной не менее 0,5 мм. Скорость лужения вручную 0,65—1 см<sup>2</sup>/с. При ультразвуковом способе лужения ручную скорость не превышает 0,16—0,25 см<sup>2</sup>/с.

Абразивное лужение внутренних поверхностей отверстий малого диаметра и многожильных алюминиевых проводов весьма затруднено. Для этой цели более пригоден абразивно-кристаллический способ лужения в специальных неподвижных, вибрирующих или вращающихся ваннах или наконечниках. После лужения наконечник и конец кабеля (многожильного провода) нагревают до температуры полного расплавления припоя и затем охлаждают. При ручном способе лужения наблюдается значительное число необлуженных мест, что может снизить прочность и коррозионную стойкость паяных соединений, особенно при слабом физико-химическом взаимодействии припоя с паяемым металлом.

Для устранения этих недостатков удобно использовать в качестве абразива металлическую сетку [14, 15]. При этом детали нагревают до температуры выше температуры плавления припоя на 20—50 °С, на них наносят легкоплавкий припой, растирают его по поверхности с помощью сетки, прикрепленной к демпфирующему устройству. При определенном давлении и трении о поверхность сетка действует как абразив, удаляя оксидную пленку, а жидкий припой облуживает защищенные места. Толщину слоя полуды можно регулировать количеством наносимого припоя на единицу поверхности и величиной давления сетки на облуживаемую поверхность. Применение демпфирующего устройства позволяет выбирать неровности облуживаемой поверхности.

Наиболее качественное лужение сплава АМц получено при использовании латунной сетки. Такая сетка обладает достаточной эластичностью и не повреждает поверхность листа при лужении. Количество протекающего через ячейки сетки жидкого припоя регулируется размерами ячеек (0,18×0,18 мм). При лужении поверхность сетки покрывают слоем смеси припоя и отходов лужения, что уменьшает ее истирание, но не отражается на качестве лужения. Применение сетки в качестве абразива позволяет механизировать процесс лужения и повысить производительность процесса в 45—50 раз с одновременным повышением качества облуживаемой поверхности.

**Ультразвуковая пайка.** Как и абразивную пайку, ультразву-

ковую пайку применяют чаще всего при соединении алюминия и его сплавов. Это двухэтапный процесс, состоящий из предварительного лужения паяемых поверхностей и собственно пайки.

Ультразвуковое лужение выполняют с помощью ультразвуковых паяльников или в специальных ультразвуковых ваннах. При лужении в ультразвуковой ванне оксидная пленка одновременно удаляется по всей поверхности изделия, соприкасающейся с жидким припоем.

Ультразвуковая пайка и лужение возможны для многих высокоокисляемых и труднопаяемых металлов и сплавов, в том числе кобальта, никеля, алюминия и др.

Перед лужением в ультразвуковой ванне часть поверхности детали, не подвергаемую пайке, защищают от лужения анодированием; места детали, предназначенные для лужения, перед анодированием могут быть защищены слоем лака, который после лужения удаляют промывкой ацетоном. Перед погружением детали в ультразвуковую ванну с поверхности жидкого припоя снимают шлак и включают ультразвуковой контур. Длительность погружения детали в ванну может достигать 5—30 с в зависимости от размера и массы детали. Излишки припоя стряхивают с детали или стирают ветошью. Луженая поверхность при нормальном режиме пайки после стирания припоя блестящая, слегка шероховатая. Паять детали после лужения ультразвуковым способом следует не позднее чем через 15 дней с момента лужения.

Ультразвуковая пайка многопроволочных проводов большого сечения из металлов, плохо поддающихся низкотемпературной пайке и лужению (Ti, W, Cr), может быть успешно осуществлена после предварительного флюсования в растворе 50 % этилового спирта, 46 % этиленгликоля, 4 % солянокислого гидразина. Это позволяет обеспечить при амплитуде колебаний 8—9 мкм высокое качество паяных соединений полуды (при минимальных температуре, времени пайки и зазоре между изделием и волноводом). При амплитуде ультразвуковых колебаний более 9 мкм происходит распыление припоя, а при амплитуде более чем 12 мкм наблюдается интенсивная кавитация образца. Однако при этом есть опасность застревания флюса в шве, и поэтому такой вариант технологии используется крайне редко.

Процесс ультразвуковой пайки может быть автоматизирован. Толщина слоя полуды может быть задана. При ультразвуковой пайке исключается образование перемычек и сосулек припоя, включений оксидных пленок, уменьшается время пайки.

При ультразвуковом или абразивном лужении удаление оксидной пленки с поверхности паяемого металла происходит неравномерно и его физический контакт с жидким припоем осуществляется локально. Если при этом растворимость паяемого металла в жидком припое мала, то заметного отделения и диспергации оставшейся оксидной пленки может не происходить. Образующиеся «мостики» со слабой физико-химической связью между

паяемым металлом и слоем полуды (или паяным швом) могут легко разрушаться при охлаждении и после пайки — под влиянием развития релаксации внутренних напряжений в изделии или развития в швах щелевой коррозии. Предотвращение таких явлений, ослабляющих паяный шов, возможно лишь при заметном увеличении растворимости паемого металла в жидком припое и более полном отделении оксидной пленки при ее диспергации в процессе лужения или пайки.

**Абразивно-кавитационная пайка.** С. В. Лашко, Е. Г. Вироzubом и П. И. Панченко показано, что наиболее качественное лужение алюминия оловом и оловянно-цинковыми припоями с минимальной глубиной эрозии возможно в присутствии в жидком припое твердых частиц, способствующих развитию «пристеночной» кавитации. В качестве абразивных частиц в олово может быть введен порошок ферротитана (1—4 %). В сплавах Sn—Zn роль твердых частиц в интервале жидкотвердого состояния выполняют первичные кристаллы цинка. В припое П250А (20 % Zn, остальное олово) кавитационно-абразивное лужение происходит при интенсивности ультразвуковых колебаний 2 Вт/см<sup>2</sup> и амплитуде колебаний 2 мкм. При этом равномерность лужения в 3 раза выше, чем при абразивном лужении, а массовый коэффициент эрозии не превышает 0,03. В припое Sn—50 % Zn за 10 с при температуре 300 °С полное облуживание обеспечивается при интенсивности ультразвуковых колебаний 2 Вт/см<sup>2</sup>. Массовый коэффициент эрозии при этом не превышает 0,04, а глубина эрозии составляет 0,007 мм, т. е. имеет такой же порядок, что и при абразивной пайке. Рабочая частота колебаний в рассмотренных примерах 19,8 кГц. Используя энергию абразивных частиц в ультразвуковом поле, можно понизить интенсивность ультразвука и процесс лужения вести при допороговых его значениях. При этом эрозия паемого металла снижается примерно на два порядка.

Для снижения числа пор и избежания образования пор и раковин в паяных швах припой в зазоре при пайке подвергают ультразвуковым и низкочастотным колебаниям (Заявка 56-6777 Япония, кл. В 23 К 1/00; заявка 56-84167 Япония, МКИ<sup>3</sup> кл. В 23 К 1/06).

**Пайка в газовых средах.** При уменьшении парциального давления кислорода в окружающей газовой среде создаются благоприятные условия для самопроизвольного распада оксидов, а следовательно, для пайки металлов и сплавов.

Направление реакции окисления (восстановления) металла определяется температурой и давлением кислорода окружающей среды:



В изотермических условиях отклонения от равновесия в какую-либо сторону направление реакции определяют по константе рав-

новесия:  $K_p = p_{\text{Me}}^n \cdot p_{\text{O}_2}^{m/2} / p_{\text{МелОм}}$ , где  $p_{\text{Me}}$ ,  $p_{\text{O}_2}^{m/2}$ ,  $p_{\text{МелОм}}$  — давление паров металла, кислорода и оксида.

При увеличении константы равновесия  $K_p$  реакция идет в сторону образования оксида. Так как конденсированные фазы — металлы и оксиды имеют при данной температуре постоянное давление паров, то  $K_p = p_{\text{O}_2}$ . Если при протекании реакции парциальное давление кислорода возрастает  $p_{\text{O}_2} > K_p$ , то это значит, что оксидная пленка диссоциирует на металл и кислород. В изотермических условиях этот процесс постепенно замедляется. Если при протекании реакции (Заявка 54-133449 Япония, МКИ<sup>3</sup> кл. 23 В 22/В 23К 35/26) парциальное давление кислорода в окружающей среде уменьшается, то происходит процесс окисления металла и пайка становится невозможной.

Если образующийся при диссоциации оксида кислород непрерывно удалять из зоны пайки так, что остаточное парциальное давление кислорода будет оставаться меньше равновесного  $p_{\text{O}_2}$  при данной температуре, то будет происходить восстановление оксидов на паяемом материале и процесс пайки станет возможным.

Константа равновесия гомогенной и гетерогенной реакции и давление диссоциации оксидов обычно увеличиваются с повышением температуры. Однако для большинства металлов и сплавов температура протекания реакции на воздухе в сторону диссоциации оксидов (температура обратимой реакции) превышает температуру их плавления. Поэтому обычно температуру диссоциации (восстановления) осуществляют не на воздухе, а в газовых средах с малым парциальным давлением кислорода (инертные и нейтральные газы) или в вакууме.

Диссоциация оксидов в газовых средах с пониженным парциальным давлением кислорода может стать возможной при температуре ниже температуры обратимой реакции также и вследствие растворения кислорода в паяемом металле. При этом при условии прекращения доступа кислорода к поверхности паяемого металла, например при пайке в вакууме или других безокислительных средах (аргоне), может произойти разрушение оксидов в результате постепенного растворения кислорода оксидов в основном металле. Так, например, нагрев окисленного титана или циркония в вакууме или инертной газовой среде приводит к эффективному разрушению оксидов на их поверхности. Вследствие этого пайка титана и циркония возможна в относительно невысоком вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-2} - 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па соответственно), несмотря на высокую свободную энергию образования их оксидов. При нагреве сталей, в результате слабой растворимости кислорода в железе, восстановление оксидов железа в аналогичных условиях затруднено.

Условия бесфлюсовой пайки металла, на котором образуется определенный оксид, могут быть выбраны с помощью графика изменения упругости диссоциации оксидов (рис. 31): вся область температур и парциального давления кислорода ниже кривой

равновесия реакции соответствует условиям самопроизвольного распада оксида; вся область температур и парциальных давлений кислорода выше этой кривой соответствует условиям окисления металла.

Значительно уменьшить парциальное давление кислорода в газовой среде можно двумя путями: созданием вакуума с определенной степенью разрежения воздуха и заполнением пространства, окружающего изделие, инертным газом.

*Пайка в вакууме.* Даже в объеме  $1 \text{ м}^3$  с разрежением  $1,33 \cdot 10^{-25}$  Па находятся сотни молекул газов.

Различают пайку в высоком и среднем вакууме или пайку в комбинированной атмосфере низкого вакуума (форвакуума) и паров легкоиспаряющихся металлов, обладающих большим химическим сродством к кислороду, чем компоненты паяемого сплава и припоя.

В вакууме  $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па, особенно при температуре  $1000^\circ\text{C}$ , большинство металлов заметно испаряется. В случае испарения в вакууме элементов из сплавов считают справедливым закон Рауля, применимый к разбавленным растворам, из которого следует, что давление пара элемента из раствора ниже давления пара чистого элемента на величину, пропорциональную концентрации растворенного вещества.

Отмечается легкая испаряемость цинка, кадмия, лития, марганца, серебра, алюминия, хрома, магния, фосфора — компонентов многих припоев для высокотемпературной пайки (рис. 32). При вакуумной пайке такими припоями для предотвращения испарения подобных компонентов используют напуск в вакуумированное пространство инертных газов, что позволяет вести процесс пайки при температуре выше  $1000^\circ\text{C}$  без опасного изменения состава припоя. С этой целью возможен также напуск в вакуумированную камеру активных газов или паров легкоиспаряющихся металлов, облегчающих процесс вакуумной пайки.

Некоторые оксиды металлов также имеют достаточно большое давление пара в вакууме. Так, в вакууме с остаточным давлением

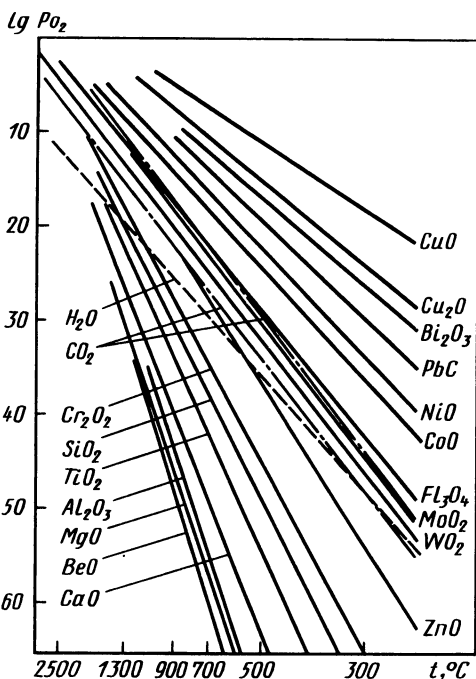


Рис. 31. Упругость диссоциации оксидов

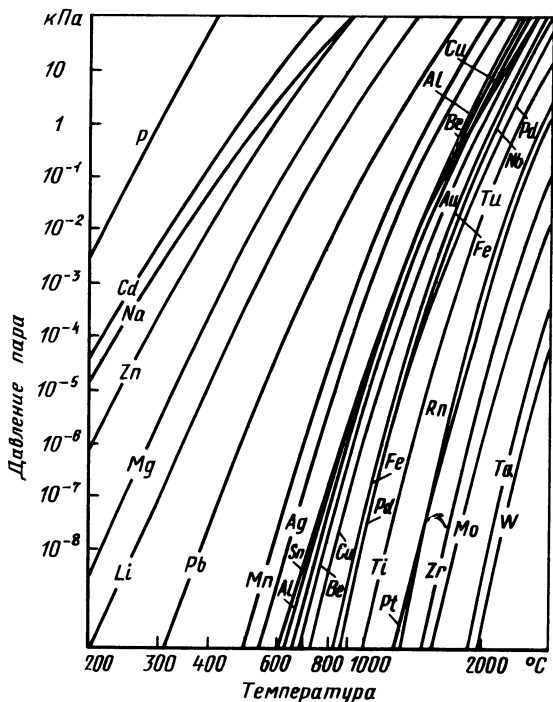


Рис. 32. Зависимость испаряемости металлов в вакууме от степени разрежения и температуры (по данным К. Боутона и В. Роллерса)

$1,33 \cdot 10^{-3}$  Па оксиды  $\text{CaO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{MoO}_2$  испаряются при температуре  $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — при температуре  $> 1000^\circ\text{C}$ ,  $\text{MoO}_3$  — при температуре  $600^\circ\text{C}$  и  $\text{WO}_2$  — при температуре  $800^\circ\text{C}$ . Оксид  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в этом отношении чрезвычайно устойчив. Давление пара настолько мало, что заметное испарение этого оксида происходит только при температуре, близкой к температуре его плавления ( $2050^\circ\text{C}$ ). Оксиды таких элементов, как Be, Si, Mg, Zr, Sn, в вакууме с разрежением  $1,33 \cdot 10^{-1}\text{--}1,33 \cdot 10^{-3}$  Па, начинают заметно испаряться только при температуре около  $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$ .

Пайка металлов в вакууме с нагревом в печах может быть выполнена по одной из следующих схем.

1. Пайка в печи (например, с молибденовыми нагревателями), вакуумированное пространство в которой создается внутри камеры нагрева (фиксированный нагреватель). Преимущество печей с фиксированным нагревателем — возможность обеспечения высокого и устойчивого вакуума с остаточным давлением  $1,33 \cdot 10^{-2}\text{--}1,33 \cdot 10^{-5}$  Па. Недостаток таких печей — чрезвычайно медленное охлаждение паяемого изделия (в течение от одного до нескольких часов) из-за низкой теплопроводности вакуумного пространства рабочей камеры печи.

2. Пайка в вакууме при независимом действии вакуумной камеры (контейнера или внутренней части изделия) и нагрева-

теля. Этот способ позволяет быстро охлаждать изделия после пайки путем удаления их (или контейнера) из печи.

При пайке по второй схеме могут быть использованы обычные печи электрического сопротивления, а также печи с нихромовыми, силитовыми, карборундовыми нагревателями. Может быть применен индукционный, световой и другой нагрев. Если паяемая деталь нагревается ТВЧ, то контейнер может быть изготовлен из молибденового стекла, стекла пирекс или кварца.

Тонкостенные контейнеры для одноразового действия изготавливают из листов коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т или других жаростойких сплавов толщиной 0,6—0,8 мм, в таких контейнерах крышку после сборки приваривают. Контейнеры для многократного действия изготавливают из листов стали толщиной более 3 мм, а крышку герметизируют механически с применением прокладки из вакуумной резины, расположенной между крышкой и водоохлаждаемым фланцем контейнера, выведенным наружу из печи. В некоторых случаях применяют крышки с песчаным затвором.

В 50—60 годах была показана возможность пайки в контейнерах с песчаным затвором жаростойких, конструкционных, цементируемых, автоматных, легированных хладостойких сталей, в том числе сталей с твердыми сплавами [11]. После пайки без флюсов и активных или защитных газовых сред получают чистые без окислов соединения. Предполагалось, что, как и при автовакуумной пайке, кислород, присутствующий в контейнере и в оксидах, растворяется в стали контейнера и частично взаимодействует с углеродом стальных листов. Контейнеры изготавливают из коррозионно- и теплостойкой стали или нелегированной стали толщиной 2 мм. Показано, что в контейнерах из глубокоотянутых листов толщиной 2 мм возможна пайка до 5 раз.

При пайке в контейнерах для предотвращения припайки изделия к прижимным приспособлениям его изолируют от непосредственного контакта, например, прокладками из слюды, молибдена, а также покрытиями из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , нанесенного, например, путем плазменного напыления, покрытия из хрома, окисляемого затем при температуре 800 °С.

При пайке в вакуумируемых контейнерах прижим паяемых деталей удобнее всего осуществлять, создавая разность давлений внутри и снаружи контейнера. В этом случае для стенок контейнера, со стороны которых необходим прижим, используют тонколистовую, чаще всего коррозионно-стойкую сталь толщиной 0,6—1 мм. При сложной форме паяемых деталей весь контейнер из тонколистовой стали изготавливают подобным по форме паяемому изделию или пространство между контейнером и изделием заполняют термокорундовой крупкой (с размером зерна 2—3 мм), через которую передается давление от стенок контейнера на деталь.

Процесс пайки в контейнере обычно включает несколько этапов.

1. Собранное под пайку изделие укладывают в контейнер.

2. Контейнер с уложенным в него изделием заваривают и проверяют на герметичность с помощью гелиевых течеискателей или погружением в воду и продувкой сжатого воздуха под давлением 392—490 кПа через трубку, ведущую к вакуумному насосу. В местах течи контейнер подваривают до получения полной герметичности.

3. Через фильтр контейнер подключают к форвакуумному насосу, с помощью которого предварительно откачивают воздух при температуре 20 °С. После этого при необходимости включают диффузионный насос для получения более глубокого вакуума.

4. При продолжающейся откачке контейнер загружают в печь; подогрев контейнера сопровождается снижением вакуума вследствие выделения газов из паяемого металла, припоя и материала контейнера. Вакуум в контейнере, загруженном в печь, частично или полностью восстанавливается через некоторое время.

При пайке в контейнере стальных тонкостенных изделий сильный прижим со стороны стенок контейнера при высоких температурах может привести к сплющиванию деталей. В этом случае откачка воздуха из контейнера должна быть незначительной, достаточной лишь для надежного прижима паяемых деталей. Парциальное давление кислорода в контейнере при этом может быть в значительной степени понижено путем откачки воздуха и последующего заполнения контейнера аргоном и повторной откачки с образованием необходимого минимального прижима паяемых деталей. Для дополнительной очистки атмосферы контейнера от влаги и кислорода в него иногда подвешивают кусок листового титана или циркония или вводят пары легкоокисляемых металлов с высокой упругостью испарения.

*Пайка в парах активных металлов.* Пары легкоиспаряющихся металлов в вакууме могут существенно влиять на процессы пайки: они могут восстанавливать оксиды на паяемом металле (сплаве), связывать остатки кислорода и влаги в атмосфере, окружающей паяемое изделие, предотвращать или снижать испарение одноименного металла из жидкого припоя, насыщать жидкий припой, участвовать в контактном твердожидком плавлении.

К таким металлам относятся магний, висмут, кадмий, цинк, литий, вводимые в рабочее пространство вакуумной печи при пайке алюминия; марганец, цинк, литий — при пайке сталей медью; магний — при контактно-твердогазовой пайке алюминия силумином. Пары висмута, магния, лития, цинка, кадмия способны связывать остатки кислорода, а пары лития, магния, цинка — также и воду.

В качестве защитной среды при пайке с парами металлов используют вакуум ( $p = 133,3 \div 0,1333$  Па). Это тормозит рост оксидной пленки при нагреве до температуры пайки. При таком способе пайки на качество паяных соединений существенно влияют концентрация паров активных металлов, а при сложной конст-

рукции изделий — равномерность распределения паров. Выравнивание паров в камере пайки протекает тем быстрее, чем выше вакуум. Однако, начиная с некоторой степени разрежения, концентрация введенного пара металла может оказаться неравномерной из-за непрерывной работы вакуумного насоса и распространения молекул по законам геометрической оптики. Все это может привести к непропаям в отдельных участках паяных соединений.

Равномерное распределение паров металлов, обеспечивающее высокое качество пайки и снижение расхода паров металла, возможно лишь при откачке газов из камеры нагрева до температуры выравнивания давления насыщенных паров металла с давлением газов в вакуумной камере печи. Это исключает разность давлений и перетекание паров металла. При достижении равенства между давлением паров металла и общего давления в камере пайки последняя отключается от вакуумного насоса. В результате возникают условия равномерного распределения в камере паров металла. Применение такого приема обеспечивает стабильность процесса и высокое качество пайки и экономию расхода паров металла.

Возможности пайки в вакууме и инертных газах могут быть расширены при использовании так называемых самофлюсуемых припоев, легированных литием, бором, фосфором, лантаном и другими редкоземельными элементами.

Пайка деталей, расположенных во внутренних полостях изделия, может быть выполнена после герметизации этих полостей, например путем сварки и откачки воздуха через специально вваренный штуцер.

В вакууме  $p = 1,33 \cdot 10^{-3} \div 6,65$  Па можно паять медь и никель, в вакууме с  $p = 1,33 \cdot 10^{-1} \div 10^{-2}$  Па — титановые сплавы, высоколегированные стали и никелевые жаропрочные стали. В сплавах, содержащих значительные количества хрома, алюминия и т. п., при пайке в низком и среднем вакууме на изделие наносят тонкий слой флюса. Для этого собранное перед пайкой изделие кипятят в насыщенном растворе флюса (например, № 200) в течение 15—25 мин. После высушивания при температуре 100—120 °С в течение 20—30 мин изделие паяют в вакууме. Флюс может быть также нанесен с помощью кисти в виде тонкого слоя жидкой пасты, уложен в неглубокие специальные пазы и т. п. При высокотемпературной пайке в вакууме значительная часть флюса испаряется.

При пайке в вакууме сплавов на никелевой и медной основах, а также высоколегированных сталей образуются более плотные и прочные швы, чем при пайке в среде водорода.

Существенное значение при пайке в вакууме и инертных газах имеет величина изолированного объема вокруг паяемого изделия и присутствие оксидов на поверхности металлической паяльной оснастки: чем меньше такой объем и меньше оксидов на металлической оснастке, тем меньшее количество кислорода содержится

в атмосфере вокруг паяемого изделия и, следовательно, менее развита оксидная пленка на поверхности паяемого металла. Для уменьшения изолированного объема вокруг паяемого изделия перед загрузкой в вакуумную печь или контейнер с проточным аргоном изделие помещают в специальную коробку или под колпак из коррозионно-стойкой стали. Во многих случаях без этих мер трудно обеспечить высокое качество паяных соединений из высокоактивных металлов или сплавов. При нанесении на паяемые поверхности гальванических и, особенно, термовакуумных покрытий последние лишь в известной степени изолируют паяемый металл от контакта с внешней газовой средой.

Пайка в вакууме имеет ряд преимуществ. Она обеспечивает образование более плотных и прочных швов, чем пайка в инертных и активных газовых средах, в результате дегазации жидкого припоя, исключает образование в конструкционно сложных изделиях из коррозионно-стойких сталей «воздушных мешков». При пайке сталей в вакууме исключено образование на их поверхности гидридов и нитридов и обезуглероживание. Кроме того, считают, что эксплуатационные затраты на создание вакуума (например, при электронно-лучевой пайке) в 35 раз ниже, чем при использовании инертных газов или активных газовых сред.

*Пайка в инертных газах.* Пайку выполняют преимущественно в контейнерах, в отдельных случаях — в печах со специальным муфелем, заполняемым, например, аргоном. Обычно используют жесткие или мягкие контейнеры, герметизированные обваркой или резиновым уплотнением водоохлаждаемой крышки.

При введении аргона под некоторым давлением в контейнер часть кислорода вместе с воздухом вытесняется и парциальное давление кислорода в контейнере становится меньше, чем в окружающей воздушной среде.

Загрязнение проточного аргона влагой, адсорбированной на внутренних поверхностях контейнера, паяемого металла и припоя, существенно зависит от режима нагрева и способа предварительного удаления воздуха из контейнера. Наименее эффективна предварительная продувка контейнера аргоном при нормальной температуре. Нагрев контейнера без предварительной продувки аргоном с изотермической выдержкой при температуре 200—300 °С или предварительное удаление воздуха путем вакуумирования контейнера позволяют резко сократить расход нейтрального газа при продувке контейнера и улучшить условия защиты паяемого изделия от окисления.

Пайка в инертных газах в печах со специальными муфелями отличается безопасностью, меньшим числом дефектов в изделиях, например, в среде проточного аргона, чем пайка с флюсом. Однако в условиях производства такой способ связан с большими затратами на подготовку контейнеров (продувка аргоном, вакуумирование с последующей герметизацией), высокой стоимостью чистого аргона. При этом не исключается образование в изделиях слож-

ной конструкции «воздушных мешков» при пайке в глухие отверстия.

При диссоциации оксидов в герметизированной от воздуха нейтральной газовой среде парциальное давление кислорода около поверхности, где происходит разложение оксидов, повышается и может вызвать прекращение процесса их диссоциации несмотря на благоприятное среднее парциальное давление кислорода. Поэтому в процессе пайки в таких условиях среднее содержание кислорода будет также увеличиваться. Удаление скопившегося кислорода из мест интенсивной диссоциации оксидов при пайке в проточной нейтральной газовой среде способствует сохранению низкого парциального давления кислорода в контейнере и, следовательно, непрерывному самопроизвольному распаду оксидов.

При пайке в печах замер температуры только атмосферы печи или в контейнере недостаточен. Термопара должна плотно контактировать с паяемым изделием. Паяемые изделия в контейнерах в проточном нейтральном газе могут быть прижаты механическими прижимами и за счет разности коэффициентов линейного расширения соединяемых металлов, например, в телескопических соединениях, а также пневматическими прижимами.

Сухой чистый азот может быть использован в качестве нейтральной газовой среды для пайки обычной меди. Оксид меди (I) разлагается на воздухе только при температуре 2000 °С. В потоке сухого азота оксиды меди восстанавливаются при температуре 740—750 °С, при которой можно осуществлять пайку без опасности охрупчивания меди.

Многие сплавы и стали, легированные хромом и алюминием, можно паять при парциальных давлениях кислорода, более высоких, чем следует из теоретического рассмотрения условий равновесия для чистых металлов; это можно объяснить тремя причинами.

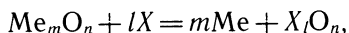
1. Окисление сплавов в некоторых случаях протекает очень медленно, в результате чего при кратковременном процессе пайки пленка оксидов не успевает образоваться или образуется незначительной по толщине, не оказывающей заметного влияния на взаимодействие металла с жидким припоем.

2. Сплошность оксидных пленок на паяемом металле существенно зависит от химического состава и структуры паяемого сплава. Поэтому окисление сплавов — более сложный процесс и полностью не отражается теорией окисления, разработанной для чистых металлов.

3. Пленки оксидов на сплавах в вакууме и инертной среде не образуют сплошного слоя; через несплошности и трещины может проникать жидкий припой, смачивать паяемый металл, подплавлять его под пленкой и диспергировать ее.

*Пайка в активных (восстановительных) газовых средах.* Возможность пайки в активной газовой среде (восстановительной) основана на реакциях между твердыми оксидами на поверх-

ности паяемого изделия и окружающим его активным газом, в результате которых из оксидов восстанавливается металл, а образующийся новый продукт окисления удаляется. Такую реакцию в общем виде можно записать следующим образом:



где  $\text{X}$  — восстановитель.

Мерой способности реакции к развитию при заданных давлении  $p$  и температуре  $T$ , является величина изменения ее свободной энергии

$$\Delta F_T = [l\Delta F_{\text{X}_l\text{O}_n} - m\Delta F_{\text{Me}_m\text{O}_n}].$$

Положительное значение изменения свободной энергии  $\Delta F_T$  реакции свидетельствует о том, что термодинамически реакция невозможна и протекает в направлении, обратном выбранному, т. е. данный процесс может быть реализован только при соответствующем изменении температуры  $T$  и давлении  $p$ . Отрицательное значение изменения свободной энергии  $\Delta F_T$  реакции означает, что последняя возможна и ее завершение при заданных  $p$  и  $T$  наиболее вероятно, если изменение свободной энергии  $\Delta F_T$  будет большой отрицательной величиной. При этом изменение свободной энергии образования входящих в реакцию элементов принимается равным нулю.

Однако пригодность активного газа для пайки металлов определяется не только термодинамическими условиями протекания реакции его взаимодействия с оксидами в сторону их восстановления, но и состоянием продуктов реакции. Если продукты реакции находятся в твердом состоянии, то они препятствуют смачиванию и растеканию жидкого припоя по паяемому материалу и активная газовая среда, несмотря на благоприятные термодинамические условия восстановления оксидов, может оказаться не пригодной для пайки [23].

При восстановлении оксидов под действием активных газов действует принцип Байкова, согласно которому такой процесс идет ступенчато, путем отщепления кислорода от высшего оксида к низшему или от низшего к высшему. Активные газы через поры и трещины проникают в пленку оксида и взаимодействуют с ним по всей толщине пленки. В результате этого зерно оксида может оказаться многослойным: в центральной его части зерно может состоять из высшего оксида, на границе — из восстановленного металла, а между ними — из промежуточных оксидов.

На поверхности сложнолегированных сплавов образуются, как правило, не оксиды чистых металлов, а их твердые растворы (шпинели). Теплота образования оксидов металлов может быть большей или меньшей, чем теплота образования оксидов сплавов на основе этих металлов. Соответственно этому пайка сплавов может быть труднее или легче, чем пайка чистых металлов.

В качестве активной (восстановительной) газовой среды для пайки сталей наиболее широкое распространение получил водород. Впервые Н. Н. Бекетов показал возможность восстановления оксидов на поверхности металлов в среде водорода. Промышленное применение этого процесса было осуществлено в 1912 г. для пайки молибденовых дисков со стальным стержнем при изготовлении автоматических систем [51].

Показателем химической активности водорода по отношению к оксидам является изменение изобарного потенциала

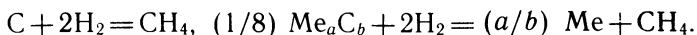
$$\Delta z_T = \Delta z_T^0 + T \ln \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}}, \quad (17)$$

т. е. с изменением парциального давления или концентрации  $\text{H}_2$  и продукта реакции  $\text{H}_2\text{O}$  (пара) и температуры пайки будет изменяться и химическая активность газа — водорода по отношению к оксидам металла.

Такие металлы, как свинец, кадмий, титан, олово, цирконий и ниобий, образуют гидриды, поэтому пайка их в водородной среде нецелесообразна.

Если продукты окисления сложных сплавов состоят из простых оксидов этих металлов, то по данным об их устойчивости можно сделать предварительное заключение о возможности пайки сплавов в восстановительной среде. Так, например, сплавы, на поверхности которых образуются оксиды  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , не могут быть запаяны в водородной среде. Сплавы, на поверхности которых образуются оксиды, содержащие  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , или оксиды на их основе  $(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{O}_3$ , требуют применения очень сухих восстановительных сред. Так, никелевый сплав Нимоник-80, содержащий 20 % Cr, 2,7 % Ti и 1,8 % Al, не удается запаять медью при температуре 1180 °С даже в водороде с точкой росы — 75 °С. Эти выводы подтверждаются практикой. Так, например, коррозионно-стойкую сталь 12Х8Н9Т, при окислении которой образуется смесь оксидов  $(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}(\text{CrFe})_2\text{O}_3$ , паяют в среде водорода или диссоциированного аммиака только в случае, если из газа удалены следы кислорода, двуокись углерода и точка росы восстановительной среды не выше — 60 °С. При температуре ниже 1200 °С оксиды, образующиеся на стали, содержащей хром, марганец и кремний в сумме более 2 %, не восстанавливаются в неосушенном водороде. Стали, содержащие 2 % титана и более, также не поддаются пайке в этой среде.

К особенностям пайки сталей в водороде следует отнести и то обстоятельство, что водород может взаимодействовать также с углеродом и карбидами стали по реакциям



Такое взаимодействие будет иметь место, если изобарный потенциал изменяет величину и знак. С водородом в соединении ( $\text{CH}_4$ ) при 327—527 °С реагируют также карбиды хрома, марганца,

вольфрама, циркония. Для предотвращения обезуглероживания стали в водород вводят метан. Обезуглероживанию способствует влажность газа и увеличение концентрации углерода в стали.

Оксид углерода может быть восстановительным газом, если изменение изобарного потенциала  $\Delta z_r = \Delta z_{\text{CO}_2} - \Delta z_{\text{C}_o} - (1/n) \times \times \Delta z_{\text{Me}_m\text{O}_n} < 0$ . В такой среде может идти также обезуглероживание или науглероживание стали по реакции  $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ . В среде  $\text{CO} + \text{H}_2$  идет реакция  $\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ . Науглероживание или обезуглероживание стали в смеси этих газов будут зависеть от соотношения в ней  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (соответственно область восстановления или окисления).

В водороде или диссоциированном аммиаке кроме углеродистой стали можно паять быстрорежущую, высокоуглеродистую и хромомолибденовую стали, а также хромансиль. Оксидные пленки на никель-вольфрамовой стали в среде водорода начинают интенсивно восстанавливаться при температуре начиная от 1180—1200 °С, и поэтому сталь следует паять при этих температурах.

В некоторых случаях при пайке в печах с восстановительной средой необходимо применять флюсы, например, когда газовая среда печи имеет недостаточно низкую точку росы или недостаточно активна для оксидов, образующихся на паяемом металле, или если паяемый сплав или припой содержат легкоиспаряющиеся элементы, такие, кадмий или цинк.

В производстве используют не только чистый водород. Часто газовые восстановительные среды содержат также азот, а иногда  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др. Поэтому при решении вопроса о пригодности таких газовых сред в качестве восстановительных необходимо учитывать также возможность взаимодействия их компонентов с паяемым металлом и припоем и влияние на свойства паяного соединения.

При определенных условиях водород поглощается всеми металлами без исключения. В железе, марганце, кобальте, алюминии, платине, молибдене водород растворяется в атомарном состоянии и образует твердые растворы.

Данные, приведенные в литературе, по растворимости водорода в различных сталях и металлах относятся к сравнительно равновесным условиям и не всегда применимы к межфазным метастабильным процессам, происходящим при пайке. Однако развитие процессов при этом чаще всего идет в том же направлении, что и в равновесных условиях.

Азот не растворяется в некоторых металлах (меди, никеле, золоте, серебре), химически не взаимодействующих с ним. С железом азот образует два нитрида:  $\text{Fe}_4\text{N}$  и  $\text{Fe}_2\text{N}$ . Нитрид  $\text{Fe}_2\text{N}$  диссоциирует в среде чистого азота при температуре 550 °С, а при более высокой температуре разлагается и нитрид  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Аммиак, разлагаясь на поверхности металла, поддерживает на ней повышенную концентрацию атомарного азота и благоприятствует растворению азота в железе.

При пайке в печах с азотно-водородной средой на поверхности стали появляется азотированный слой, в котором могут присутствовать нитриды. Однако в условиях пайки сталей при высоких температурах и малой выдержке не образуется значительных по величине слоев азотированного металла.

При необходимости совмещения процесса пайки с процессом азотирования деталей из стали, например, состава (%): 0,12 С, 0,5 Мп, 0,4 Р, 0,045 S, Fe — остальное применяют специальные смеси газов состава (%): 1) эндогаз: 1,8 CO, 0,9 H<sub>2</sub>, 0,26 CO<sub>2</sub>, остальное N<sub>2</sub> (газ); 2) экзогаз: 24,5 CO, 31,9 H<sub>2</sub>, 0,26 CO<sub>2</sub>, остальное N<sub>2</sub>. Реакция  $2\text{NH}_3 = 3\text{H}_2 + \text{N}_2$ , получаемая при крекинг-процессе, широко используется для получения активной газовой атмосферы при пайке. Такой процесс эндотермичен по природе. Однако эта реакция никогда не достигает равновесия. Точка росы газа должна быть не выше —40 °С. Такая атмосфера после сушки применена не только для пайки мягкой стали, но и для пайки коррозионно-стойкой стали. Однако стоимость такой атмосферы выше, чем стоимость горючих газов, и поэтому она используется лишь для небольших печей и материалов относительно высокой стоимости.

Состав азотируемой паяльной газовой смеси (%): 1) 50 эндогаза, 50 NH<sub>3</sub>; 2) 80 экзогаза, 20 NH<sub>3</sub>. Режимы пайки: медью при температуре 1090—1130 °С; латунью при 910—980; серебряным припоем при 700—900 °С.

Пайку медью, например, осуществляют в проходных печах с ленточным транспортером по режиму  $t_n = 1130$  °С;  $\tau = 10$  мин с последующим быстрым охлаждением (форсированно) до 650—700 °С. При этом толщина слоя нитридов достигает 15 мкм, диффузионного слоя — 0,3 мм. Процесс осуществляется в трехкамерной печи (пайка, отпуск, азотирование), камеры которой изолированы друг от друга перегородками из коррозионно-стойкой стали. (Заявка 2475960 Франция, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 1/02, H06 К 3/24).

При пайке стали в газовых восстановительных средах, содержащих водород, последний взаимодействует с углеродом стали по реакции  $\text{FeC} + 2\text{H}_2 = 3\text{Fe} + \text{CH}_4$ .

В результате этой реакции образуется летучий метан и обезуглероживается сталь. Развитию процесса обезуглероживания способствует повышение температуры и увеличение выдержки при этой температуре.

Активность восстановительных газовых сред сильно зависит от концентрации в них не только водорода, но и влаги. Под ее действием константа равновесия смещается в сторону окисления. Содержание паров воды в газе может быть оценено по его точке росы. Однако зависимость между точкой росы и температурой равновесного процесса восстановления оксидов получена теоретически и не учитывает скорости восстановления оксидов.

Перестроены и пересчитаны кривые для диаграммы «температура точки росы в атмосфере H<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)» (рис. 33), предложен-

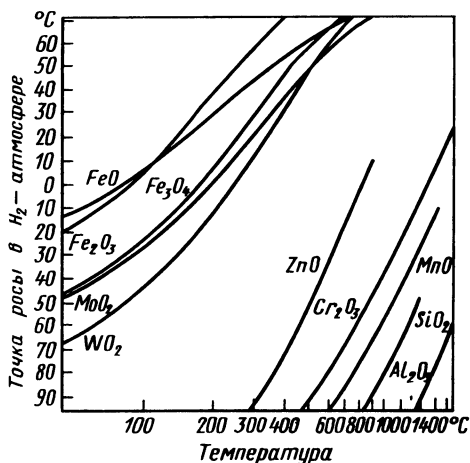


Рис. 33. Зависимость точки росы в  $H_2$ -атмосфере от температуры обратимых реакций

ные ранее Чангом [51]. На этих диаграммах в области выше каждой из кривых соответствующий металл окисляется, а ниже — восстанавливается из оксида. В области высоких температур и низких точек росы (рис. 33) кривые для  $MoO_2$ ,  $Al_2O_3$  близки к тем же кривым на прежней диаграмме, но кривые для  $MoO$ ,  $FeO$  и  $Fe_2O_3$  имеют более низкое значение точки росы, чем по диаграмме Чанга. Для кривых  $WO_2$  и оксидов железа также имеет место существенное отличие. При высоких температурах заметное восстановление оксидов железа в газовой

среде происходит только при содержании в ней не менее 4 %  $H_2$  или 12 %  $CO$ . Присутствие влаги способствует также наводороживанию стали.

При пайке в печи медью иногда наблюдается плохое смачивание и затекание ее в зазор между паяемыми деталями из углеродистой стали. Смачиваемость стали медью улучшается при обезуглероживании поверхностного слоя стали, создаваемом в процессе предварительной термообработки. Наиболее активной газовой средой при этом является водород. Водород из баллона имеет точку росы  $-7^\circ C$ , после очистки и сушки  $-60^\circ C$ . Однако применение водородной среды сопряжено с большими затратами и небезопасно. Чаще применяется газовая восстановительная среда, получаемая при диссоциации аммиака и служащая заменителем водорода для этих целей.

Для большинства металлов при пайке в защитных средах содержание кислорода должно быть не более 0,005 %, а влаги не более 0,03 г/м<sup>3</sup>.

Кроме водорода и продуктов диссоциации аммиака, в качестве восстановительной среды применяют продукты неполного сгорания смеси воздуха с высококалорийными газами (городским и генераторным газом, так называемым природным газом, пропаном в баллонах, водяным паром, продуктами пиролиза керосина и др.). Используют также продукты неполного сгорания газов, полученных на газовых станциях, работающих на торфе, и т. п.

Получение защитного газа в печи при сгорании смеси выгоднее, по сравнению с его использованием в готовом виде, так как выделяемая теплота при сгорании полностью используется при пайке.

В последнее время за рубежом этот вариант способа пайки

снова стал интенсивно применяться в мелкосерийном производстве в машиностроении, строительстве, транспортных устройствах, электрическом оборудовании и др. Это обусловлено тем, что при таком способе не требуются дополнительные операции по промывке остатков флюса и шлаков после шлифования, пескоструйной обработки, травления паяных изделий, в связи с этим штучное время сокращается иногда на 50 %.

Применение магазинной загрузки деталей в печь вместо ленточного конвейера в печах непрерывного действия позволяет уменьшить трудоемкость одной типовой детали в автомобильной и электротехнической отраслях промышленности на ~30 %.

Подобные газовые смеси можно применять только для пайки низкоуглеродистых низколегированных сталей медью. Относительно низкое содержание водорода и оксида углерода делает их непригодными при пайке сплавов, окисляющихся с образованием оксидов, содержащих хром. Для этих сплавов необходима среда сухого водорода или диссоциированного аммиака.

В связи с ростом стоимости природного газа, используемого для получения экзотермической атмосферы в печи, и с целью получения очень чистого водорода, не требующего дорогостоящей осушки, предложено использовать в качестве активной газовой среды для пайки металлов очень чистый водород, получаемый в генераторе из смеси металла с водой. Для окисления углерода связующей пасты и предотвращения образования сажистых налетов на паяемом изделии в атмосферу печи вводят кислород с точкой росы 60 °С. При расходе смеси 55—85 м<sup>3</sup>/ч производительность пайки на 14 % выше, чем в атмосфере сжигания природного газа [49]. Получаемая при этом дешевая атмосфера азота с метанолом диссоциирует при 1090 °С на один объем СО и на два объема Н<sub>2</sub>.

Исследования показали, что по сравнению с обычной экзотермической смесью, содержащей 8—10 % Н<sub>2</sub> при точке росы 10—13 °С (расход смеси 1888 л/мин) смеси азота с метанолом (расход смеси 720 л/мин) обеспечивают более качественные паяные соединения и отсутствие окисления стали, характерное для обычной экзотермической смеси. При пайке в среде природного газа, содержащего 4,9 % азота и 1,5 % метанола, также получается качественный паяный шов, но на соединении оседают сажистые остатки, состоящие из 7 % С и 62 % Cu. Места изделия, покрытые такими остатками, плохо поддаются окраске и приводят к быстрому науглероживанию металлических элементов печи [58].

Парциальное давление кислорода в газовой нейтральной или восстановительной среде может быть снижено не только химически активными поглотителями кислорода, но и катализаторами, способствующими связыванию кислорода с водородом в молекулы воды, удаляемые из газа сушкой. Наилучшими каталитическими свойствами обладают платина и палладий.

Для очистки водорода от следов кислорода и влаги иногда применяют осушители с платинированным асбестом или активированным оксидом алюминия, обеспечивающие точку росы газовой смеси — 60 °С, а также палладиевые катализаторы с последующим прохождением газа через столб активированного оксида алюминия, поглощающего оставшиеся следы влаги. Последний способ обеспечивает точку росы газовой смеси — 80 ÷ — 100 °С.

При промышленной пайке в печи трубопроводов из коррозионно-стойкой стали атмосфера азота с добавкой молекулярного водорода с точкой росы — 62 °С предпочтительна, по сравнению со средой экзотермического газа, получаемой при сжигании природного газа. Ее использование сокращает простои печи, позволяет отказаться от сырья, поставка которого вызывает большие трудности и имеет повышенную стоимость, улучшает условия труда в связи со снижением влажности атмосферы печи. В такой атмосфере паяют трубы диаметром 14 мм и длиной 183 мм с концевой арматурой из коррозионно-стойкой стали типа 409 с толщиной стенки 0,7 мм припоями системы Мп—Си при температуре 1120 °С [50].

Экзотермическая атмосфера, получаемая из природного газа, содержит 0,1—2,3 %  $\text{H}_2\text{O}$  и нуждается в дополнительной очистке от паров воды. При пайке в водородсодержащих газовых средах следует учитывать не только ее восстановительные свойства, но и взрывоопасность и ядовитость, так как она содержит токсичные оксид углерода, аммиак, сернистый газ, сероводород. Неправильная эксплуатация газового оборудования может привести к взрыву; возможно обезуглероживание стали как в восстановительных, так и в нейтральных средах.

Наряду с этим пайка сталей в печах с активной (защитной) атмосферой, содержащей водород и другие активные соединения, имеет ряд преимуществ: существенно (на 30—75 %) позволяет экономить материалы и машинное время.

Получение очень чистого водорода с точкой росы ниже — 70 °С возможно лишь при пропускании его перед пайкой через смесь порошков серебра (23 %) и палладия (77 %).

Как установил М. Б. Равич, минерал дунит, содержащий в распыленном виде следы платины, осмия, иридия, а также оксиды железа, никеля и других металлов, катализирует процесс горения газов. Р. Е. Есенберлин приметил этот минерал как катализатор при очистке азотоводородной газовой смеси от примеси кислорода с целью получения активной восстановительной газовой среды для пайки металлов.

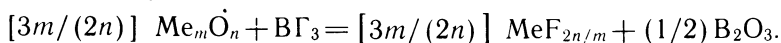
В азотоводородной смеси ( $\sim 10\%$   $\text{H}_2$ , остальное  $\text{N}_2$ ), очищенной от кислорода при помощи силикагеля и фосфорного ангидрида, возможна пайка при температуре 1050—1080 °С стали 12Х18Н9Т и сплава ХН78Т.

Использование молекулярного водорода для низкотемпературной бесфлюсовой пайки в печи возможно только при темпе-

ратуре выше 300 °С, так как ниже этой температуры он теряет свои восстановительные свойства. Для пайки полупроводниковых приборов используют смесь молекулярного водорода с атомарным водородом, являющимся более сильным восстановителем металлов из оксидов. Состав такой смеси: 1—30 об. % атомарного водорода, остальное — молекулярный водород. Такая смесь, кроме того, менее взрывоопасна. Высоковакуумные паяные соединения могут быть получены в смеси молекулярного и атомарного водорода, имеющей на выходе точку росы до —50 °С.

Другими важными восстановительными газами для пайки являются боргалогенидные соединения  $BG_3$ , где G — галогены (фтор, хлор, бром).

Восстановительно-окислительная реакция для оксидов металлов в этом случае



В результате реакции образуются галогениды паемого металла. Если они при этом находятся в газообразном или жидком состоянии, то пайка возможна.

Химическая активность  $BCl_3$  по отношению к оксидам ряда металлов выше химической активности  $BF_3$ ; кроме того,  $BCl_3$  образует с металлами более легкоплавкие и легковозгоняющиеся хлориды, чем фториды соответствующих металлов. Оксиды бериллия, молибдена, вольфрама, сурьмы, никеля, ниобия, меди не реагируют с  $BCl_3$  ни при каких температурах.

Борирование металла происходит в этих средах особенно интенсивно, если хлорид металла газообразен. Твердые и жидкие хлориды металлов мешают доступу  $BCl_3$  к поверхности паемого металла, и восстановление оксидов в этих условиях может прерваться.

Трехбромистый бор с позиции термодинамики еще более активен, чем  $BF_3$  и  $BCl_3$ , и реагирует со всеми оксидами, кроме  $BeO$ . Для  $MoO$  и  $TiO_2$  атмосфера  $BBr_3$  инертна. По расчетам Р. Е. Есенберлина, особенно активен  $PCl_3$ ; он не пригоден лишь для пайки магния вследствие образования твердого  $MgCl_2$ , покрывающего паемый металл и мешающего растеканию припоя;  $PCl_3$  не диффундирует в металл вследствие его многоатомности.

Среди галогенидных активных газовых сред наибольшее применение в производственных условиях нашел фтористый бор  $BF_3$ . Данные об активности других галогенидных газовых сред во многих случаях получены в результате термодинамического анализа и опробованы пока лишь в лабораторных условиях.

Достижение оптимальных условий пайки, при которых на паемом металле не будут образовываться оксиды, твердые хлориды и бор, возможно при применении смеси нейтральных газов (Ar, He и др.) с достаточно малыми добавками активных газов.

Оптимальное содержание газов  $BCl_3$  и  $PCl_3$  в смеси с аргоном составляет 0,01—0,002 об. %  $BCl_3$  и 0,001—0,002 об. %  $PCl_3$ . Смес-

си аргона с  $\text{BF}_3$  и  $\text{HF}$  достаточно химически активны при пайке многих коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов при  $t_n > 1000^\circ\text{C}$ .

Смесь  $\text{Ag} + \text{BCl}_3 + \text{PCl}_3$  успешно применена при пайке в течение 10 мин сталей Ст3 и 30ХГСА оловом, припоями ПОС 40 ( $300^\circ\text{C}$ ) и ПСр 40 ( $t_n = 640^\circ\text{C}$ ), латунью ( $t_n = 950^\circ\text{C}$ ) и высокомарганцевым припоем ( $t_n = 1000^\circ\text{C}$ ); стали 12Х18Н9Т оловом ( $t_n = 300^\circ\text{C}$ ), ПСр 40 ( $t_n = 650^\circ\text{C}$ ); меди оловом, ПОС 40 ( $t_n = 300^\circ\text{C}$ ), ПСр 40 ( $t_n = 650^\circ\text{C}$ ), латунью ( $t_n = 950^\circ\text{C}$ ).

По данным М. Хилла, для удаления оксидов с поверхности припоев на основе свинца при температуре  $328\text{—}420^\circ\text{C}$  можно использовать газообразные ацетатные соединения  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,  $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$  или их смеси с инертным газом. Такие активные газовые смеси восстанавливают свинец из оксида.

Активные газы, используемые для пайки, ядовиты и (или) взрывоопасны и требуют соблюдения специальных мер техники безопасности. Взрывоопасны водород и оксид углерода, смеси водорода с азотом при содержании в них 3,3—81,5 об. %  $\text{H}_2$ .

Разложение оксидов происходит более активно при применении вместо фторида аммония фторбората аммония. Фтористый бор реагирует с рядом оксидов, способствуя их разложению. В чистом виде он может быть получен нагревом до  $150\text{—}200^\circ\text{C}$  борного ангидрида  $\text{B}_2\text{O}_3$  и фторбората калия  $\text{KBF}_4$  в серной кислоте или нагревом солей фторборной кислоты (например,  $\text{NaBF}_4$ ,  $\text{NaPO}_4 \cdot 3\text{BF}_4$ ,  $\text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 3\text{BF}_3$  и др.), диссоциирующих на фторид металла и фтористый бор.

В США до 70 % общего объема высокотемпературной пайки занимает бесфлюсовая пайка в печах, а в Японии до 25—27 %. Отмечается, что площадь дефектов в изделиях, паянных этим способом, меньше, чем при пайке с флюсами типа ПВ 200 в аргоне или по гальваническому никелевому покрытию. К недостаткам способа пайки в инертных газах относятся их высокая стоимость и дефицитность, а в активных газах трудность, в некоторых случаях, снабжения аммиаком и природным газом. В качестве перспективного варианта их замены является использование низкого вакуума с парами активных металлов или недорогими инертными газами — азотом и  $\text{CO}$ , имеющими большую активность к окислительным компонентам атмосферы, чем к паяемому металлу и припою.

Для низкотемпературной бесфлюсовой пайки меди и латуни нашла применение газовая среда, состоящая из 68—72 %  $\text{N}_2$ , 8—11 %  $\text{CO}$ , 0,1—1 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Такую смесь газов получают путем неполного сгорания природного газа после добавления в него паров воды с растворенным в ней  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

Эффективным способом пайки является среда сухого водяного пара, активированная хлористым аммонием (0,05 об. %). Такая среда может быть использована одновременно и как активная газовая среда (рис. 34), и как теплоноситель, например при

Рис. 34. Зависимость свободной энергии от температуры реакций между оксидами металлов и сухим паром

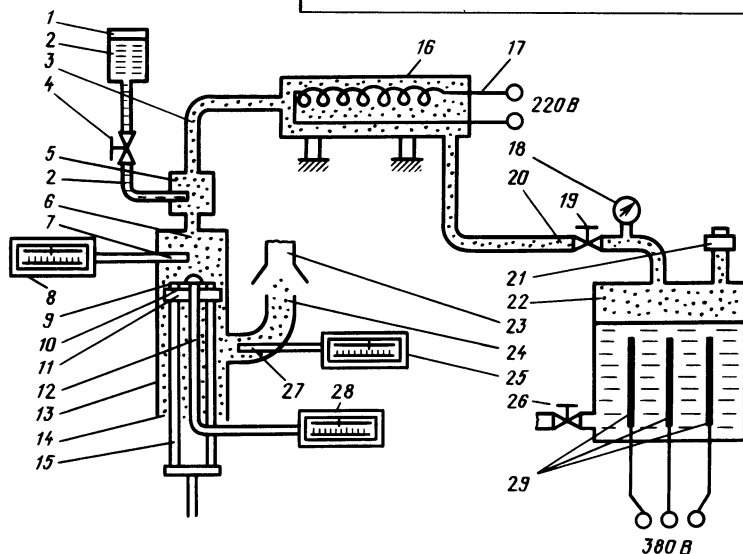
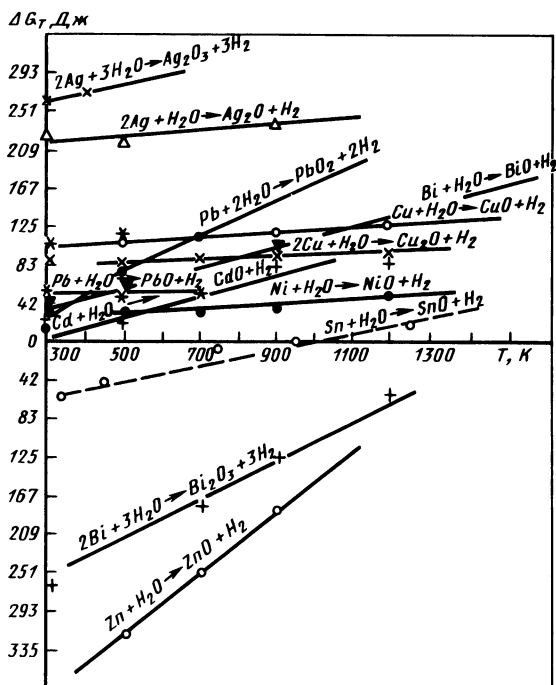


Рис. 35. Схема лабораторной установки для пайки в активированном сухом водяном паре:

1 — емкость; 2 — капельница; 3 — трубопроводы; 4, 19, 26 — вентили; 5 — камера смешивания; 6 — экран; 7, 12, 27 — термопары; 8, 25, 28 — потенциометры; 9 — припой; 10 — образец; 11 — подложка; 13 — камера пайки; 14 — отверстие; 15 — штатив; 16 — пароперегреватель; 17 — нихромовая спираль; 18 — манометр; 20, 24 — трубопроводы; 21 — клапан; 22 — парогенератор; 23 — вытяжная вентиляция; 29 — электроды

пайке припоем ПОССу 30—2. Изделия типа латунных автомобильных теплообменников, паянных в такой среде, обладают высоким качеством. На рис. 35 приведена схема лабораторной установки для пайки в активированном сухом водяном паре [1].

После обработки деталей из меди и ее сплавов (латуней) в сухом паре, активированном хлоридом аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , детали могут быть запаяны под колпаком в печи или в пламени газопламенной горелки без флюса в течение  $\sim 10$  мин после обработки и в течение 20 мин после несколько удлиненного режима обработки.

Смеси фтористого бора или фтористого аммония с чистым аргоном менее активны, но вполне пригодны для пайки коррозионно-стойких сталей и некоторых жаропрочных сплавов при температуре 1000—1200 °С. Кроме того, эти смеси менее токсичны. Фтористый бор способен к распаду при реакции взаимодействия с оксидами; при этом возможно борирование поверхности паяемого металла.

## Г л а в а 5

### СПОСОБЫ ПАЙКИ ПО ИСТОЧНИКУ НАГРЕВА

Распространение тепловой энергии в пространстве осуществляется тремя способами — теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность — теплообмен, при котором происходит атомарно-молекулярный перенос теплоты от частиц с более высокой энергией к частицам с меньшей энергией в рассматриваемом объеме пространства.

Распространение тепловой энергии от нагреваемой поверхности в глубь твердого тела происходит только теплопроводностью. Скорость распространения тепловой энергии и изменения температуры по объему нагреваемого тела характеризуется коэффициентами теплопроводности.

Теплопроводность неметаллических жидкостей и газов на несколько порядков меньше теплопроводности твердых металлов и сплавов. Поэтому теплота в жидкостях и газах распространяется практически только конвекцией и излучением.

Конвекция — это процесс переноса теплоты путем перемещения в пространстве отдельных объемов жидкости или газа, нагретых до различной температуры. В самой движущейся среде перенос теплоты осуществляется за счет теплопроводности. Удельный конвективный тепловой поток, переносимый жидкостью или газом с плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, определяется по формуле  $g_k = \rho v H$ , где  $v$  — скорость потока жидкости (газа), м/с;  $H$  — энтальпия, Дж/кг.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  характеризует теплопроводность окружающей жидкости или газообразной среды и численно определяет интенсивность теплоотдачи поверхности тела. Коэффициент теплоотдачи при пайке зависит от конструкции паяемого изделия, его габарита, массы, температуры и скорости движения окружающей среды, ее физических свойств. Наибольший коэффициент теплоотдачи имеют жидкие расплавы солей и металлов ( $\alpha_k = 232 \div 1163$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Поэтому скорость нагрева деталей в них, особенно при низкотемпературной пайке, в 3—6 раз выше, чем при нагреве в печах с газовой атмосферой.

Излучение — процесс распространения тепловой энергии в виде электромагнитных волн. Электромагнитные волны возни-

кают вследствие движения заряженных частиц — электронов и ионов.

Тепловая энергия передается электромагнитным излучением с длиной волны  $\lambda = 0,4 \div 800$  мкм, т. е. световым излучением. Радиационный тепловой поток зависит от температуры и длины волны (закон Планка). С повышением температуры тела большую часть тепловой энергии переносит тепловое излучение, а меньшую — световое излучение.

Если распространение тепловой энергии осуществляется одновременно несколькими способами, то говорят о сложном теплообмене. Так, перенос теплоты теплопроводностью и конвекцией называют конвективным теплообменом, теплопроводностью и излучением — радиационно-кондуктивным, теплопроводностью, конвекцией и излучением — радиационно-конвективным теплообменом. В практике нагрева при пайке встречается как простой, так и сложный теплообмен.

Нагрев собранных под пайку изделий или сборочных единиц может быть локальным или общим. Степень локальности зависит от тепловой мощности источника теплоты: чем она больше, тем по меньшей поверхности (объему) может быть осуществлен нагрев соединяемых деталей до температуры пайки за время нагрева  $t_n$ . Локальность нагрева определяется отношением площади нагреваемой поверхности  $S_n$  (объема  $V_n$ ) ко всей площади поверхности деталей изделия  $S_0$  ( $V_0$ ). Если  $S_n/S_0 = 1$ , то нагрев общий, если  $S_n/S_0 < 1$ , то нагрев локальный. Локальный нагрев при пайке обуславливает развитие меньшего температурного градиента в соединяемых деталях, чем при сварке плавлением, а следовательно, и развитие меньших тепловых деформаций и растягивающих внутренних напряжений в готовом изделии. Различные способы нагрева имеют свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при их выборе для пайки изделия.

Нагрев деталей с поверхности характерен для большинства способов. Нагрев в объеме происходит только при прямом электроконтактном и при некоторых режимах индукционного нагрева.

При низкотемпературной пайке форма деталей вследствие тепловых деформаций не изменяется, уменьшено окалинообразование паяемого материала; такая пайка более проста в исполнении и более экономична, чем высокотемпературная пайка, и может обеспечивать достаточно высокую надежность паяных соединений.

Важнейшим преимуществом низкотемпературной пайки является возможность ее осуществления на тонких пленках и микроминиатюрных деталях. Хорошая теплопроводность и электрическая проводимость припоев и паяных соединений, возможность соединения разнородных материалов, простота окончания процесса пайки, возможность применения вакуумной, абразивной и ультразвуковой пайки обеспечивают ведущую роль низкотемпературной пайки при создании изделий в электронике и, особенно,

в микроэлектронике [42]. Важнейшими способами низкотемпературной пайки по источнику нагрева являются пайка паяльником, погружением в жидкий припой, волной припоя и конденсационная.

Низкотемпературная пайка также нашла применение при соединении медных труб, работающих под давлением 1—4 МПа, при нагреве до 110 °С; при изготовлении трубчатых теплообменников, сосудов для хранения жидкого кислорода и различных сантехнических и отопительных систем в технике и других областях.

К важнейшим преимуществам высокотемпературной пайки относятся возможность изготовления изделий окончательного размера, отсутствие оксидов на поверхности деталей, получение вакуумно-плотных и герметичных соединений, работающих в условиях высоких давлений, возможность ступенчатой пайки и др.

Источниками энергии при высокотемпературной пайке являются излучение и электроконтактный нагрев (электросопротивлением), индукционный нагрев токами средней и высокой частоты. Среди способов высокотемпературной пайки по источнику нагрева наиболее широко используют индукционную пайку и пайку в вакуумных печах.

## 1. ПАЙКА ПАЯЛЬНИКОМ

Паяльник — инструмент для пайки металлов легкоплавкими припоями. Основное назначение паяльника — нагрев припоя до полного расплавления и нанесения его на паяемую деталь при одновременном подогреве основного металла по месту пайки. С помощью паяльников в процессе пайки паяемую поверхность очищают от оксидов и подают флюс.

Паяльник представляет собой металлический стержень, один конец имеет форму, удобную для нанесения припоя в зазор и нагрева основного металла при пайке, а другой укреплен на стальном прутке с ручкой из дерева или другого теплоизолирующего материала. Для паяльников чаще всего используют электрический нагрев, реже — газопламенный.

Паяльник нагревается периодически, по мере его остывания, или постоянно действующим источником теплоты, поддерживающим его температуру в определенных пределах. Перенос теплоты с паяльника на паяемую деталь происходит особенно быстро через слой жидкого припоя, который служит хорошим тепловым контактом между паяльником и деталью. При этом нагревается часть паяемой детали, соприкасающаяся с жидким припоем. Скорость переноса теплоты паяльника на припой и паяемую деталь зависит от теплопроводности металла паяльника, припоя и паяемой детали, а также от температуры и площади поверхности, по которой осуществляется контакт между паяльником и деталью. Температура паяльника тем устойчивее, чем больше его масса. Поэтому с увеличением массы паяльника увеличивается производительность процесса пайки вследствие сокращения времени на его подогрев, а также улучшения качества паяных швов.

Количество теплоты, необходимое для прогрева соединяемых деталей в месте наложения паяного шва, возрастает с увеличением их массы. Поэтому массивные детали нужно паять большим паяльником, аккумулирующим достаточное количество теплоты. Однако масса паяльника для ручной пайки ограничена (обычно 0,25—1 кг и реже до 2 кг). Паяльники большей массы неудобны в работе; в связи с этим ограничены и размеры паемых деталей. Иногда при пайке паяльником детали предварительно подогревают от других источников теплоты. Тогда и размеры паемых деталей могут быть несколько увеличены.

Паяльники чаще всего изготавливают из красной меди, имеющей хорошую теплопроводность. Медь для паяльников должна быть чистой и содержать возможно меньше примесей, особенно водорода. Такие паяльники меньше изнашиваются при пайке.

Недостаток медных паяльников — склонность к окислению при нагреве. В связи с этим появилось большое число патентов, в которых предлагаются различные способы уменьшения окисляемости паяльников при пайке. В одних патентах ориентировались на полную или частичную замену меди в паяльнике другими металлами, в других — на покрытие медных паяльников слоем металла, предохраняющим медь от окисления. Так, например, при изготовлении паяльников вместо меди предложено использовать никель или нейзильбер. Такие паяльники особенно рекомендуют для пайки припоями, содержащими цинк и сильно растворяющими медь. Применяют паяльники из малоокисляемых бронз. Для паяльников использовали также мягкое железо, но из-за недостаточно высокой теплопроводности железа оказалось удобнее применять пустотелые железные паяльники с медной сердцевинкой. В качестве металлических покрытий, предохраняющих медь от окисления и рекомендуемых для медных паяльников, применяют никель, нихром, серебро.

Химическая эрозия медного наконечника паяльника может быть уменьшена при изготовлении его из хромистой бронзы, содержащей до 1 % Cr, или бронзы, содержащей 0,1—5 % Sn и 2,5—5 % Ni. Пониженная эрозия такого сплава с жидким припоем обусловлена образованием в контакте с ним на поверхности жала паяльника прослойки интерметаллида, тормозящего процесс химической эрозии. Однако вследствие более низкой теплопроводности бронз по сравнению с чистой медью скорость процесса пайки паяльниками с такими наконечниками понижена.

При пайке паяльником флюс подается отдельно или вместе с трубчатым припоем (заполненным канифолью).

Наибольшее применение имеют паяльники молоточной и остроконечной формы. Остроконечные паяльники удобны при пайке труднодоступных мест. Большое распространение получили паяльники с круглым сечением, при котором обеспечиваются наименьшие тепловые потери и поэтому более полный переход теплоты с паяльника на паемую деталь. В рабочей части паяльники

имеют срезанную или остроконечную грань («жало») (рис. 36).

С увеличением теплопроводности металла паяемой детали и ее массы необходимо увеличивать массу паяльника. При пайке медной детали паяльник должен быть более нагрет, чем при пайке детали такой же массы, но изготовленной из стали.

Для снижения развития химической эрозии медного паяльника используют припой типа ПОС 61, легированный  $\sim 1,5\%$   $\text{Cu}$ .

При пайке электропаяльником наименьшая скорость растворения его жала в припой ПОС 61 достигается при совместном легировании меди цирконием, хромом и оловом ( $\text{Cu} + 0,15\% \text{Cr} + 0,2\% \text{Zr} + 0,54\% \text{Sn}$ ). Интенсивное растворение сплава меди происходит только в течение первых двух часов выдержки. Затем на его поверхности образуются соединения  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  и  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , тормозящие этот процесс. При низкотемпературной пайке металлов со стойкой оксидной пленкой, например алюминия, применяют специальные паяльники — ультразвуковые и абразивные, а также с вибрирующей стальной щеткой. К высокотемпературным паяльникам, обеспечивающим разогрев наконечника до  $900^\circ\text{C}$ , относятся паяльники с плазменным нагревом.

В процессе совершенствования паяльников были созданы посты с пультом управления, имеющие кроме паяльника подставки пружинного типа, механизм подачи припоя, вытяжные вентиляционные устройства, поддоны с губчатым материалом для очистки жала, устройство ступенчатого регулирования температуры и визуальной регистрации ее на цифровом дисплее [141].

Размеры отечественных паяльников и области их применения указаны в работе [56].

В электронике получили применение и развитие паяльники для распайки паяных соединений, функция которых состоит в нагреве места пайки выше температуры ликвидуса металла паяного шва и удалении полученного расплава из зазора путем отсасывания и сбора его с помощью специального устройства.

## 2. ПАЙКА НАГРЕТЫМИ ШТАМПАМИ, БЛОКАМИ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ МАТАМИ

При пайке крупногабаритных толстостенных изделий со сложной криволинейной наружной формой, с большой поверхностью спая удобен нагрев в специальных штампах. Внутренняя поверх-

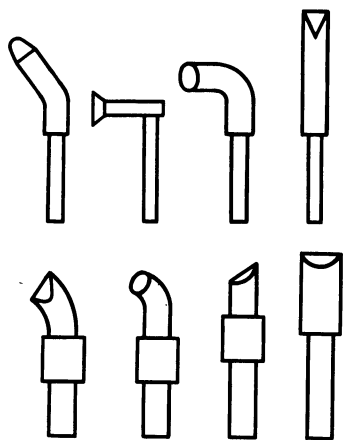


Рис. 36. Форма рабочей части паяльников

ность штампов по форме и размерам соответствует наружной форме паяемых деталей. Нагрев в штампе (например, печной) обеспечивает равномерный прижим паяемых деталей. Фольгу припоя предварительно укладывают в зазор между паяемыми деталями. Такие способы пайки были использованы, например, для соединения двух половин самолетных лопастей в их продольном сечении.

Известен способ пайки тонкостенных деталей сложной формы теплотой массивных металлических или графитовых блоков, нагреваемых в индукторе или электронагревателях. Так была осуществлена, например, пайка сильфонного узла в среде водорода графитовыми блоками [5].

При пайке однотипных деталей графитовые блоки могут быть установлены в губках электроконтактной сварочной машины.

Для пайки крупногабаритных изделий с плоской внешней формой вместо блоков удобно использовать нагревательные маты (электрообогревательные «одеяла»). Маты состоят из изолированных друг от друга нихромовых или инконелевых лент. Изоляцией служит мягкая стеклоткань из каолиновых волокон. Перед пайкой собранное изделие размещают в стальном тонкостенном вакуумируемом контейнере. Пневматический прижим паяемых деталей осуществляется с помощью плоского сварного «мешка» из стальной фольги, укрепляемого в контейнере между паяемым изделием и стенкой контейнера. При пайке «мешок» надувают под небольшим давлением аргоном.

Таким способом паяют, например, панели с сотовым наполнителем из коррозионно-стойких сталей переходного класса. Технологический процесс пайки сотовых наполнителей состоит из операции сборки, укладки в контейнер с пневматическим прижимом, вакуумирования контейнера, создания избыточного давления аргона в прижимном «мешке». Контейнер нагревают матами при 940 °С в течение 15 мин, охлаждают воздухом через верхнюю и нижнюю проточные вентиляционные камеры до 100 °С; затем охлаждение проводят жидким азотом до —62 °С в течение 3 ч; после чего материал изделия подвергается старению при 580 °С 1 ч и охлаждению до нормальной температуры.

### **3. ПАЙКА ПОГРУЖЕНИЕМ**

Нагрев паяемых деталей без доступа воздуха можно вести погружением их в расплавленные соли, припой или нагретое масло, выполняющие кроме их обычных функций также роль теплоносителя.

Нагрев паяемой детали происходит в результате теплообмена между металлом детали и жидкой средой, нагретой до рабочей температуры пайки. Скорость нагрева деталей при таком способе в 3—6 раз больше скорости нагрева этих же деталей в воздушных печах. Слой соли или припоя защищает паяемое изделие от окис-

ления при охлаждении на воздухе после того как оно вынуто из ванны.

Длительность процесса пайки в жидких расплавленных солях или припоях редко превышает 2 мин. Этот способ высокопроизводителен, так как он допускает одновременную быструю пайку большого числа деталей и легко может быть механизирован.

Большая равномерность и скорость нагрева металлических деталей в жидких средах значительно снижает рост зерен, степень обезуглероживания и т. д. Число деталей, погружаемых одновременно в ванну, ограничено объемом ванны и снижением температуры жидкой среды, происходящим в результате нагрева погружаемых деталей. Значительное преимущество пайки в соляных и флюсовых ваннах — возможность совмещения этого процесса с нагревом под закалку.

Этот способ пайки отличается высокой производительностью, а при достаточно большом отношении массы жидкой ванны к массе паемого изделия позволяет поддерживать температуру расплава с точностью до 5 °С, обеспечивая минимальные тепловые деформации паемых деталей, а следовательно, высокую точность паяного изделия.

Пайка погружением имеет следующие недостатки:

- повышенный расход электроэнергии, связанный с потерей теплоты через зеркало жидкой ванны в результате излучения и конвекционного обмена;

- создание дискомфортных условий вследствие теплоизлучения и испарения вредных для здоровья компонентов расплавов;

- необходимость устранения наплывов припоев с изделия после пайки погружением в жидкий припой и большая трудоемкость опиловочных работ;

- необходимость удаления воздушных «мешков» изделия, особенно при горизонтальном расположении зазоров;

- существенные остаточные деформации при пайке трубчатых телескопических узлов, например труб велорам;

- низкая коррозионная стойкость декоративно-защитных покрытий на изделиях, паянных погружением в расплавы солей;

- значительный расход солей (флюсов) и припоя;

- необходимость рафинирования расплавов жидких ванн от примесей.

**Пайка погружением в расплавленные соли и флюсы.** Пайка в ваннах с расплавленными солями происходит при температуре на 20—40 °С выше температуры плавления припоя. Для пайки сталей могут быть использованы ванны солей бария и хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов, применяемые обычно в термических цехах. При пайке стальных изделий латунью одновременно может быть осуществлено жидкостное цианирование и цементация.

В связи с тем, что при быстром нагреве в соляных ваннах не успевает произойти обесцинкование латуни, вместо меди в ка-

честве припоя можно использовать латунь Л62 или Л60, т. е. паять при более низких температурах, что снижает степень коробления паяемого изделия и позволяет экономить медь и электроэнергию.

При этом способе вызывает трудности укладка припоя, который при ненадежном закреплении может быть сбит движущейся жидкой средой. Кроме того, невозможна пайка изделий, в которых соль, заполнившая зазор между соединяемыми деталями, мешает заполнению его припоем. В этом случае в деталях создают дренажные отверстия для выхода воздуха и вытекания соли.

При пайке медью или латунью пользуются чаще всего соевыми смесями, состоящими из 20—30 %  $\text{NaCl}$  и 80—70 %  $\text{BaCl}_2$ . Расплав поваренной соли  $\text{NaCl}$ , применяемый иногда для этой же цели, менее удобен из-за разъедающего действия и плотных густых паров, образующихся над солевой ванной при температуре пайки.

Латунные и медные детали газовой аппаратуры, испарителей и холодильников при более низкой температуре (серебряными припоями ПСр 12М, ПСр 45 и ПСр 25) удобно паять в ванне из расплавленной соли.

При пайке стальных изделий в ваннах, содержащих 25—50 % цианистого натрия, в результате цементации и азотирования на поверхности изделий образуется тонкий твердый слой, трудно поддающийся обработке резанием. Поэтому перед пайкой в ваннах, содержащих цианистые соли, детали должны быть обработаны до точных размеров. После пайки в низкотемпературных цианистых ваннах изделие охлаждается на воздухе или в масле.

Закалка после пайки допустима только после полного затвердевания припоя, так как резкая закалка в воде деталей с незатвердевшим припоем вызывает его разбрызгивание.

Углеродистые и конструкционные стали могут быть запаяны в соляных ваннах без применения флюса, если в качестве припоя применяются медь, латунь или бронза. При пайке серебряными припоями необходимо применять флюс, содержащий некоторое количество фтористых соединений. Для этого детали перед погружением в ванну для пайки обрабатывают флюсом или погружают сначала в расплавленный флюс или в водный раствор флюса с последующей просушкой, а затем в соляную ванну. Деталь после обработки в водном растворе флюса перед опусканием в ванну следует хорошо просушить до полного удаления влаги.

Перед пайкой серебряными припоями латунных или медных деталей последние необходимо флюсовать бурой вручную или погружением их на 3—5 с в кипящий насыщенный водный раствор буры. Подобное флюсование применяют иногда и при пайке стальных деталей латунью, если подготовка поверхности недостаточно качественная и детали имеют значительную разностенность.

Изделия из черных металлов могут быть запаяны без предварительной зачистки поверхности в ваннах следующего состава

ва (%): 1) 60—70  $\text{BaCl}_2$ , 30—40 буры; 2) 50  $\text{BaCl}_2$ , 40  $\text{NaCl}$  и 10 буры; 3) 65  $\text{BaCl}_2$  и 35 борной кислоты.

Для сохранения размеров изделие при пайке закрепляют в специальных приспособлениях. Резьба в таких приспособлениях нежелательна. В некоторых случаях для этой цели используют прихватку точечной сваркой, штифтовку, керновку, расчеканку и пр. Развальцовка не всегда удобна, так как она может препятствовать затеканию припоя в зазор.

Собранное изделие перед погружением в ванну для удаления с него влаги нагревают до температуры 120—150 °С и только после этого погружают в соляную ванну, нагретую до рабочей температуры пайки.

При пайке стали медью наилучшей рабочей температурой считают 1120—1130 °С; при пайке латунью или кремнемарганцовистой бронзой 940—950 °С. При пайке медных и латунных деталей серебряными припоями ПСр 12М, ПСр 72 и ПСр 45 рекомендуют следующие температуры пайки: 830—850 °С, 835 °С и 730—780 °С соответственно.

Иногда перед полным погружением паяемого изделия в ванну необходимо нагреть место соединения до температуры расплавления припоя. Например, это целесообразно в том случае, если проволока припоя располагается снаружи у зазора и при полном погружении изделия в ванну припой может расплавиться раньше, чем место спая нагреется до температуры пайки, что приведет к стеканию его с детали. Предварительный подогрев места соединения в этом случае достигается частичным погружением собранной детали на 1—2 мин в соляную ванну таким образом, чтобы припой оставался выше уровня ванны. Когда температура соединения достигнет температуры пайки, деталь полностью погружают в ванну. Если припой в виде фольги располагается в зазоре между соединяемыми деталями, то изделие можно сразу погружать в ванну.

Паять лучше при полном погружении, чтобы подогрев изделия был равномерным и не происходило окисление части детали, не погруженной в ванну. Длительность пайки устанавливается с помощью реле времени.

В серийном производстве процесс пайки часто механизуют. Например, собранные узлы подвешивают на подвесках карусельной установки и опускают в соляную ванну с помощью пневматической педали. После пайки и остывания до температуры 200—250 °С деталь промывают в горячей воде для удаления остатков соли и затем просушивают в сушильных шкафах. Детали, подвергаемые после пайки закалке в воде, последующей промывке не подвергают.

При нагреве никеля и его сплавов в соляных ваннах необходимо следить за тем, чтобы в расплаве солей не было даже следов серы, так как никель и его сплавы склонны к образованию трещин в ее присутствии. Для удаления следов серы из расплавов солей

в ванну при температуре пайки погружают стружки или обрезки никелевого сплава (на 2 ч).

В процессе пайки соляные ванны загрязняются примесями, главным образом медью и цинком. При повышенном содержании меди в расплаве (до 0.2 %) изделие в процессе пайки может покрыться тонким налетом меди. Поэтому при систематической загрузке ванну следует подвергать очистке раз в сутки путем вычерпывания части жидкого солевого расплава и пополнения ванны чистой солью.

Вследствие чрезмерного повышения температуры ванны часто наблюдается почернение поверхности стального изделия и сильное «покраснение» латуни. При снижении температуры ванны ниже установленного предела паяные швы могут не иметь галтельных участков. При загрязнении ванны припой сворачивается в капли; поверхность стальных изделий не имеет характерного серебристого цвета.

При перепайке изделие снова травят и пассивируют в течение 4—5 с в водном растворе состава (%): 30—35 фосфорной кислоты (75 %-ной), 2 этанола, 5 бутанола, 1 гидрохинона, остальное вода. После этого следует просушка, укладка припоя, флюсование и пайка в ванне. Обычно допускается только одна перепайка.

Изделие, вынутое из ванны, покрыто тонким слоем соли, которую смывают водой. Соль расходуется не только в результате ее уноса из ванны на паяемых изделиях, но также и от угара. Угар соли за месяц работы достигает примерно 5,5 % массы соли; расход соли в результате механического уноса за 8 ч работы достигает 4—5 % массы соли. Угар солей может быть предотвращен путем засыпки на поверхность ванны слоя графита или угольного порошка. Для предохранения соли от испарения ванну накрывают крышкой с керамической подкладкой изнутри. Паяемые детали погружают в ванну через окно в крышке.

Стальные изделия, паянные в соляных ваннах медью или латунью, характеризуются хорошей прочностью и отсутствием следов перегрева.

**Пайка алюминия и его сплавов во флюсовых ваннах.** Для флюсовых ванн необходимы тигли керамические или из коррозионно-стойкой стали, никеля и его сплавов (инконеля и монеля). Все инструменты, фиксаторы и приспособления для пайки должны быть изготовлены из этих материалов во избежание загрязнения флюсовой ванны железом или медью.

При работе с флюсами тигли для ванны изготавливают из листового алюминия или сплава АМц толщиной 3—5 мм. Флюсовые ванны удобнее всего обогревать электронагревательными элементами, расположенными снаружи тигля и хорошо изолированными от действия паров флюсов. Для нагрева могут быть использованы обычные тигельные электропечи, в которые устанавливают тигель с флюсом. Флюсовые ванны должны обязательно работать под тягой.

При пайке сложных изделий, таких, как радиаторы или слоистые конструкции, припой (силумин) применяют в виде плакированного слоя. Толщина такого слоя при толщине листа больше 1,6 мм составляет 5 %, при толщине листа менее 1,6 мм — 10 % толщины паяемого металла. Зазор между соединяемыми деталями составляет 0,05—0,12 мм, но не более 0,25 мм; минимальная нахлестка не менее 6 мм или около шести толщин наиболее тонкой части паяного изделия. Для фиксации паяемых деталей могут быть применены обычные способы крепления, а также точечная сварка.

Собранное изделие перед опусканием в расплавленный флюс хорошо просушивают и подогревают в воздушной печи до  $\sim 400^\circ\text{C}$ . При этом подогрев может быть не слишком длительным (5—15 мин), чтобы не произошло сильного окисления поверхности, препятствующего растеканию припоя. Иногда из расплавленного флюса предварительно удаляют растворенные газы путем помещения расплава алюминиевым прутиком или опусканием в него алюминиевого листа. Если перемешивание флюса сопровождается шипением и выделением пузырьков газа ( $\text{H}_2$ ), перемешивание продолжают до тех пор, пока прекратятся эти явления. Затем в ванну погружают подогретую деталь. Выдержку в ванне под пайку подбирают в каждом случае опытным путем в пределах от 30 с до 3 мин в зависимости от толщины и массы изделия. Колебания температуры в ванне не должны превышать  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Оксид алюминия, оседающий на дно тигля, периодически удаляют; ванну пополняют свежими солями.

**Низкотемпературная пайка в ваннах с расплавленным припоем.** Известны две разновидности способа пайки погружением в ванны с расплавленным припоем: погружением в покоящийся жидкий припой и погружением в подвижный жидкий припой. При пайке погружением изделие должно находиться в ванне до полного прогрева его до температуры пайки и затекания припоя в зазор. При опускании в ванну плоских изделий в горизонтальном положении под ними могут образоваться пары флюса, что приводит к появлению несмоченных мест в соединении, поэтому такие изделия погружают под некоторым углом к зеркалу ванны (рис. 37).

После удаления паяного изделия из ванны не стекший с него припой удаляют химическим или механическим путем, например, металлическими вращающимися щетками или войлочными кругами, что снижает производительность такого способа. При необходимости предотвращения смачивания отдельных мест поверхности детали предварительно покрывают лаковыми, графитовыми, меловыми покрытиями или бумажными масками. Такие защитные покрытия перед пайкой просушивают, а после удаляют струей воздуха, щетками; меловые покрытия растворяются в уксусной или соляной кислоте.

При пайке погружением деталей, собранных с узкими зазорами, пригодны припои с узким или нулевым интервалом кристал-

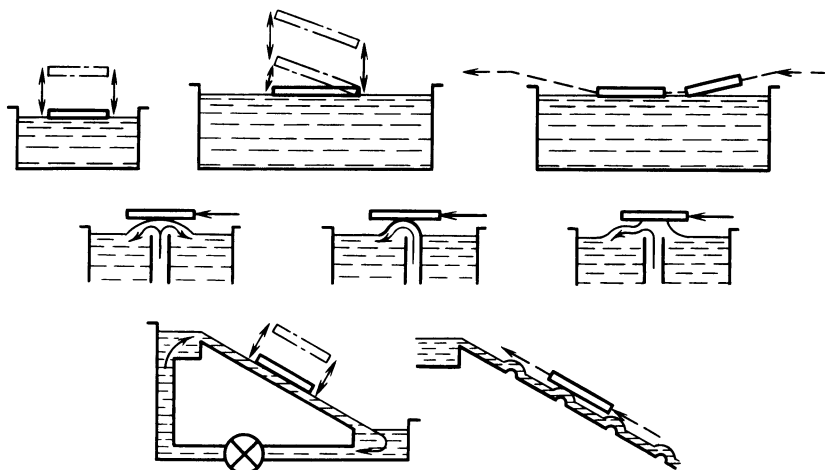


Рис. 37. Схема вариантов погружения паяемого изделия в ванну с жидким припоем под различным углом к ее зеркалу

лизации; при широких капиллярных зазорах подходят припой с более широким интервалом затвердевания, лучше удерживающиеся в них. Существенный недостаток этого способа пайки — сравнительно быстрое загрязнение жидкого припоя компонентами паяемого металла. Загрязнение припоя цинком, алюминием, кадмием ухудшает качество паяных изделий, и попадание этих металлов в ванну недопустимо.

Хотя небольшие примеси меди в припоях Sn—Pb замедляют образование оксидной пленки на поверхности зеркала ванны, с повышением содержания меди более 0,5 % в этих припоях увеличивается их температура плавления и вязкость. Загрязнение железом приводит к появлению на облуженной поверхности шероховатости и образованию темно-серых пятен.

Рафинирование ванн с оловом и оловянно-свинцовыми припоями от примесей железа проводят углем. Для этого в ванну с расплавленным припоем вводят мелкий древесный уголь и перемешивают ванну мешалкой в течение 20—30 мин. Железо, растворенное в припое, науглероживается, образуются карбиды, всплывающие на поверхность припоя, легко удаляемые деревянной лопаткой.

Для уменьшения растворения меди в ваннах с жидкими припоями рекомендуют добавлять в них в небольших количествах сурьму. Олово и оловянно-свинцовые припои рафинируют от меди с помощью серы, смеси канифоли и древесного угля и сухих чистых древесных опилок. Серу, канифоль и древесный уголь применяют в виде порошков. Для полного удаления меди из припоя в ванну вводят серу в количестве 50—100 % массы меди, содержащейся в ванне, в смеси с 70 % канифоли с древесным углем (1:3 к массе серы).

Рафинирование проводят при температуре 240—260 °С следующим образом. В ванну вводят малыми порциями серу в течение 10—15 мин при непрерывном перемешивании расплава механической мешалкой. Смесь канифоли и древесного угля вводят после всплывания на поверхность припоя сульфидов меди. Эта смесь необходима для предотвращения поверхности ванны от окисления. Затем ванну нагревают до 320—350 °С и выдерживают при этой температуре в течение 30 мин при постоянном перемешивании, после чего на поверхности ванны образуется сухой черный порошок, не смачиваемый оловом, удаляемый скребком или шумовкой. Вслед за этим поверхность ванны покрывают слоем древесных опилок, которые поджигают в нескольких местах. Толщина слоя опилок должна быть не менее 3—4 мм. После сгорания рафинирование считается законченным. Качество рафинирования контролируется последующим химическим анализом припоя на содержание меди.

При другом способе удаления меди в расплав припоя, перегретый до 900 °С, вводят алюминий и затем медленно охлаждают до температуры 400 °С. Алюминиевая фаза, плавающая на поверхности припоя, адсорбирует из него медь. При введении сплава Al—Mg с более низкой температурой плавления из ванны одновременно удаляют медь и сурьму (образуется  $Mg_3Sb_2$  с высокой температурой плавления и малой плотностью). При этом на поверхности жидкого припоя образуется слой  $Mg_3Sb_2$  и эвтектики Al—Cu; содержание меди в жидком припое понижается с 0,45 до 0,001 %, а сурьмы с 1 до 0,01 %.

В результате разности плотностей свинца и олова в ванне с оловянно-свинцовыми припоями наблюдается их ликвация. Верхние слои ванны обогащаются оловом, а нижние свинцом. Погружаемые в ванну детали обычно облуживаются и паяются в верхних слоях ванны, вследствие чего средний припой обедняется оловом и обогащается свинцом. На луженой поверхности детали может появиться шероховатость, возникающая в результате осаждения на ней кристалликов избыточного свинца. Поэтому при работе с такими ваннами необходимо постоянно их перемешивать, тщательно проверять их состав и при необходимости проводить рафинирование и корректирование состава. При необходимости в ванну вводят недостающее количество олова.

Для очистки ванны припоя Sn—Pb от скапливающихся в ней кристаллов химического соединения  $Cu_3Sn_5$  припой в ванне охлаждают до температуры  $t_{ликв} + 10$  °С; при этом кристаллы  $Cu_3Sn_5$  выпадают на дно.

По данным Т. Шинделла, при изготовлении ванн из низколегированной стали или литого железа через шесть дней работы ванны при температуре 450 °С в ее донной части на границе раздела сталь — припой образуются отдельные игольчатые хрупкие кристаллы  $FeSn_2$ . Ванны из хромоникелевой стали типа 18—8 таких интерметаллидных зон не имеют.

Технологический процесс пайки в ваннах с припоем ПОС 40 состоит из следующих операций: перед опусканием в ванну с припоем ПОС 40 облуживаемую или паяемую деталь флюсуют в водном растворе хлористого цинка и хлористого аммония состава (%): 15 хлористого цинка, 5—7 хлористого аммония, остальное — вода. При этом содержание свободной соляной кислоты во флюсе должно быть 0,6—0,8 %.

Деталь погружают в раствор флюса на требуемую глубину. Длительность флюсования 3—5 мин. Затем деталь выдерживают над ванной с флюсом 1—2 мин для стекания последнего. Перед погружением детали в ванну с жидким припоем с поверхности припоя деревянной лопаткой снимается оксидная пленка. Поверхность расплавленного припоя должна быть блестящей, с золотистым или сине-зеленым оттенком, без кристаллических сгустков или крупинок. Перед опусканием детали в ванну припой нагревают до 330—360 °С. Глубина погружения детали должна быть равна глубине разделки. Выдержка в ванне с припоем ПОС 40 составляет примерно 1 мин. Вынутую из ванны деталь выдерживают над ней 30 с для стекания лишнего припоя.

При облуживании деталей в ваннах с припоем ПОС 18 необходимо принимать меры против окисления зеркала ванны и облуживаемой поверхности при охлаждении детали на воздухе. Для этого поверхность жидкого припоя перед опусканием детали в ванну посыпают хлористым аммонием и через 2—3 мин зеркало ванны очищают деревянной лопаткой. При переворачивании детали в ванне поверхность жидкого припоя посыпают нашатырем.

Вынутую из ванны деталь встряхивают и освобождают от остатков припоя, посыпают нашатырем и быстро обтирают в горячем состоянии паклей для получения равномерного гладкого слоя полуды. Облуженная поверхность должна быть чистой, без темных и ржавых пятен, плен, пузырей и надрывов.

Собранное из облуженных деталей изделие паяют в ванне с жидким припоем в том же порядке: флюсуют в ванне с водным раствором хлористого цинка и хлористого аммония и погружают в ванну с жидким припоем. Для стряхивания лишнего припоя с изделия, вынутого из ванны, иногда применяют специальную центрифугу, в которую помещают изделие. При вращении центрифуги с частотой 1100 мин<sup>-1</sup> лишний припой отрывается от детали и оседает в специальном сборнике.

Облуженная поверхность изделия после пайки не должна иметь шероховатостей, налипания или натеков припоя. Перепайка изделия при необходимости может быть выполнена без флюса не позднее чем через 10 мин после пайки. При перепайке температура ванны должна быть в пределах 340—360 °С.

После пайки с изделия удаляют остатки флюсов промывкой в ванне с проточной горячей водой, нагретой не ниже 70 °С. Промытое изделие просушивают при температуре 100—120 °С в сушильном шкафу, оборудованном вентиляцией.

При пайке в ваннах с жидкими легкоплавкими припоями в паяном шве иногда остается флюс или оксидные пленки. В некоторых случаях наблюдается образование на изделии натеков и сосулек припоя. Эти дефекты особенно нежелательны при пайке печатных плат, так как они могут нарушать порядок соединения выводов деталей с печатными проводниками схемы. Подобных недостатков не имеет способ пайки волной или струей припоя (разновидность способа пайки погружением).

Сущность этого способа заключается в том, что пайка происходит при соприкосновении места будущего спая с припоем, фонтанирующим над поверхностью жидкой ванны. Волна или струя жидкого припоя, попадая к месту будущего спая, смывает флюс.

При этом улучшаются условия нагрева места пайки, поверхность припоя становится чистой от оксидов и загрязнений. Для предотвращения образования натеков припоя в виде мостиков и сосулек изделию при пайке сообщают некоторую вибрацию.

При пайке таким способом плату с определенной скоростью (0,7—1,2 м/мин) передвигают над поверхностью ванны. Расход припоя в ванне восполняется путем постепенного погружения питающего слитка в ванну с помощью поплавкового регулятора.

Последнее поколение машин для пайки волной припоя, появившееся в 80-х годах, отличается простотой в эксплуатации, экономичностью и высокой производительностью труда. Так, например, настольная установка с шириной волны 250—350 мм оснащена новой модульной линией для пайки, устройством для промывки, транспортной системой, устройством для обезжиривания и бесконтактной кодировочной системой, обеспечивает автоматическое управление параметрами пайки [47].

При пайке припоем с температурой плавления 200 °С жидким теплоносителем может служить силиконовое масло, нагретое до 250 °С. Масло прокачивается через трубку, припаянную к листу; припой укладывается в виде ленты над трубкой. Масло насосом подается под некоторым давлением и из трубки поступает в специальный сборник.

При пайке погружением в нагретый глицерин необходимо учитывать, что он имеет температуру вспышки 177 °С. Поэтому при его использовании выше этой температуры необходимо защищать глицериновую ванну, например, с помощью атмосферы CO<sub>2</sub> и встроенной противопожарной системой.

При пайке электросопротивлением необходимо учитывать, что глицерин снижает на 50 % поверхностное электросопротивление подложки и вследствие перегрева выделяет токсичный акромин.

#### **4. ПАЙКА С НАГРЕВОМ ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

Нагрев горячим газом нашел применение при низкотемпературной пайке печатных плат, остовов автотракторных радиаторов, выравнивании вмятин кузовов автомашин. В качестве газа

при этом способе используют воздух, аргон, сухой водяной пар и др. При пайке печатных плат от магистралей повышенного давления газ через нагревательное устройство и сопла рабочих головок попадает к местам пайки на плате, где предварительно располагают припой и флюс. Термический цикл пайки регулируется по температуре газа и скорости перемещения платы и рабочей головки.

Для пайки медно-латунных автотракторных радиаторов УАЗ-451 припоем ПОССу 30—2 в атмосфере сухого водяного пара и продуктов разложения хлористого аммония В. П. Акимовым предложена установка, состоящая из корпуса шахтного типа с расположением внутри него вертикально-замкнутого транспортирующего конвейера с кассетами, на которых размещены паяемые остовы радиаторов. Рециркуляция теплоносителя осуществляется с помощью вентилятора. Между газогенератором и вентилятором расположен узел ввода активных добавок (см. рис. 36).

При низкотемпературной пайке или лужении дефектных мест кузовов автомобилей на них после очистки наносят пасту, размягчаемую в потоке горячего воздуха в течение 15—20 с, растирая ее деревянным шпателем и придавая слою пасты требуемую форму. При этом предотвращаются термические деформации пластмассовых и резиновых деталей, смонтированных на кузове.

## 5. ЭКЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ПАЙКА

При экзотермической пайке нагрев, а иногда и образование припоя осуществляется в результате экзотермической реакции или агрегатного превращения специальных твердых, жидких или газообразных веществ. Места пайки могут быть нагреты теплотой, выделяемой в результате экзотермической реакции, протекающей между компонентами специальной экзотермической смеси, состоящей из оксида и металла. Эту смесь в зависимости от состава можно использовать только для нагрева или, если продуктами этой реакции является припой, также и для получения припоя.

Применяя в этом случае экзотермическую смесь с температурой начала реакции не выше допустимой, можно обеспечить процесс пайки изделия без ухудшения свойств паяемого металла. Экзотермические смеси применяют для дополнительного локального нагрева изделия и готового припоя по месту пайки, если металл конструкции не должен быть нагрет выше некоторой температуры.

В табл. 35 приведены примеры некоторых экзотермических смесей, применяемых для нагрева. Смесь может быть внесена при сборке в виде таблеток, пластинок или нанесена на паяемую поверхность как краска. Недостаток этого способа — сильное коробление паяемого металла при малой его толщине после нагрева теплотой экзотермической реакции.

Смесь, продукты реакции которой образуют припой, затекаю-

Т а б л и ц а 35. Экзотермические твердые смеси для нагрева при пайке

| Оксид                          | Температура начала экзотермической реакции,<br>°С, с порошком металла |     |     |     |     |     |
|--------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                | Mg  | Al  | Ti  | Zn  | B   | Fe  |
| CuO                            | 565   | 899 | 521 | 590 | 499 | 460 |
| MnO                            | 549   | 899 | —   | 560 | 582 | —   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 616   | 927 | 804 | 574 | 577 | —   |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 843   | 473 | 543 | —   | 460 | —   |

щий в зазоры, обычно состоит из порошков металлов, оксидов и галогенидов щелочных металлов и более сложна по составу. Экзотермическая пайка, например, алюминиевых проводов может быть выполнена при погружении их в расплав галогенидов тяжелых металлов [14, 15].

С. В. Лашко и В. И. Павловым показано [15], что качественная пайка алюминия в виде скруток проволоки возможна теплотой экзотермической реакции при погружении в расплавы следующих галогенидов:  $ZnCl_2$ ,  $PbCl_2$ ,  $SnCl_2$ ;  $CdCl_2$  при температуре  $\leq 450$  К;  $BiCl_2$ ,  $BiBr_3$  при температуре  $\sim 600$  К;  $PbBr_2$  при температуре  $> 700$  К.

В расплаве хлорида цинка  $ZnCl_2$ , нагретого до  $600\text{—}630^\circ\text{C}$ , возможна пайка скрутки тонких алюминиевых проводов в течение 2—21 с. За это время скрутка проводов нагревается до  $470^\circ\text{C}$  и запаивается цинком, вытесненным из хлорида цинка. Экзотермическая пайка коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т возможна таким же образом в расплаве бромида свинца при температуре  $420\text{—}450^\circ\text{C}$ .

При пайке с использованием газообразной экзотермической смеси внутри герметичного контейнера помещают собранное изделие и подают смесь горючего газа и кислорода. Содержание горючего газа должно в 3—5 раз превышать стехиометрическое. При таком варианте способа производительность труда возрастает в 10—15 раз, улучшается качество паяного шва, не нужны специальные флюсы или защитные атмосферы.

## 6. ЭЛЕКТРОЛИТНАЯ ПАЙКА

Пайка в электролитах основана на явлении нагрева катода, погруженного в электролит при прохождении через него электрического тока. Технические основы применения этого способа нагрева для целей пайки впервые подробно описаны в 1892—1896 гг. в патентах Е. Лагранжа, П. Хохо и Н. Н. Бенардоса. Они считали, что основная причина интенсивного нагрева катода при прохождении постоянного тока через электролит — высокое электрическое сопротивление оболочки из газов и паров, образующейся вокруг катода.

В нашей стране в 1949 г. И. З. Ясногородский предложил способ нагрева в электролитах для закалки стальных деталей и пайки контактов магнето. Он разработал первые машины нагрева в электролитах. В 1954 г. в Чехословакии описан опыт применения этого способа для нагрева при пайке и сварке металлов [11].

При прохождении постоянного тока через водный электролит, в который погружена нагреваемая деталь (катод) (анодом служит металлическая ванна, наполненная электролитом), наблюдаются три стадии процесса.

На первой стадии катод нагревается очень слабо, но при этом происходит электролиз водного раствора с выделением водорода на катоде. Ионы водорода и пары воды, образующие «рубашку» вокруг катода,— среда, в которой происходят явления, определяющие возможность нагрева катода до требуемой температуры.

При дальнейшем повышении напряжения электрического тока количество выделяемого водорода у катода резко возрастает. Это способствует местному разбавлению электролита и электрода, в результате чего образуются своеобразные жидкие мостики—места соприкосновения электролита с поверхностью катода. При прохождении через эти мостики тока большой плотности происходит нагрев, вскипание электролита и образование паровой фазы. Слой ионов водорода и паров воды оказывает дополнительное электрическое сопротивление: температура катода растет: электрический режим в этой стадии процесса — неустановившийся, колеблющийся (вторая стадия процесса).

При дальнейшем повышении напряжения и при достижении катодом определенной температуры между ним и окружающим тонким слоем ионов водорода и газов устанавливается стационарный электрический режим. Слой газов начинает светиться вследствие искровых разрядов между ним и катодом. Газовый слой действует как конденсатор. Ионы водорода бомбардируют катод, их кинетическая энергия вызывает сильный его нагрев (третья стадия процесса).

Температура нагрева катода в электролите может быть достаточно высокой. При электролитическом нагреве, например, достигается температура, достаточная для сварки железа с молибденом. Режим нагрева в электролитах зависит от их состава и температуры, напряжения и плотности тока и времени нагрева.

Наиболее пригодны для этого электролиты, в которых при небольших плотностях тока происходит обильное выделение водорода на катоде. В качестве электролитов используют водные растворы солей, кислот и щелочей, катионы которых находятся в начале электростатического ряда напряжений по отношению к водороду, а также растворы солей щелочных металлов, растворы кислот и щелочей, таких, как  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{HCl}$  и др.

В качестве электролита используют 10—15 %-ные водные растворы  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  при температуре 50—70 °С, обеспечивающие стабильный процесс нагрева катода и не вызывающие коррозии нагреваемых стальных деталей.

Для нагрева детали (катода) в электролите плотность тока на ее поверхности должна быть больше, чем на поверхности анода. Следовательно, поверхность нагреваемой детали (катода) должна быть несколько меньше поверхности анода. В электролитах могут нагреваться твердые проводники: сталь, чугун, латунь, алюминий, графит и т. д. На условия нагрева металлов в электролитах влияет их теплопроводность и не влияют магнитные и электрические свойства.

Для нагрева стали, алюминия и латуни необходимы достаточно большие напряжения и плотность постоянного тока, т. е. большая мощность генераторов. Так, например, для нагрева до температуры 700—800 °С стального цилиндра с поверхностью 100 см<sup>2</sup> необходим генератор постоянного тока мощностью 400 кВ·А.

При нагреве в электролитах плотность тока распределяется неравномерно, особенно при сложной форме детали, при наличии на ней острых кромок и выступающих частей, на которых плотность тока еще выше, чем в других местах. Неравномерная плотность тока на поверхности нагреваемой детали приводит к перегреву или оплавлению острых и выступающих частей. Для уменьшения плотности тока на острых кромках и выступающих частях детали их экранируют. Экран изготавливают из огнестойкого и электроизолирующего материала, например из огнеупорного кирпича. Изменяя форму экранов, можно выровнять плотность тока на поверхности нагреваемой детали. При этом нет необходимости в плотном прилегании экрана к детали: он может находиться на расстоянии 2—3 мм от нее. Экран должен примерно повторять форму экранируемой поверхности детали. Нагрев металлов в электролите сопровождается электроэрозионными процессами.

Пайка в электролите имеет преимущество перед другими способами пайки: допускает соединение разнородных металлов, оксиды которых способны восстанавливаться в среде водорода. Большая скорость нагрева при автоматизации процесса может обеспечить большую производительность труда при высоком качестве паяных соединений.

Сравнение паяемости стали Ст3 медью М1 и латунью Л63 при пайке в электролите, ТВЧ и газовом пламени (флюс-прокаленная бура) показало [3], что наилучшая растекаемость припоев имеет место в электролите, но затекание в вертикальный зазор при этом хуже. Локальный нагрев деталей при пайке в электролите может быть осуществлен с помощью разделительных экранов или струей электролита (рис. 38).

Пайка в электролите легко механизуется, осуществляется

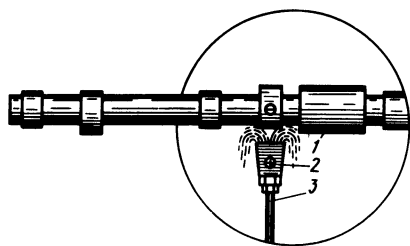


Рис. 38. Нагрев деталей с помощью струи электролита:

1 — нагреваемая деталь; 2 — электролит; 3 — трубка для электролита

без флюса, обеспечивает высокое качество соединения и производительность процесса в результате пайки нескольких из-

делий одновременно: не требует предварительной очистки паяемых деталей от масла и пыли (окалину необходимо удалять).

Близкая по производительности к электролитной индукционная пайка требует оборудования более высокой стоимости и сложного по эксплуатации и вредна по излучению. Поэтому электролитная пайка имеет преимущества для деталей из углеродистой стали простой формы и без острых выступов в местах сопряжения.

Пайку мелких деталей стержневого типа в электролите проводят на установке мощностью 10 кВт при напряжении 380 В и массе 400 кг.

## 7. ПАЙКА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕМ

Нагрев при пайке может быть в результате выделения джоулевой теплоты при прохождении электрического тока через паяемые детали. Этот способ может быть осуществлен как при прохождении тока параллельно паяемому зазору, так и перпендикулярно к нему.

Если электрический ток течет параллельно паяльному зазору и металл соединяемых деталей нагревается только теплотой от нагретого электрода, то создаются наиболее стабильные условия пайки. При этом давление на паяемые детали не оказывает особого влияния на их нагрев и может регулироваться независимо от него. При такой разновидности пайки электросопротивлением можно использовать переменный ток небольшого напряжения (2,4—10 В). Плотность тока при этом зависит от площади поперечного сечения нагреваемой детали: с увеличением площади поперечного сечения плотность тока снижается.

Нагрев паяемых деталей током, проходящим поперек паяльного зазора, происходит главным образом вследствие возникновения переходного электросопротивления на границе паяемых деталей и припоя и может быть более неравномерным и труднорегулируемым. Для такого нагрева наиболее пригоден ток малого напряжения и большой силы, получаемый, например, от сварочных трансформаторов электроконтактных машин.

Величина переходного электросопротивления при одинаковом токе и времени нагрева зависит от площади и плотности прилегания электроконтактов, а следовательно, от величины давления на

детали. После расплавления припоя переходное электросопротивление резко снижается, и дальнейший нагрев происходит за счет электросопротивления материала деталей и жидкого припоя (для металлов возрастающего с повышением температуры). Пайку электросопротивлением поперек паяльного зазора удобно проводить на точечных, роликовых или стыковых сварочных машинах или небольших сварочных аппаратах типа настольных щипцов, состоящих из трансформатора, к вторичной цепи которого подключены электроды, соединенные с сжимающими устройствами, включаемыми при пайке вручную или автоматически.

Выбор материала электродов определяется рядом факторов: материалом паяемых деталей, их сечением, величиной переходного сопротивления паяемого металла и требуемого давления на электроды. Для медных деталей малого сечения применяют электроды из графита: для пайки нелегированных сталей с повышенным электросопротивлением — электроды из меди, жаростойкой стали.

При использовании графитовых электродов, вследствие их относительной хрупкости, необходим более слабый прижим места пайки. При нагреве деталей одинаковой толщины, но из материалов с разными физическими свойствами используют электроды с хорошей теплопроводностью и высокой температурой плавления, а при различной толщине и одинаковых физических свойствах со стороны более тонкой детали устанавливают электрод с более высоким электросопротивлением. Для повышения долговечности электродов на их поверхности напыляют слой хрома или молибдена (Заявка 57-181778 Япония, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 11/00). При пайке в электроклещах угольные электроды для ограничения их чрезмерного расхода металлизуют слоем хромистой стали.

При нагреве деталей из металлов с различной теплопроводностью и электрической проводимостью, особенно в труднодоступных местах, пайку можно проводить, подводя электрический ток к графитовой пластине и установив на нее паяемое изделие. Обжим места спая возможен специальными прижимами, не включенными в общую электрическую цепь. Схема расположения электродов, паяемых деталей и припоя дана на рис. 39. К недостаткам способа следует отнести возможность перегрева контактирующих поверхностей массивных деталей, например медных массивных проводников, вследствие чего происходит неравномерный нагрев паяемого соединения: возникает нестабильность контакта электрод — деталь, трудности в воспроизведении постоянного режима, неравномерности в подводе теплоты, из-за прерывистого включения источника питания для предотвращения перегрева угольных электродов.

Наиболее удобно применять припой в виде проволоки, так как фольга, уложенная в зазор, может пружинить и не обеспечивает надежного электроконтакта при прохождении тока. При достаточном прижме между соединяемыми деталями укладывают

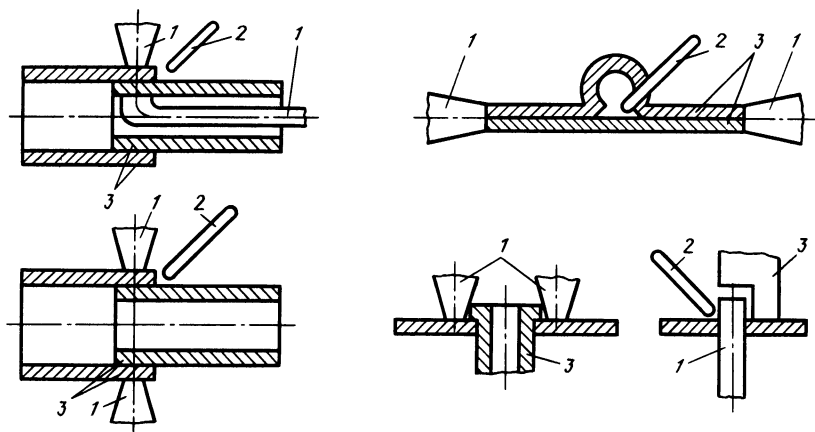


Рис. 39. Схема расположения электродов (1), припоя (2) и паяемых деталей (3) при пайке электросопротивлением

припой, покрытый флюсом, или используют паяемый металл, плакированный припоем, который покрывают флюсом. Для увеличения переходного электросопротивления при пайке металла, покрытого припоем, между деталями укладывают пористый металлический вкладыш и сжимают их осевым давлением (Пат. 52—5015 Япония, МКИ<sup>3</sup>, кл. 12 В 24 (В 23 К 1/02)).

Возможна пайка на электроконтактных сварочных машинах после предварительного прессования места пайки. Затем через место пайки пропускается ток, и происходит локальный нагрев и пайка. Этот способ нашел применение при соединении деталей больших сечений внахлестку и необходимости быстрого нагрева места пайки.

Солевые флюсы, применяемые при пайке тугоплавкими припоями, являются в твердом виде диэлектриками. Поэтому при пайке, если ток протекает перпендикулярно к плоскости спая, флюс наносят в виде водного или спиртового раствора, проводящего ток. Раствор флюса нужно наносить непосредственно перед пайкой, чтобы растворитель не успел испариться до начала прохождения тока.

При пайке между медными электродами электроконтактных сварочных машин соединяемые детали не должны сильно отличаться по своим теплофизическим свойствам, иначе место нагрева при прохождении тока может переместиться из места контакта в одну из них или в электрод. Подобные затруднения возникают и при различной толщине паяемых деталей и пайке конструктивно сложных изделий, таких, например, как провода в штепсельные разъемы, кольца роторов, статорной обмотки и т. д.

Электроконтактную пайку в угольных электродах, вставляемых в медные электроды контактной машины, выполняют следующим образом. В зазор между деталями с подготовленной под пайку

поверхностью помещают фольгу припоя, предварительно смазанную раствором флюса. Боковые поверхности угольных электродов смазывают раствором буры, чтобы уменьшить их сгорание. Попадание флюса на поверхность электродов, соприкасающуюся с деталями, нежелательно, и поэтому количество флюса, наносимого на детали, должно быть минимальным.

При большом различии размеров или теплофизических свойств деталей необходим дополнительный подогрев более теплоемкой детали.

Изготовлены машины для пайки электросопротивлением с регулируемой температурой и возможностью автоматического поддержания параметров в течение 1,5—10 с. Мощность таких машин 2 и 5 кВт. На них паяют термостаты, детали измерительных приборов, мембраны и арматуру точных механических устройств, переключателей, штепселей, твердосплавного инструмента, оптических приборов и др. При монтаже интегральных схем и микроминиатюрных контактных деталей находит применение импульсная пайка легкоплавким припоем.

Электроконтактная пайка технологически проще диффузионной сварки в вакууме.

## 8. КОНДЕНСАЦИОННАЯ ПАЙКА

Одним из способов пайки по источнику нагрева для очень теплочувствительных миниатюрных приборов электроники является конденсационная пайка (Пат. 4373658 США, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 3/00 F 27 D 7/02 НКИ 228/242), при которой нагрев деталей происходит в результате выделения скрытой теплоты конденсации [35].

На рис. 40 приведена одна из схем установки, в которой происходит конденсационная пайка. На дно установки заливают специальную жидкость с низкой температурой испарения, которая быстро испаряется. Жидкость химически инертна по отношению к материалам, контактирующим с ней, и химически стабильна (не разлагается) при пайке. Количество теплоты, выделяемой при конденсации паров жидкости на поверхности деталей, достаточно для расплавления припоя, но недостаточно для ухудшения свойств паемого материала. Жидкость не имеет запаха, нетоксична и не воспламеняется при пайке; плотнее воздуха и не вытекает из

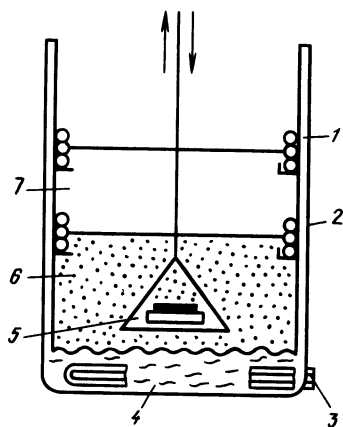


Рис. 40. Схема установки для конденсационной пайки:

1 — вторичный «змеевик», 2 — первичный змеевик; 3 — иммерсионный нагреватель; 4 — испаряющаяся жидкость; 5 — паемое изделие; 6 — рабочая зона пайки; 7 — верхний паровой слой

камеры пайки, имеет ту же температуру, что и кипящая жидкость.

Специальной жидкостью с такими свойствами является химическое вещество перфтортриамиламин (флюоринерт<sup>1</sup> FC-70). Температура кипения и конденсации этой жидкости  $\sim 215^\circ\text{C}$ , и поэтому в ее парах (рабочий пар) возможна пайка припоем 55—80 % Sn и Pb — остальное, а также припоями 62 % Sn — 36 % Pb — 2 % Ag; 80 % Sn — 20 % Pb.

Нагрев паяемых деталей происходит быстро, без изменения их размеров и формы. Простые мелкие детали нагреваются за 10—15 с, а массивные (до 10 кг) за 30—90 с.

Размер зоны пайки с рабочим паром по высоте фиксируется расположением охлаждающего змеевика, конденсирующего пар на заданном уровне.

Для снижения потерь рабочего пара FC-70 в результате диффузии или конвекции над зоной пайки располагают пар другого инертного вещества — трихлоротрифлуоретана (R 113) с температурой плавления  $88^\circ\text{C}$  и более низкой плотностью, чем рабочий пар. В зоне пайки содержание воздуха настолько мало, что окисление паяемого материала не происходит. Однако при необходимости возможна пайка с достаточно легкоплавким паяльным флюсом. В слой рабочего пара могут диффундировать незначительные количества пара верхнего слоя.

Верхний слой вещества R 113 необходим не только для фиксации рабочей зоны пайки, но также для регулирования ее температуры и защиты от потерь дорогостоящей жидкости FC-70.

При конденсационном (парофазном) нагреве припой и флюс при сборке размещают на паяемом материале. При погружении паяемого металла в паровую подушку над кипящей жидкостью пар конденсируется на поверхности холодного паяемого металла, благодаря чему припой быстро и равномерно нагревается до температуры пайки.

В процессе пайки паяемые детали после сушки нанесенного флюса помещают на подставку и опускают в зону пайки, а затем перемещают в верхнюю защитную зону, в которой первоначально конденсированная жидкость FC-70 испаряется с поверхности паяного изделия. Таким образом осушается изделие перед выемом его из установки.

Если сконденсированный жидкий теплоноситель, применяемый при конденсационной пайке, содержит канифольный флюс, то его из поддона установки (под паяемым узлом) отводят в фильтр грубой очистки, оттуда предварительно очищенный жидкий теплоноситель с температурой  $88^\circ\text{C}$  поступает и охлаждается в теплообменнике (до  $21^\circ\text{C}$ ), затем проходит фильтр тонкой очистки, подогреватель (до  $215^\circ\text{C}$ ) и возвращается в нижнюю часть резервуара установки, где нагревается до температуры кипения.

---

<sup>1</sup> Фторированный углерод.

Возможна также пайка насыщенным паром, подаваемым под давлением  $0,213 \cdot 10^{-4}$  Па. В этом случае изделие помещают в специальную емкость («беседку») с конической крышкой, имеющей отверстие по периферии конуса общей площадью в 2 раза большей площади входного отверстия для пара. В этих условиях нагрев происходит за 1 с, цикл нагрева 14 с. Часть пара обтекает «беседку» снаружи, изолируя ее от холодных стенок емкости (Пат. 4403949 США, МКИ<sup>3</sup> F 24 N 7/00, F 278 9/00).

К преимуществам конденсационной пайки относится та ее особенность, что независимо от размеров и формы любая поверхность паяемых деталей, покрытая конденсатом паров, нагревается одновременно. В связи с этим отпадает необходимость в отражателях или экранах, требуется минимум флюса, обеспечивается стабильное качество изделия. Стоимость пайки по такому способу на 50 % ниже, чем печной, а производительность ее на 300 % выше.

В настоящее время изготовлены полностью автоматизированные установки, пригодные для встраивания в конвейер.

Способ был первоначально разработан для пайки штырей под накрутку к многослойным платам.

Конденсационная пайка нашла применение для пайки печатных плат, штепсельных разъемов, токопроводников, видеотерминальных узлов, ускорителей электронов в медицинских аппаратах для облучения раковых опухолей. Пайка таких соединений паяльником ухудшает их свойства.

## 9. ПАЙКА СВЕТОВЫМ ЛУЧОМ

Нагрев сфокусированным световым лучом обладает важными для пайки особенностями: бесконтактностью подвода энергии к паяемому металлу, поэтому источник теплоты и нагреваемую деталь можно располагать на значительном расстоянии; возможностью нагрева металлов независимо от их электрических и магнитных свойств и легкостью его регулирования и управления: проведением процесса через прозрачные контейнеры в контролируемой атмосфере и в вакууме, а при достаточном расстоянии между источником и деталью — на воздухе с флюсом. При таком нагреве осуществим визуальный контроль процесса пайки.

В качестве источника лучистой энергии используют мощные дуговые ксеноновые лампы ДСКР3000, ДСКР5000 и ДСКР20000 и менее мощные кварцевые лампы (иодные или галогенидные) КД220-1000, КД212-1000. Оптическая система концентратора состоит из эллиптического зеркала и отражателя, контротражателя и конденсатора (рис. 41). Применяют точечные или щелевые излучатели. Диаметр пятна нагрева 4—15 мм.

При бесфлюсовой пайке может быть применена общая защита от окисления в потоке инертного, активного газов или в вакууме, а

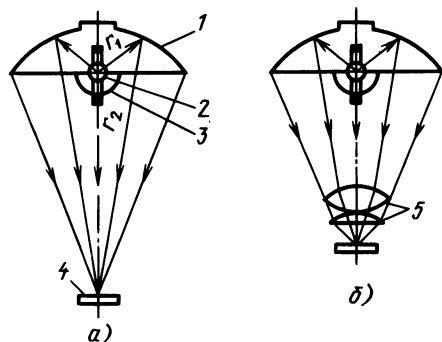


Рис. 41. Оптическая система концентратора при пайке световым лучом:

*a* — моноэллипсоидная; *б* — моноэллипсоидная с линзовым конденсором; 1 — отражатель; 2 — ксеноновая лампа; 3 — контрольный отражатель; 4 — нагреваемый объект; 5 — конденсор

также местная защита — в потоке инертного газа, поступающего к месту нагрева через кольцевое сопло.

Перед пайкой в камере припой вводят предварительно в зазор или укладывают у зазора; возможна механическая подача припоя.

При флюсовой пайке с нагревом фокусированным световым лучом необходимо удаление нагреваемого объекта от отражателя примерно на 250—200 мм, так как пары припоя могут повредить оптическую систему установки. При пайке с местным нагревом деталей с разной толщиной стенки сначала нагревают деталь большей массы.

## 10. ПАЙКА ИНФРАКРАСНЫМИ ЛУЧАМИ

Пайка инфракрасными лучами предложена впервые в 60-х годах и успешно используется в промышленности. В качестве источника излучения нашли применение галогенокварцевые лампы.

Тепловое или инфракрасное излучение с длиной электромагнитных волн  $0,8 \cdot 10^{-3}—0,8$  м используют для локального нагрева при пайке, но чаще всего для общего нагрева. Применяют иодные лампы накаливания, наполненные аргоном под давлением 798 Па и парами иода (1—2 мг).

Для концентрированного нагрева небольших участков используют малогабаритные лампы типа КИМ (масса лампы 3,5 г), работающие в любом пространственном положении. Эти лампы наполнены ксеноном под остаточным давлением 0,86 МПа с иодным наполнителем (0,1—0,2 мг).

Для наиболее полного использования мощности ламп применяют водоохлаждаемые рефлекторы из коррозионной стали, рабочая поверхность которых покрыта серебром или чистым алюминием.

При этом необходимо учитывать неблагоприятные воздействия паров легкоиспаряющихся компонентов припоев и флюсов, вследствие чего ресурс ламп может сокращаться из-за помутнения зеркала рефлекторов и кварцевых колб ламп (при нагреве выше 1000 °С). По этой же причине недопустимо на поверхность рефлектора стекание излишков жидкого флюса, который необходимо для этого строго дозировать.

Для высокотемпературной пайки (ниже 1000 °С) тонкостенных изделий относительно простой формы используют специальные установки с набором кварцевых ламп, например, типа УПТ. Нагрев паяемого изделия в тонкостенном стальном контейнере возможен одновременно с одной или нескольких сторон.

## 11. ПАЙКА ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

Процесс нагрева электронным лучом основан на использовании кинетической энергии электронов, быстро движущихся в глубоком вакууме. Сжатый в магнитных и электростатических фокусирующих линзах поток электронов перемещается с большой скоростью от катода к аноду в сильном электрическом поле. Кинетическая энергия соударения электронов с поверхностью детали анода превращается в тепловую, что приводит к ее нагреву.

Нагрев под пайку электронным лучом осуществляют в специальных вакуумных камерах ( $1,33 \cdot 10^{-2} — 1,33 \cdot 10^{-4}$  Па). Электронный пучок образуется в результате эмиссии электронов с нагретого катода. Для пайки обычно применяют сканирующий или расфокусированный пучок электронов.

Существенные недостатки способа — сложность установок из-за наличия вакуума и управляющих устройств высокой точности, их высокая стоимость, а также низкая производительность процесса пайки. Таким способом, например, паяют теплообменники с трубной доской из коррозионно-стойкой стали никелевыми или  $\text{Cu—Ni—Mn}$  припоем ВПр-2.

Отсутствие тепловой инерционности при этом способе пайки обеспечивает возможность точно управлять процессом нагрева в автоматическом режиме.

Сканирующим электронным лучом осуществлена, например, пайка стальных теплообменников с трубной доской, при которой нагревается лишь трубная доска и концы вертикально расположенных трубок и поэтому предотвращается перетекание припоя в межтрубную полость. При этом пайку ведут на электронно-лучевых установках типа ЭЛН-11 в вакууме с остаточным давлением  $6,65 \cdot 10^{-3}$  Па и размерами рабочей камеры  $1340 \times 2200 \times 900$  мм. Мощность установки 30 кВт. При пайке электронный луч через отверстие в аноде направляется в лучепровод. Электронный сфокусированный луч используют также при ремонтных работах. Плотность энергии в точке фокусирования до  $18 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> [37].

## 12. ПАЙКА ЛАЗЕРОМ

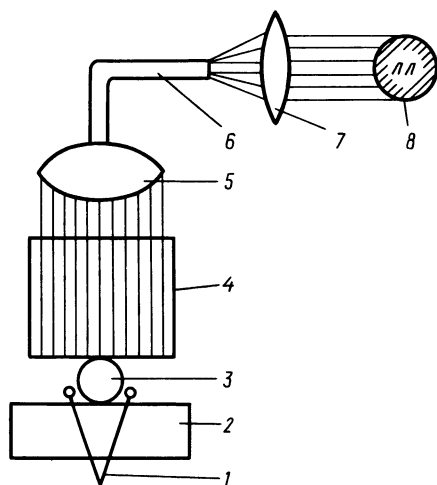
Световой поток оптического квантового генератора (ОКГ) — электромагнитное излучение высокой интенсивности. В лазерах, применяемых для технологических целей, диапазон длины волн составляет обычно 0,4—10,6 мкм.

Нагрев лазером особенно эффективен при пайке материалов, обладающих высокой чувствительностью к перегреву. Важнейшие его преимущества — локальный концентрированный нагрев и точное дозирование тепловой энергии.

При лазерной пайке происходит локальный равномерный нагрев припоя без перегрева. Скорость нагрева паяемого материала достигает  $10^{10}$  °C/с, скорость охлаждения после пайки —  $10^6$  °C/с при градиенте температуры  $10^6$  °C/см, что обеспечивает минимальное нарушение состояния основного материала рядом с паяным швом и высокую степень неравномерности структуры шва. В этих условиях в шве образуется частично или полностью аморфная структура твердых растворов. Все это способствует повышению механических свойств паяного соединения [57].

При пайке фокус светового потока располагается несколько выше места соединения. При этом формируется кольцевая зона с более высокой концентрацией энергии, что позволяет интенсивно нагревать паяемый участок, сохраняя изделие достаточно холодным (Пат. 53-10937 Япония, МКИ<sup>3</sup> кл. 12 В2/В 23 К 3/00).

Лазерная установка (рис. 42) состоит из источника лазерной энергии, двух конденсаторных линз, световода и цилиндра, ограничивающего площадь нагрева. Например, антенный провод паяется к пластине прибора по следующей схеме: на пластину 2 кладут провод 3, с двух сторон от него по кусочку припоя 1; на припой и провод ставят ограничивающий цилиндр 4. Лазерный луч из источника 8 проходит первую конденсационную линзу 7 и уменьшается в диаметре до диаметра стекловолокна 6. Пройдя по стекловолокну и изменив направление на 90°, лазерный луч проходит через вторую конденсационную линзу 5, увеличивающую его диаметр до внутреннего диаметра ограничивающего цилиндра (Заявка 58-110172 Япония, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 3/04, В 23 К 26/00).



При пайке конструктивно сложных изделий используют устройства, в которых луч лазера после выхода из генератора с помощью составной линзы разделяется на несколько лучей, каждый из которых по стекловолокну 6 подается на свою фокусирующую линзу и фокусируется ею на припой и слой флюса, уложенные предварительно на плоском зажиме

Рис. 42. Схема пайки провода лазерным лучом

(Заявка 58-205675 Япония, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 3/04, В 23 К 26/00). Преимущество лазерного излучения состоит в возможности легкой его фокусировки простыми оптическими схемами. Лазерное излучение проникает сквозь прозрачные вещества (стекло, кварц и др.) и может быть непосредственно направлено к месту пайки изделия, находящегося в изолированном, например стеклянном, конвейере, наполненном аргоном, или вакуумированном до требуемой степени остаточного давления. Наиболее целесообразна пайка лазером разнотолщинных деталей при соотношении толщин 1:50 и более, особенно если массивная деталь изготовлена из более легкоплавкого металла.

Существенным недостатком этого способа является нестабильность выходных энергетических характеристик лазера, обусловленная пространственной и временной неоднородностью лазерного излучения. Это связано с тем, что генерация излучения происходит не по всему сечению кристалла, а в отдельных его участках и вызывает появление в зоне нагрева так называемой мозаичной структуры и резкой неравномерности распределения температуры в пятне. Для управления интенсивностью лазерного излучения изменяют длительность воздействия, площадь пятна нагрева (фокального пятна), выходную энергию.

Для лазерной пайки используют мягкий нагрев путем увеличения длительности излучения при постоянной энергии или изменения энергии в фокальном пятне. Удовлетворительные результаты получены при пайке импульсами с малой частотой повторений лазера в режиме ТЕМ-мод с расфокусированным лучом, наведенным на предварительно нанесенный припой [57].

Применение Nd-лазера более рационально, чем СО-лазера, из-за меньшей длины световой волны, что упрощает фокусирование светового луча. Лазерная техника в сочетании с микропроцессорами позволяет автоматизировать процесс пайки, улучшить качество соединения и снизить себестоимость продукции.

При низкотемпературной пайке лазером детали, подлежащие пайке, предварительно нагревают, например на плите. Температура нагрева детали близка к температуре плавления припоя. Лазерный луч фокусируется только в участках размещения припоя. При этом экономится энергия основного источника, так как она расходуется только на расплавление припоя: снижается мощность источника, предотвращается тепловое повреждение паяемого материала (Заявка 54-2983 Япония, МКИ<sup>3</sup> кл. 13(7) D61/23C 13/C4).

Преимущества пайки лазером проявляются при пайке малых деталей, когда необходим кратковременный нагрев, точное позиционирование, локальный подвод теплоты, или в случае труднодоступности места пайки. Область применения — очень мелкие конденсаторы, элементы печатных плат, бумажные конденсаторы, токопроводящие пластины, токоприемники на цоколе лампы, соединения контактов интегральных схем и др.

Исследована возможность лазерной пайки следующих сплавов: коррозионно-стойких сталей, углеродистой стали, никелевых и медных сплавов (монеля, ковара), алюминия, чугуна, молибдена, титана и др. при толщине материала 0,025—0,31 мм с использованием стандартных припоев: серебряных типа ПСр 40, ПСр 45, ПСр 72, припоев систем Ag — Cu — Sn, Ni — 7 % Cr — 3,2 % В — 4,5 % Si — 3 % Fe, меди М1, Au — 18 % Ni, Al — 7 % Si (в виде порошка или фольги). Для пайки использованы Nd-*yaG*-пульсирующие лазеры с длиной волны 1,06 мм, мощностью 50—400 Вт, с пульсацией 1—200 пульс/с. Диаметр расфокусированного пятна 0,05—3 мм. Плотность энергии при пайке порядка 6,79—28,30·10<sup>4</sup> Дж/м<sup>3</sup>. Толщина паяемого материала 0,025—0,31 мм.

Пайка лазером — дорогой способ. Тем не менее чрезвычайно высокая скорость нагрева и возможность управления процессом посредством компьютера делают его применение при пайке большого числа идентичных мелких деталей весьма перспективным. Лазерная пайка выполняется под микроскопом в чрезвычайно тонком поперечном сечении. Наиболее удобно использовать этот способ в вакууме или в защитных и инертных атмосферах или активных газах в смеси с аргоном или гелием. Применение флюсов и легкоиспаряющихся связок паст нежелательно.

### 13. ГАЗОПЛАМЕННАЯ ПАЙКА

Теплота, сообщаемая паяльником при пайке легкоплавкими припоями толстостенных или крупногабаритных деталей или при пайке припоями с температурой пайки 400 °С мелких деталей, недостаточна для расплавления припоя и подогрева детали. В этих случаях получил применение местный нагрев теплотой, выделяемой при сгорании смесей газообразного или парообразного топлива с воздухом или кислородом.

При пайке соединяемые кромки основного металла только подогревают до температуры плавления припоя, и поэтому нет необходимости в концентрированном интенсивном их нагреве.

Для низкотемпературной пайки используют бытовой газ.

При пайке изделий небольшого размера со среднеплавкими припоями применяют паяльные лампы. Паяльные лампы работают главным образом на жидком топливе (керосине, бензине, спирте), а также на сжиженных нефтяных газах (бутане, пропане).

Ручную пайку деталей с нагревом пламенем паяльной лампы выполняют следующим образом. Место спая покрывают флюсом и подогревают до тех пор, пока прутки припоя при проведении вдоль места спая не начнет плавиться. Процесс пайки происходит при непрерывном подводе флюса и припоя.

После расплавления припоя при соприкосновении с деталью, заполнения зазора и образования галтельного участка паяного шва с обратной стороны нахлестки нагрев изделия прекращают.

При нагреве припой должен плавиться только при соприкосновении с паяемым изделием, так как иначе припой может попасть на недостаточно подогретую поверхность и не затечь в зазор. После образования галтельного участка паяного шва не следует снова подогреть шов для улучшения его вида, чтобы не перегреть основной металл и не вызвать образования пор в шве.

Среди горелок с невысокой температурой пламени необходимо отметить горелку Бунзена, из которой горючий газ вытекает через тонкое отверстие (0,1—1 мм) с очень большой скоростью. Температура пламени бензиновой горелки 1100—1200 °С. Для пайки среднеплавкими припоями с температурой плавления до 800 °С используют пропан: для пайки припоями с температурой плавления выше 800 °С необходимы горелки, работающие на ацетилене или смеси кислорода с водородом. При этом характер горения смеси ацетилена с воздухом можно регулировать путем добавления в него паров бензина, спирта, ацетона и других углеводородных соединений [6].

При пайке кислородно-ацетиленовыми горелками нагрев осуществляют обычно более холодным наружным пламенем. При избытке кислорода в газовой смеси пламя становится окислительным, при избытке горючего газа — восстановительным. Для получения нормального пламени смесь должна содержать горючий газ и кислород в определенном соотношении, различном для разных газов.

Нагрев незащищенных металлов перед пайкой приводит к значительному окислению их поверхности. Поэтому, как правило, при пайке горелками флюс наносят на паяемую деталь еще до подогрева, чтобы создать флюсовую защиту металла от окисления.

Нагрев при пайке ведут быстро, чтобы испарение растворителя (воды или спирта) произошло непосредственно при расплавлении флюса. Нагревают в первую очередь более массивную деталь или деталь с большей теплопроводностью.

При пайке припоями, содержащими цинк (например, Л63), при пайке пламенем ацетиленовой горелки необходимо окислительное пламя с избытком кислорода или воздуха для уменьшения испарения цинка и предотвращения недопустимого насыщения припоя водородом. Пайку припоями без цинка производят слегка восстановительным пламенем с избытком горючего газа. При длительности газопламенной пайки в ацетиленовом пламени свыше 3 мин и увеличении времени пайки до 5 мин флюс с поверхности паяного соединения удаляется с трудом. Для предотвращения развития водородной болезни металла шва из-за насыщения его водородом пламени при пайке нельзя применять в качестве припоя кислородсодержащую медь.

Ацетиленокислородное пламя взаимодействует с хлоридными флюсами для пайки, снижая их флюсующие свойства. Поэтому пайку с такими флюсами проводят бензиновоздушным или про-

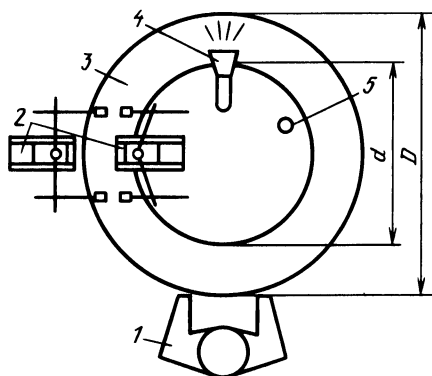


Рис. 43. Схема паяльной машины для газопламенной пайки:

1 — рабочее место; 2 — зона горелок; 3 — вращающийся стол, 4 — устройство для принудительного воздушного охлаждения; 5 — съемник детали

пановоздушным пламенем. Для газопламенной пайки используют специальные рельсовые, карусельные и конвейерные паяльные машины (рис. 43). Для пайки симметричных и несимметричных изделий большой высоты используют автоматы с продольным или круглым столом диаметром 0,5—2,5 м и частотой вращения  $0,02\text{--}2\text{ мин}^{-1}$ . Детали, подвергнутые автоматизированной пайке, для предотвращения образования трещин в шве не должны подвергаться вибрации при прохождении зоны нагрева.

Характер газового пламени выбирают в зависимости от состава паяемого материала. Медь, бронзы, латуни, инконель, железо, различные стали и никель, медные сплавы паяют слегка в восстановительном пламени: железо, различные стали, монель, никель и никель-медные стали можно паять также в нейтральном пламени.

Для пайки с газопламенным нагревом получают распространение аппаратура для получения водородно-кислородной смеси электролитическим разложением воды. Такие аппараты состоят из электролизера с нелинейным сопротивлением.

## 14. ПАЙКА В ПЕЧАХ

Нагрев в печах при пайке металлов и сплавов известен давно, но только с применением в промышленности электрических печей этот способ получил особенно широкое распространение. При пайке в электропечах нагрев поддается контролю и регулировке и может быть легко механизирован. Высокотемпературная пайка в печах — наиболее производительный процесс из всех известных способов пайки по нагреву и пригодна как для простых, так и конструктивно сложных изделий.

Без флюса возможна пайка конструктивно более сложных изделий и с большей размерной точностью.

При пайке в печах собранное под пайку изделие должно быть закреплено, детали, подвергаемые пайке, прижаты: все изделие устанавливают на специальные подставки, обеспечивающие равномерность температурного поля, предотвращающие попадание жидкого припоя и флюса на под печи и нагревательные элементы.

При пайке с флюсами во избежание их действия на электро-

нагревательные элементы необходимо применять печи с глухим керамическим муфелем. Печи должны быть установлены под тягой.

При пайке в печах изделий из материалов с малой сопротивляемостью ползучести при выбранном термическом цикле пайки необходима поддерживающая оснастка, изготовленная из теплопрочных при пайке материалов и с коэффициентом линейного расширения и конструкцией, не вызывающих появления напряжений в соединениях. Материал оснастки должен иметь температурный коэффициент линейного расширения, меньший, чем у паяемого металла. Для транспортировки собранного изделия в печь и из печи необходимы поддоны. Они должны обеспечивать равномерность нагрева соединяемых деталей и предотвращать их смещение при загрузке.

Вся оснастка для пайки в печи должна быть изготовлена из материалов, способных многократно выдерживать термический цикл пайки и не вступать в контактно-реактивное плавление с паяемым металлом и не взаимодействовать с флюсами. Резьба в прижимных приспособлениях должна иметь подвижную посадку для облегчения свинчивания гаек после пайки. Ленточные и проволочные опоры лучше изготавливать из нихрома (80 % Ni — 20 % Cr) и коррозионно-стойкой стали типа 18—8, а при флюсовой пайке — из инконеля.

Сборочные приспособления при пайке в печи должны обеспечивать геометрические размеры изделия, быть изготовлены из материала с высокой теплопроводностью, выдерживать многократные теплосмены. В качестве материала для приспособлений применяют жаростойкие сплавы и графит. Когда контакт паяемого материала с графитом физико-химически противопоказан из-за вероятности контактно-реактивного их плавления (например, при пайке титана), то используют графит, покрытый нитридом бора (толщина покрытия 0,5—2 мм).

При пайке в печах припой размещают в виде колец из проволок или лент вблизи зазора у технологических стенок. Следует учитывать, что при нагреве длина проволоки или ленты припоя увеличивается, что может привести к их короблению. Поэтому при наружном расположении припоя его необходимо размещать в виде отдельных кусков длиной не более 150 мм, уложенных один на другой. Если припой укладывают внутри зазора, то он может иметь любую длину и форму. Перед пайкой в печи припой необходимо надежно закрепить, чтобы он не сдвигался от толчков при загрузке в печь. Весьма существенно, чтобы перепад температуры в рабочем пространстве печи, занимаемом изделием, не выходил за пределы температурного интервала пайки. Для этого удобен секционный нагрев печи с хорошо отрегулированными градуированными терморегулирующими устройствами.

Пневматическую подушку для прижима паяемых деталей изготавливают из листовой стали (0,7—1 мм), лучше коррозионно-стойкой. Для этого два куска листа одинаковой формы накладывают

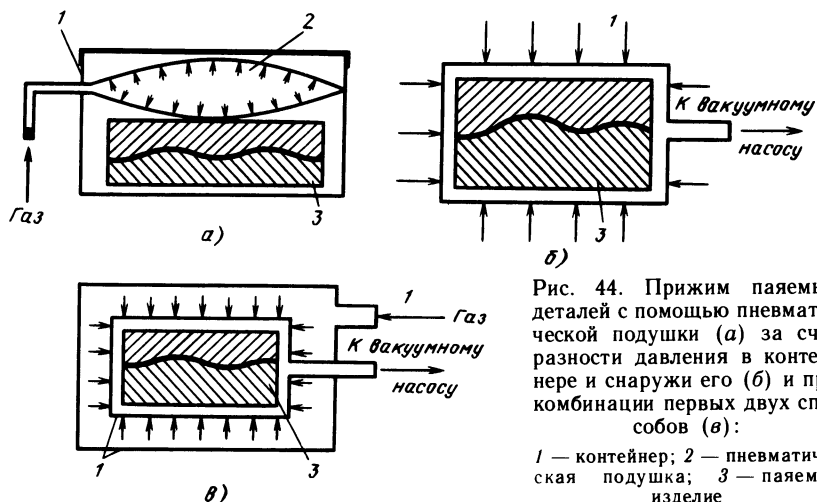


Рис. 44. Прижим паяемых деталей с помощью пневматической подушки (а) за счет разности давления в контейнере и снаружи его (б) и при комбинации первых двух способов (в):  
1 — контейнер; 2 — пневматическая подушка; 3 — паяемое изделие

один на другой и сваривают по краям роликовой сваркой. При давлении газа, подаваемого через трубку, вваренную в подушку, последняя раздувается и при упоре в стенки контейнера прижимает изделие (рис. 44).

При пневматическом прижиме паяемое изделие помещают в тонкостенный контейнер, по возможности облегающий изделие. При откачке воздуха из контейнера, вследствие разности давлений воздуха, внутри него и снаружи осуществляется прижим паяемых деталей стенками контейнера.

Контейнер может не облегать паяемое изделие: в этом случае между его стенками и изделием засыпают термостойкий сыпучий материал, например термостойкий корунд, через который и передается давление от стенок контейнера на паяемые детали. Давление на стенки контейнера может быть создано приложением внешнего давления. Для этого контейнер с изделием помещают в другой толстостенный контейнер (например, трубчатой формы), в который подают под давлением газ.

Процесс флюсовой печной пайки начинается с загрузки собранного и установленного на поддон изделия в печь, предварительно подогретую до температуры пайки или несколько выше. Длительность выдержки в печи зависит от максимальной толщины стенки деталей изделия и его массы, размеров и массы приспособления и часто определяется экспериментально. Время выдержки при пайке отсчитывается с момента нагрева изделия до температуры пайки.

При пайке в горизонтальных печах изделий, имеющих форму тел вращения большой длины, для предотвращения перетекания припоя в нижнюю часть зазоров и развития недопустимой химической эрозии, а также для равномерного нагрева последние вращают вокруг их оси с необходимой скоростью.

От прямого нагрева в печи изделие экранируют стенками контейнера, крышками или листовым асбестом. Способ высокопроизводителен для мелких изделий.

Бесфлюсовая пайка возможна как в специальных печах, так и в герметичных стальных контейнерах, нагреваемых в обычных воздушных шахтных или камерных печах. В контейнере создается требуемый вакуум или в него подаются преимущественно проточные активные или инертные газовые среды. При подаче в контейнер инертного или активного газа наиболее быстрое и полное удаление из него воздуха возможно лишь при правильном размещении входной и выходной трубок: газовая среда тяжелее воздуха должна вводиться снизу контейнера, а вытекать сверху, а газовая среда легче воздуха (например, аргон) должна вводиться сверху, а выводиться снизу контейнера. Соответственно размещаются входная и выходная трубки контейнера.

Недостатком нагрева в вакууме является отсутствие конвективного теплообмена. При этом лучистая энергия источника теплоты выделяется только на внешней поверхности собранного под пайку изделия, нагреваемого по толщине стенки только за счет теплопроводности паемого материала. Это является причиной увеличения времени нагрева, его неравномерности и коробления тонкостенного материала: коробление тем больше, чем ниже коэффициент теплопроводности паемого материала.

При пайке в печах тонкостенных крупногабаритных изделий с пространственным расположением большого числа соединений основной проблемой является недогрев или перегрев зоны пайки, что приводит к развитию в паяных изделиях дефектов и короблению тонкостенных элементов конструкции. Один из способов предотвращения этого — использование нагрева зоны пайки горячим воздухом путем принудительного подвода его через весь теплообменник. Температуру теплообменника необходимо измерять на входе и на выходе; после достижения равенства температур можно считать равномерный прогрев изделия достигнутым. Процесс охлаждения изделия может быть проведен холодным воздухом аналогично, что обеспечивает равномерность охлаждения.

Для предотвращения развития коробления тонкостенных изделий с большой плотностью соединений (например, теплообменников из коррозионно-стойкой стали) при ускоренном режиме нагрева, например, в середине каналов можно укладывать отражательные элементы из материала с высокой теплопроводностью и температурой плавления  $0,8-0,9t_n$  (где  $t_n$  — температура пайки), который нагревается лучистой энергией, попадающей на него, и, таким образом, вся энергия, отраженная и поглощенная отражательным элементом, выделяется в объеме изделия. В конце нагрева отражательный элемент (например, из меди при пайке коррозионно-стойкой стали) расплавляется.

В серийном и массовом производстве высокотемпературную пайку осуществляют в проходных конвейерных печах непрерывного действия с защитным (активным) газом, в индукционных установках, с применением газопламенных устройств, обеспечивающих высокую производительность и низкую себестоимость изготовления паяных изделий.

Пайка в контейнерах не требует специальных печей с защитным газом и позволяет использовать обычные печи.

## 15. ИНДУКЦИОННАЯ ПАЙКА

Индукционный нагрев металлов — один из высокопроизводительных способов, широко применяемый при пайке. При этом нагрев паяемых деталей происходит в результате выделения энергии высокочастотного электромагнитного поля. Поэтому индукционный нагрев массивных деталей с большой площадью спая имеет преимущества перед электроконтактным способом нагрева, так как обеспечивает более равномерный нагрев зоны соединения, его требуемую скорость, повторяемость режима пайки, позволяет управлять нагревом, автоматизировать процесс пайки. В результате быстрого нагрева поверхность паяемой детали окисляется меньше, чем при нагреве в пламени горелок или электропечах с обычной атмосферой. Быстрый нагрев предотвращает также интенсивный рост зерна и рекристаллизацию паяемого металла.

При индукционном нагреве металл, помещаемый в магнитное поле контура, по которому протекает переменный электрический ток, нагревается индуцированными вихревыми токами Фуко.

Плотность индуцированного тока, как и всякого переменного тока, а следовательно, и нагрев неоднородны по сечению про-

водника и определяются электромагнитным и магнитным полями близко расположенных проводников. При этом могут иметь место три эффекта: поверхностный (рис. 45, а), эффект близости (рис. 45, б) и кольцевой — катушечный (рис. 45, в).

Поверхностный эффект состоит в том, что при прохождении переменного тока по проводнику плотность тока имеет наибольшую величину на его поверхности и резко уменьшается в направлении к его оси. Этот эффект тем сильнее, чем больше электрическая проводимость и магнитная проницаемость проводника, в котором индуцируется ток.

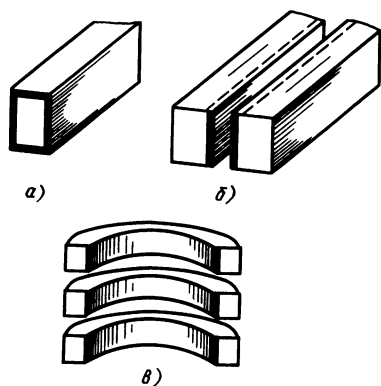


Рис. 45. Проявление эффекта близости и кольцевого эффекта:

а — поверхностный эффект; б — эффект близости; в — кольцевой эффект (зачернены места сгущения магнитных линий)

Эффект близости выражается в том, что неравномерное распределение плотности тока по сечению близко расположенных проводников зависит от направленности в них тока: при одинаковой направленности переменного тока наибольшая его плотность наблюдается на противоположных сторонах, а при разной — на обращенных друг к другу сторонах проводников. Эффект близости сильнее проявляется с уменьшением расстояния между проводниками.

Кольцевой эффект возникает в результате несимметричности электромагнитного поля проводника при свертывании его в кольцо: линии поля сгущаются у внутренней поверхности кольца и разрежены у внешней.

Все три эффекта усиливаются с увеличением частот переменного тока. При совместном действии они могут усиливать или ослаблять друг друга. При уменьшении магнитной проницаемости нагреваемого металла (вблизи точки Кюри, для стали  $\sim 770^\circ\text{C}$ ) поверхностный эффект выражен менее резко.

При нагреве парамагнитных металлов (меди, алюминия, латуни, бронзы и др.) вследствие возрастания электросопротивления при нагреве и отсутствия магнитной проницаемости имеет место более равномерное распределение индуцированного тока и нагрева.

При пайке используют главным образом ток радиочастоты ( $50\text{—}10^6$  Гц) от ламповых генераторов. При индукционном нагреве прежде всего нагревается внешняя поверхность детали, поверхность со стороны зазора нагревается только в результате теплопроводности паяемого металла и поэтому более медленно.

Глубина проникновения электрического тока определяется составом паяемого материала, температурой пайки и частотой тока. Наименьшая глубина проникновения электрического тока при частоте 2 кГц у стали (0,7 мм при  $20^\circ\text{C}$  и 12,3 мм при  $1000^\circ\text{C}$ ); затем у меди (1,49 мм при  $20^\circ\text{C}$  и 3,56 мм при  $850^\circ\text{C}$ ), алюминия (1,98 мм при  $20^\circ\text{C}$ ), у латуни (2,93 мм при  $20^\circ\text{C}$  и 4,85 мм при  $800^\circ\text{C}$ ). По мере возрастания частоты тока глубина его проникновения резко снижается, и при 300 кГц ее значение на 1,5—2 порядка ниже, чем при частоте 2 кГц.

Для пайки плоских изделий предложен индукционный нагреватель, содержащий индуктирующий токопровод в виде плоской многовитковой спирали и металлического диска, установленного на поверхности токопровода. В металлическом диске выполнены радиальные щелевые прорезы, равномерно расположенные по его окружности для обеспечения равномерного температурного поля. Такой индукционный нагреватель менее трудоемок в изготовлении, чем индуктор сложной формы.

Индукционная пайка с применением сплошных индукторов эффективна для деталей, входящих в индуктор с зазором 5—10 мм. Для сложных по форме деталей использование сплошных индукторов энергетически не выгодно из-за низкого КПД процесса.

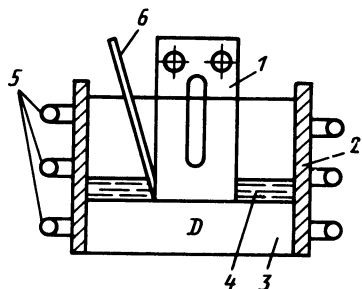


Рис. 46. Расположение соединяемых деталей (1, 3) съемного кожуха (2), наружного индуктора 5, флюсовой ванны (4) и припоя (6) при электрошлаковой пайке (по данным В. Д. Табелева, А. С. Письменного)

В этом случае необходимо использование разъемных индукторов.

Зазор между индуктором и деталью 2—20 мм. С увеличением зазора уменьшается скорость нагрева детали. Однако малые зазоры опасны из-за возможности замыкания витков индуктора деталью или жидким флюсом — проводников электрического тока. Для предотвращения замыкания при работе витки индуктора изолируют эмалью или асбестовым шнуром, пропитанным жидким стеклом. Для обеспечения равномерного нагрева места пайки необходимо нагревать детали с более

толстыми стенками. Тонкостенная деталь должна нагреваться до требуемой температуры от более массивной и раньше, чем расплавится припой. Сложные узлы паяют в несколько приемов.

При работе с многовитковыми спиральными индукторами для устранения явления полосчатости их изготавливают с более плотным расположением витков из труб прямоугольного сечения. При невозможности ввода замкнутого индуктора используют частично разъемные индукторы.

Косвенный индукционный нагрев печи возможен благодаря теплопроводности, например, стального муфеля, нагреваемого ТВЧ.

Локальный нагрев при индукционной пайке массивных деталей по сравнительно большой площади спая возможен через флюс (рис. 46). При этом флюс нагревается от стенки съемного кожуха 2 из коррозионно-стойкой стали, нагреваемого съемным наружным индуктором 5. Этот способ позволяет использовать существенно меньший объем флюса, чем при пайке погружением: уменьшить расход электроэнергии и улучшить защиту от испарений флюса.

Изделие сложной формы при нагреве вращают с частотой 20—30 мин<sup>-1</sup> во избежание его перегрева. Тонкостенные детали нагревают непрерывно: толстостенные — прерывисто для выравнивания температуры.

Прямой индукционный нагрев применяют в основном для пайки деталей с формой тел вращения (трубка с трубкой, трубка с фланцем, вал с втулкой).

Для снижения энергоемкости процесса индукционной пайки цилиндрических втулок, вставленных одна в другую (при этом внутренняя втулка длиннее, чем наружная), используют индуктор в виде кольца, имеющего диаметр меньше диаметра внутренней втулки. После индукционного разогрева внутренней детали и при-

поя индуктор перемещают равномерно вверх и вниз по высоте отверстия. При этом устраняется перегрев корпусной детали (Пат. 142005 ГДР, МКИ<sup>3</sup> кл. В 23 К 1/04).

С помощью индукционного нагрева возможна пайка в вакууме и в восстановительной или инертной газовой среде (в стеклянных, кварцевых ампулах или при косвенном нагреве — металлическом контейнере).

Индукционная пайка низкоуглеродистых сталей медным припоем при 1100—1180 °С в течение 3—15 мин в камере с углеводородным газом (0,5—30 % и N<sub>2</sub>—остальное) обеспечивает цементацию и упрочнение закалкой от 800—850 °С в масле, нагретом до 60 °С.

Припой при индукционной пайке помещают в виде фольги или колец в зазоры или специальные пазы (для предотвращения его стекания). При укладке фольги или стружки припоя сверху для предотвращения их сдвига под действием электромагнитных сил их лучше смешивать с флюсом.

Наибольшее применение получила индукционная пайка для стальных, медных и никелевых сплавов серебряными самофлюсующими припоями. Алюминий таким способом паяют редко из-за трудности контроля температуры и во избежание пережога.

При индукционном нагреве можно паять все токопроводящие металлы, проводники (например, графит), металлизированную керамику. Для контроля температуры применяют пирометр (ФП-3 для сталей). Фотоэлектрические пирометры реагируют на цвет каления нагретого металла и поэтому пригодны для контроля температуры выше 750 °С.

Для индукционного нагрева при пайке используют частоту колебаний от 50 до 10<sup>6</sup> Гц.

Перед индукционной пайкой поверхность соединяемых деталей готовят обычными способами, обезжиривая и очищая их от загрязнений и оксидов.

Индукционный нагрев при пайке осуществляют преимущественно на высокочастотных установках, предназначенных для плавки и закалки.

Индукционная пайка обеспечивает высокую воспроизводимость результатов и высокую производительность процесса благодаря большой плотности энергии, легко поддается механизации и автоматизации. Длительность нагрева при этом измеряется секундами.

## **16. ДУГОВАЯ ПАЙКА**

Нагрев теплотой электрической дуги нашел применение при пайке мелких деталей в приборостроении. Дуга может возбуждаться между фольгой припоя, заложенной в зазор между соединяемыми деталями и угольным или графитовым электродом, между паяемым изделием и электродом из припоя, между двумя угольными электродами, закрепленными в приспособлении.

Источниками питания дуги служат сварочные машины, понижающие трансформаторы или блоки аккумуляторных батарей.

Этот способ применяют, например, при пайке медных статорных обмоток фазных роторов медно-фосфористым припоем (7 % Р, остальное медь).

Припой в виде кусочков фольги площадью 4—6 мм<sup>2</sup> укладывают в зазор между паяемыми деталями. Угольные (диаметром 10—12 мм) или графитовые (диаметром 6—8 мм) электроды, применяемые при пайке, должны быть изготовлены из чистого угля или графита. Электроды имеют конусную форму: длина конусной части равна двум диаметрам электрода.

При пайке дугой косвенного действия один из полюсов источника постоянного тока подключают к подставке, соприкасающейся с паяемым изделием: другой полюс — к электроду. После возбуждения дуги между угольным электродом и фольгой припой последний плавится и заполняет зазор. При пайке статорных обмоток поддерживается длина дуги в пределах 4—5 мм (при силе тока 75—100 А). Скорость пайки пропорциональна силе тока.

При пайке деталей электрооборудования и приборов теплота, выделяемая дугой, может повредить изоляционные материалы на изделии, расположенные близко к месту пайки. Для предохранения изоляции применяют экраны из огнеупорной массы.

Нагрев электрической дугой может быть использован при пайке не только средне- и высокоплавкими, но и легкоплавкими припоями. При этом припой не должен содержать компонентов, обладающих высоким давлением пара, таких, как цинк и кадмий, выделяющихся и испаряющихся под тепловым действием дуги.

При дуговой пайке цветных металлов используют отрыв капель расплавленного припоя с помощью импульсов высокочастотного электромагнитного поля. В качестве плавящегося электрода применяют медь, серебро, бронзу. Этот метод обеспечивает высокую стабильность массы капель припоя. Температуру капель припоя можно регулировать путем задержки переноса капли после включения дуги. При дуговой пайке меди легкоплавкими припоями в результате увеличения температуры припоя наблюдается расширение диффузионной зоны соединения по сравнению с диффузионной зоной соединения, выполненного электропаяльником [25].

Применение дуговой пайки алюминия и его сплавов с изменением полярности электрического тока и подачей в зону пайки инертного газа позволяет осуществить бесфлюсовую пайку преимущественно стыкового соединения. Припой применяют в виде проволоки. Дуговая пайка в вакууме была успешно использована для пайки рабочих лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов. При этом нагрев осуществляется разрядом с созданием в зоне пайки почти стационарного температурного поля (на режимах разряда с величиной анодного падения потенциала, близкого к нулю). При этом при пайке деталей из сплава ВЖЛ2 был увеличен их ресурс в 2—4 раза [30].

## Глава 6

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПАЯЕМОГО МАТЕРИАЛА И ПРИПОЯ ПРИ ПАЙКЕ

### 1. ДЕФЕКТЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИХ ОБРАЗОВАНИЕ

**Дефекты и их влияние на свойства паяных соединений.** Способность паяных изделий сопротивляться воздействию внешнего силового и температурного полей, коррозионной среды и другим условиям эксплуатации определяется, в конечном счете, сопротивляемостью их наиболее «слабого звена». Таким слабым звеном паяных соединений чаще всего являются места расположения дефектов.

В соответствии с особенностями формирования паяного соединения различают следующие его зоны [12]: 1) паяный шов — зона, закристаллизовавшаяся при пайке и последующем охлаждении, состоящая из капиллярного и галтельных участков; 2) диффузионная зона основного материала рядом со швом, имеющая измененный химический состав и возникающая в результате взаимной диффузии ее со швом, газовыми средами; 3) зона сплавления (спая) — поверхность между паяемым металлом и швом.

В шве паяного соединения могут образовываться дефекты в виде несплошностей. К ним относятся газовые и усадочные поры, раковины, трещины, эрозионные повреждения. *Газовые поры* возникают вследствие локальной несмачиваемости паяемого материала флюсом и (или) припоем, или кратковременности термического цикла пайки в условиях выделения растворенных в жидком припое газов или паров компонентов припоя, паяемого материала и связующих паст с высокой упругостью испарения компонентов.

Образованию газовых пор способствуют узкие зазоры и горизонтальность их расположения, препятствующие дрейфу пор вдоль зазора к галтельным участкам шва. Газовые поры существенно снижают радиотехнические свойства, электрическую проводимость и теплопроводность паяных соединений. Характерной особенностью таких пор является их округлость и изолированность.

*Усадочные поры* возникают вследствие объемной усадки при кристаллизации сплавов с широким интервалом твердожидкого состояния. Усадочные поры особенно резко развиваются в галтельных паяных швах или на стыках кристаллов твердого раст-

вора в капиллярном участке швов. Они снижают механические свойства, герметичность, вакуумную плотность и электрическую проводимость паяных соединений. Характерной особенностью таких пор является их остроугольная форма.

*Раковины* — крупные газовые включения, образующиеся при пайке вследствие локального несмачивания паемого материала жидким припоем, особенно при значительном его перегреве, или при использовании паемого металла или припоя с высокой упругостью испарения их компонентов, а также при неравномерном зазоре.

*Корольки припоя*, предварительно уложенного у зазора, возникают вследствие избирательного испарения депрессантов при пайке или затекания в зазор легкоплавкой части широкоинтервального припоя.

*Флюсовые включения* — застревающий в металле шва флюс, имеющий близкую или более высокую плотность, чем припой, образуются в условиях быстрого охлаждения соединения, широкой нахлестки, горизонтальности паяльного зазора, повышенной вязкости жидкого припоя. Флюсовые включения могут снижать коррозионную стойкость паяных соединений после механической обработки шва и вскрытия пор, заполненных флюсом, или при расположении таких включений в открытых непропаях — свищах.

*Кристаллизационные трещины* возникают вследствие широкого интервала твердожидкого состояния сплава шва в условиях его затрудненной усадки или при смещении деталей в процессе кристаллизации, а также при большом различии коэффициентов линейного расширения паемых материалов в разнородных соединениях с замкнутыми, например телескопическими, соединениями. Кристаллизационные трещины существенно снижают прочность, пластичность, герметичность, вакуумную плотность, физические и химические свойства паяных соединений.

В паяных соединениях во всех его зонах могут возникать такие несплошности, как диффузионная пористость, являющаяся результатом нескомпенсированной диффузии компонентов паемого металла и припоя через границу паяного соединения. Развитие диффузионной пористости особенно интенсивно способствуют прослойки химических соединений вблизи спая. Такая пористость резко снижает прочность, вакуумную плотность и другие свойства паяных соединений.

Термические трещины возникают в шве или паемом материале из-за высокой скорости нарастания растягивающих напряжений в паяном соединении, достигающих временного сопротивления разрыву материала в одной из зон паяного соединения. Такие трещины резко снижают свойства паяных соединений.

Причиной ослабления паяных соединений может быть дефектная структура — прослойки химических соединений по границе шва и основного материала, участки слаболегированного твердого раствора в области совместной кристаллизации (эпитаксии)

паяного шва с паяемым материалом, участки паяного соединения, обедненные легкоиспаряющимися компонентами. В зоне термического влияния пайки могут развиваться структурные изменения, приводящие к снижению механических, физических и химических свойств паяных соединений, например, их пластичности или коррозионной стойкости. В основном материале рядом со швом могут развиваться дефекты структуры, обусловленные появлением общей или локальной химической эрозии, межзеренной и межблочной химической эрозии.

*Общая химическая эрозия* возникает в результате фронтального плавления и растворения паяемого металла в жидком припое. Она приводит к утонению паяемого материала.

*Локальная химическая эрозия* образуется в результате повышенной растворимости паяемого металла в жидком припое в местах скопления жидкого припоя при пайке или в местах пластической деформации материала конструкции. Такая эрозия локально уменьшает рабочее сечение паяемого материала и поэтому искажает форму деталей и снижает механические свойства паяных соединений.

*Межзеренная и межблочная химическая эрозия* образуется в результате плавления паяемого материала в контакте с жидким припоем по границам зерен и блоков вследствие повышенной растворимости паяемого металла в припое и незначительной растворимости припоя в паяемом металле. Такая химическая эрозия снижает механические свойства паяемого материала вследствие ослабления границ зерен и блоков после проникания по ним припоя.

Вопрос о допустимости дефектов, выявленных при испытаниях паяных соединений или визуальном осмотре, может быть решен с помощью эталонов на такие дефекты, но с обязательным учетом мест их расположения в паяном соединении, особенностей конструкции изделия и условий его эксплуатации. Расположение дефектов существенно влияет на вибрационную прочность сопротивления усталости соединений и их коррозионную стойкость. При вибрационных нагрузках поверхностные дефекты более опасны, чем дефекты, расположенные внутри паяного соединения. Сопротивление усталости зависит больше от плотности паяного шва, чем от прочности основного материала. При этом особенно опасны такие дефекты, как открытые непропаи, неспаи, свищи, трещины и подрезы.

Допустимость дефектов зависит от места их расположения и от условий работы изделия. В изделиях, работающих при повышенных температурах, решающее значение могут иметь максимальные размеры дефектов, а не их средние размеры. Например, по данным А. В. Орлова, дефекты, занимающие площадь более 10 % площади паяемого шва, при телескопическом соединении труб с фланцами из стали 08Х18Н10Т приводят к недопустимому снижению прочности паяных соединений.

На границе шва и паяемого материала могут образовыв-

ваться такие дефекты, как непропаи, неспаи, релаксационные трещины.

*Непропаи* возникают в результате полного и частичного не-заполнения паяльного зазора жидким припоем вследствие плохой смачиваемости паяемого материала флюсом или его низкой активности, плохой смачиваемости паяемого металла жидким припоем, увеличения или неравномерности паяльного зазора, недостаточного количества жидкого припоя, вытекания его из слишком широких зазоров или перетекания в расположенные ниже участки зазора, застревания воздуха в зазорах («воздушные мешки»), неправильной укладки припоя при сборке, ухудшения жидкотекучести припоя при растворении в нем паяемого материала. Непропаи могут возникать также в результате большей скорости формирования галтельных участков швов, чем капиллярных участков («своеобразное обегание» припоя по периметру нахлестки до заполнения зазора припоем). Другими причинами непропаев могут быть неблагоприятный температурный градиент (припой обычно течет в сторону повышения температуры), характер физико-химического взаимодействия паяемого материала с жидким припоем (например, образование прослоек химических соединений), способ введения припоя в зазор (припой с широким интервалом кристаллизации лучше помещать в зазор, а с узким — у зазора).

*Неспаи* образуются в местах отсутствия межатомной связи основного материала с припоем вследствие слишком широких зазоров или плохой смачиваемости припоем паяемого материала. Непропаи и неспаи снижают все свойства паяных соединений.

*Релаксационные трещины* в паяемом материале возникают при контакте его с жидким припоем при наличии внутренних и внешних растягивающих напряжений, вследствие снижения поверхностного натяжения на границе паяемого металла и припоя или развития межзеренной, межблочной химической эрозии паяемого металла. Такие трещины понижают прочность и пластичность паяных соединений.

По данным радиографического контроля, дефекты по возрастанию влияния на вакуумную плотность паяных соединений можно расположить в следующий ряд: мелкие газовые поры, непропаи, сообщающаяся газовая и усадочная пористость, трещины. В таком же порядке указанные дефекты ухудшают и герметичность паяных соединений.

Дефекты, ухудшающие прочность паяных соединений, можно, в свою очередь, расположить в следующем, по возрастанию влияния, порядке: мелкая газовая пористость, крупные газовые поры, непропаи, неспаи, прослойки химических соединений, подрезы, трещины. Существенное значение имеет также форма дефектов. Дефекты округлой формы (поры), по данным О. А. Бакши, снижают прочность соединений с мягкой прослойкой на 10 %, а остроугольные дефекты (непропаи, неспаи) на 25 %.

**Влияние температурно-временных условий охлаждения жидкого припоя и шва при затвердевании на образование в нем дефектов.** При охлаждении сплавов из жидкого состояния до нормальной температуры происходит их объемная и линейная усадка. Полная усадка  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ж}} + \varepsilon_{\text{т}} + \varepsilon_{\text{сл}}$ , где  $\varepsilon_{\text{ж}}$  — объемная усадка в жидком состоянии;  $\varepsilon_{\text{т}}$  — линейная усадка в твердом состоянии;  $\varepsilon_{\text{сл}}$  — усадка в температурном интервале между солидусом и ликвидусом.

Для температурного интервала твердожидкого состояния характерна объемная усадка жидкой фазы в виде раковин. Для твердожидкого состояния характерна как линейная усадка каркаса из сросшихся дендритов, так и локальная объемная усадка жидкой фазы в микрообъемах между их осями. Линейная усадка каркаса дендритов на порядок меньше, чем объемная усадка жидкой фазы. В условиях затрудненной линейной усадки каркаса из дендритов истощение пластичности в отдельных его участках при слабой подвижности оставшейся жидкой фазы, локализованной между осями дендритов и поэтому неспособной к залечиванию мест разрыва каркаса, может привести к возникновению кристаллизационных трещин. Таким образом, наибольшей склонностью к развитию рассеянной пористости и кристаллизационных трещин обладают сплавы с достаточно широким температурным интервалом твердожидкого состояния. Ширина такого интервала определяется не только составом сплава, но и скоростью охлаждения его из жидкого состояния. С увеличением скорости охлаждения в результате развития в этих условиях междендритной ликвации усиливается дендритный рост первичных кристаллов твердого раствора и расширяется температурный интервал твердожидкого состояния.

При затвердевании сплавов происходит перераспределение их компонентов между твердой и жидкой фазами. Так, для двойных сплавов  $A-B$  состав жидкой фазы  $X_{\text{ж}}$  и состав твердой фазы  $X_{\text{т}}$  при температурах  $t_x$  между солидусом и ликвидусом определяются точками пересечения изотермы  $t_x$  с линиями ликвидуса и солидуса и отличаются от состава исходного сплава  $X$  (рис. 47). Количественно такая разница оценивается коэффициентом распределения  $K_p = C_1/C_2$ , где  $C_1$  — концентрация примеси компонента  $B$  в твердой фазе;  $C_2$  — концентрация ее в жидкой фазе при той же температуре.

Объемная усадка в виде раковин в шве возможна преимущественно в достаточно развитых галтельных его участках. В капиллярных участках вследствие быстрого протекания физико-хими-

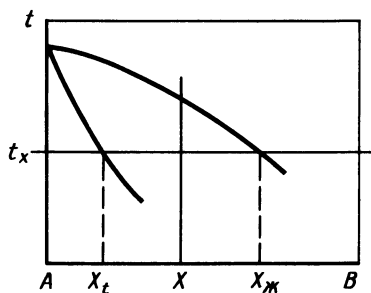


Рис. 47. Схема определения состава жидкой ( $X_{\text{ж}}$ ) и твердой ( $X_{\text{т}}$ ) фаз при температуре  $t_x$

ческого взаимодействия паяемого материала с припоем и достижения при этом температуры ликвидуса объемная усадка в паяном шве практически не происходит, а межзеренная слабо выражена.

Обнаружено, что зональная ликвация в слитках с широким интервалом кристаллизации припоев, приводящая к неоднородности распределения их компонентов в заготовке припоя, затрудняет процесс пайки. М. И. Дубровиным и В. С. Тереховым на примере припоя ПСрМНц38 показано, что снижение зональной ликвации в слитках припоя возможно при полунепрерывной их отливке через подогреваемые ультразвуковые распределительные устройства, устанавливаемые на кристаллизаторе литейной машины.

Для снижения зональной ликвации в припоях применяют ультразвуковую обработку расплава в разливочной воронке, что уменьшает степень обратной ликвации в слитке до значений, удовлетворяющих ГОСТу. Основной вклад в механизм снижения зональной ликвации дают измельчение структуры и улучшение условий подпитки мест усадки при затвердевании.

## **2. СМАЧИВАНИЕ ПАЯЕМОГО МЕТАЛЛА ПРИПОЕМ И РАСТЕКАНИЕ ПО НЕМУ**

За рубежом под паяемостью понимают способность припоя к смачиванию основного материала за время пайки. В нашей стране понятие паяемости определяется более широко — как возможность образования качественного паяного соединения из заданного паяемого материала с выбранными припоем и вспомогательными материалами (ГОСТ 17325—79). При этом учитывается, что при оценке паяемости смачивание является признаком первостепенной важности.

Процесс смачивания — это контактный металлургический процесс. Его развитие зависит как от чистоты поверхности контактирующих материалов  $M_k$  и  $M_n$ , характера развивающихся в их контакте процессов взаимодействия, так и температурно-временного режима пайки. При этом могут иметь место полное смачивание, несмачивание и полное дисмачивание. При смачивании на облуживаемой поверхности образуется мало дефектных мест; при несмачивании слой полуды не образуется из-за наличия на паяемом материале неметаллических пленок, мешающих физическому контакту его с припоем; при дисмачивании уровень припоя в вертикальном капиллярном зазоре понижается ниже нормального.

Дисмачивание, в частности, может быть обусловлено влиянием газов в зазоре, появляющихся в нем в результате тепловых химических процессов и процессов испарения компонентов материалов. Характерно, что с повышением температуры и времени пайки дисмачивание усиливается.

Реальные процессы растекания и затекания припоя в зазор

достаточно сложны и только приближенно описываются с помощью теоретических представлений об изотермическом растекании и затекании припоя в зазор, не учитывающих физико-химического взаимодействия его с паяемым материалом и температурных условий контакта.

Исследованиями процесса растекания припоев олова, ПОС 61 и свинца по меди, проведенными методом профильной скоростной киносъемки при использовании флюсов 5 %-ного гидразинового и «Прима 3» было обнаружено два типа зависимости угла смачивания и условного диаметра  $d$  капли от времени.

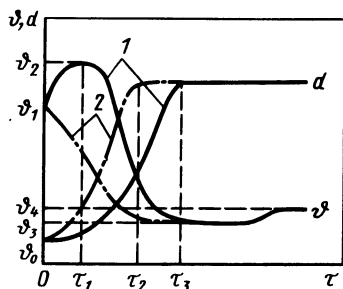


Рис. 48. Изменение диаметра пятна припоя и контактного угла смачивания  $\phi$  меди оловом или припоями ПОС 61 (1) и свинцом (2) при растекании припоя

1. Сразу же при расплавлении припоя наступает смачивание паяемой поверхности: при этом контактный (неравновесный) угол смачивания за время  $\tau_3$  уменьшается от  $\phi_1$  до  $\phi_3$  (рис. 48). В процессе продолжающегося нагрева до температуры пайки и последующего охлаждения до температуры затвердевания значение краевого угла смачивания не изменяется. При затвердевании растекшегося припоя его краевой угол увеличивается до значения  $\phi_4$ , что вероятно, может быть обусловлено усадочными явлениями и увеличением поверхностного натяжения при переходе металла из жидкого в твердое состояние.

2. После расплавления припой сначала смачивает паяемую поверхность, но не растекается по ней, а контактный угол смачивания возрастает. Лишь спустя некоторое время  $\tau_3$  припой начинает растекаться по поверхности. При этом угол смачивания резко уменьшается за время  $\tau_3$  от значения  $\phi_2$  до значения  $\phi_3$  и остается таким до начала затвердевания, после чего угол может немного возрасть, приобретая значение  $\phi_4$ .

Первый тип зависимости наблюдается для припоя из свинца, не образующего с медью ни жидких, ни твердых растворов. Второй тип зависимости характерен для припоев с высокой химической активностью к меди — для олова и припоя ПОС 61.

При растекании жидкой фазы по твердой иногда впереди фронта растекания наблюдается образование «ореола», рост которого подчиняется параболическому закону:  $X^2 = C$  (при растекании ртути на поверхности цинка, алюминия по железу при температуре 700—750 °C), где  $X$  — диаметр «ореола»,  $C = \text{const}$ . Это явление объяснено поверхностной диффузией [14], подчиняющейся, по видимому, законам активированной диффузии. Коэффициент поверхностной диффузии  $D_s$  больше коэффициента объемной  $D_v$  и межзеренной (граничной) диффузии  $D_r$  ( $D_v < D_r < D_s$ ), а энергия активации  $Q_v > Q_r > Q_s$ .

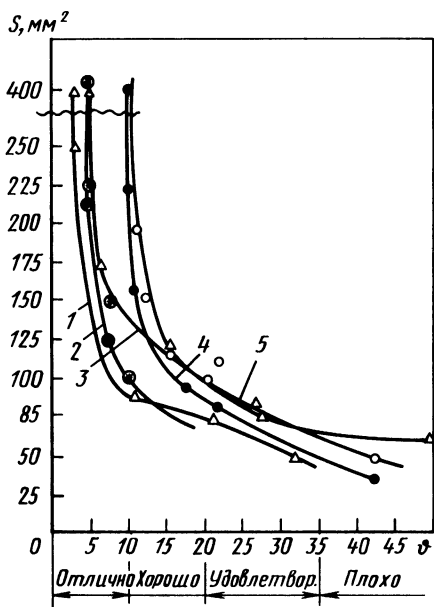


Рис. 49. Зависимость площади растекания от угла смачивания припоем ПОС 61 меди (1—3) и латуни (4, 5):

1 — флюс «Прима 3»,  $t_n = 350^\circ\text{C}$ ; 2, 4 — флюс гидразиновый,  $t_n = 250^\circ\text{C}$ , 3, 5 — флюс «Прима 2»,  $t_n = 350^\circ\text{C}$

В некоторых случаях кроме «ореола» впереди растекающегося фронта жидкого припоя образуется тонкая пленка жидкой фазы, чаще эвтектики. Процесс этот необратим.

Зависимость площади растекания мерной навески легкоплавкого припоя ПОС 61 по меди от краевого угла смачивания при использовании различных флюсов имеет вид гиперболы (рис. 49). Аналогичная зависимость для коэффициента растекания  $A_0/A$  от краевого угла смачивания  $\theta$  обнаружена и Акиро Сакamoto для припоев  $\text{Au} - 18\% \text{ Ni} - 15\% \text{ Sn} - 3,5\text{ В}$  и  $\text{Au} - 10\text{ Р}$  при пайке в вакууме коррозионно-стойких сталей и сплавов.

Смачиваемость паяемого материала жидким легкоплавким припоем, находящимся в динамическом состоянии (пайка погруже-

нием, волной припоя), более правильно оценивать не по углу смачивания или площади растекания, а по силе, действующей на образец при его погружении и смачивании припоем. В условиях пайки погружением в ванну, особенно при использовании автоматических линий, важнейшей характеристикой является скорость смачивания. Такие испытания проводят методом силового баланса на приборе менискографе по методике ИСО. При этом квадратные образцы со стороной 25 мм толщиной 1 мм погружают в ванну вдоль направления проката с заданной скоростью.

Процесс испытания состоит из следующих этапов (рис. 50, а): А — образец касается поверхности жидкого припоя; Б — образец медленно, с заданной скоростью опускается на постоянную глубину, при которой он начинает испытывать действие силы выталкивания; В — образец смачивается припоем; Г — припой натекает на образец. Сила смачивания  $F_{\text{см}}$  (рис. 50, б) становится равной силе  $F_{\text{к}}$ , обусловленной возрастанием массы припоя на образце. При испытаниях образец предварительно закрепляют в захватах динамометра, показания которого фиксируют на электронном приборе в виде кривой «сила  $F$  — время  $\tau$ » (рис. 50, б). Сила полного смачивания  $F_{\text{см}} = \sigma l \cos \theta / F_A$ , где  $\sigma$  — поверхност-

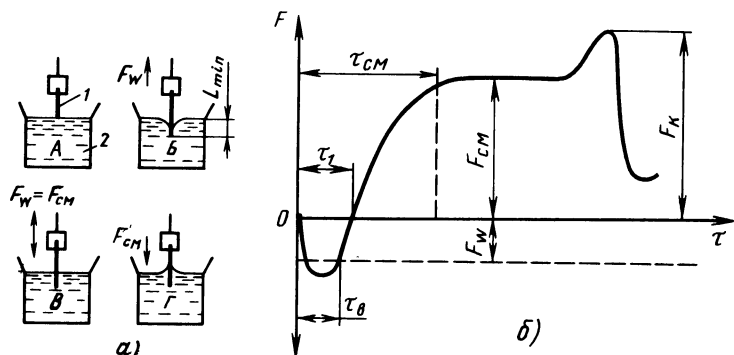


Рис. 50. Схема испытаний на менискографе:

*a* — этапы испытания (*A* — образец 1 касается припоя 2 в ванне; *B* — образец погружается в ванну; *B* — образец смачивается припоем; *Г* — припой натекает на образец); *б* — изменение силы  $F$  взаимодействия между образцом и жидким припоем во времени ( $\tau_1$  — время до начала смачивания;  $\tau_{CM}$  — время до полного смачивания образца припоем;  $\tau_\theta$  — время до начала действия силы плавучести  $F_W$ )

ное натяжение на границе жидкого припоя с внешней средой (воздух, флюс, защитный флюс, вакуум, активная или инертная газовая среда);  $l$  — периметр смачивания;  $\nu$  — краевой угол смачивания;  $F_A$  — поправка на силу Архимеда.

Действие газов на границе  $M_K$ — $M_n$  может быть обнаружено с помощью кривой (рис. 50, б) по ее зубчатости, особенно в области «колена».

Для оценки способности припоя смачивать паяемый материал  $M_K$  при заданных параметрах лужения ( $M_\phi$ ,  $M_n$ , ТРП, шероховатость поверхности) пользуются специальной шкалой.

Кривые, получаемые на менискографе, позволяют определить время до начала смачивания  $\tau_1$  (при  $F_{CM}=0$  или  $\tau_\theta=0$  — при плавучести образца),  $\tau_{CM}$  — время до полного смачивания (рис. 50, б).

### 3. ЗАТЕКАНИЕ ПРИПОЯ В ЗАЗОР

Затекание жидкого припоя в зазор при неизотермических условиях контакта начинается сразу же после его расплавления и смачивания соединяемых деталей у входа в зазор и может быть закончено до того, как будет достигнута заданная температура пайки (например, в печи). Только после смачивания соединяемых деталей в зазоре образуется симметричный мениск жидкого припоя с постоянным контактным углом. Различные по массе, размерам и физическим свойствам материала детали даже в печи нагреваются неодновременно, что усиливает неизотермичность условий нагрева.

На поверхности паяемого металла, очищенного перед пайкой от оксидов, при последующем нагреве и недостаточной активно-

сти флюсов могут снова возникать окисленные участки, не смачиваемые припоем.

Такие участки тормозят процесс затекания припоя. Вблизи выхода припоя из зазора контактный угол смачивания увеличивается, что обусловлено, по-видимому, снижением капиллярного давления при выходе жидкой фазы из зазора. На этой стадии затекания в условиях расширяющегося зазора и резкого снижения капиллярного давления формируется галтельный участок паяного соединения. С понижением температуры пайки длительность заполнения зазора и углы смачивания  $v_2$  и  $v_1$  возрастают.

При изотермическом контакте припоя и паяемого металла общий характер изменения контактного угла смачивания при затекании припоя в зазор сохраняется, но длительность его заполнения по сравнению с неизотермическими условиями сокращается почти на порядок, а величина углов смачивания  $v_2$  и  $v_4$  уменьшается. При изотермическом контакте в температурном интервале активности флюса непропаи не образуются.

Галтельные участки швов — весьма ответственные участки, так как они подвергаются действию повышенных нагрузок при статических и динамических нагружениях. Однако наличие чрезмерно развитых галтельных участков приводит к дополнительному расходу припоев, увеличению массы изделия, а вследствие большого объема жидкого металла в галтельных участках могут получить усиленное развитие локальная химическая эрозия прилегаемого паяемого материала, усадочная и газовая пористость, скопление хрупких структурных составляющих. При большом отношении объема припоя к объему капиллярного зазора ( $\geq 500\%$ ) и невысокой смачивающей способности припоя галтельный участок может потерять свою плавность и стать выпуклым [15]. Слишком сильно растекающийся припой может, заполнив зазор, вслед за этим вытечь из него в результате интенсивного растекания по нижней детали. Типичным примером этого является медь. Чтобы избежать вытекания припоя из зазоров, изделие собирают с нулевыми зазорами или с нулевым натягом, что усложняет процесс сборки.

При заполнении жидким припоем неравномерного зазора шириной 0—0,5 мм со стороны узкой его части характер заполнения остается таким же, как и при равномерном капиллярном зазоре. Однако продолжительность такого заполнения в 2 раза сокращается, а коэффициент пористости становится ниже, чем при заполнении зазора от широкой его части.

На высоту подъема жидкого припоя в вертикальном капиллярном зазоре при изотермическом контакте с паяемым металлом решающее влияние оказывают ширина зазора и смачивающая способность припоя: с уменьшением ширины зазора и улучшением смачиваемости припоя высота его подъема в зазоре возрастает. При прочих равных условиях максимальная высота подъема припоя в зазоре тем больше, чем меньше плотность припоя.

Сравнение кинетики заполнения вертикального зазора жидким припоем в различных условиях температурного контакта  $M_k$  и  $M_n$  показало, что при неизотермическом контакте и увеличении ширины зазора заметно возрастает контактный угол смачивания  $\nu$ . Применение менее активных флюсов также приводит к увеличению этого угла и снижению высоты подъема припоя.

Затекание припоя в вертикальные зазоры сверху, без технологической стенки, возможно только при использовании припоев, активно взаимодействующих с паяемым металлом. Технологическая стенка при затекании припоя в вертикальный зазор сверху оказывается необходимой лишь для слабо взаимодействующих с паяемым металлом припоев.

Заполнение вертикальных или наклонных капиллярных зазоров на большую высоту, чем это обеспечивается действием капиллярных сил, возможно под действием внешне приложенных сил: разреженного давления в герметизированных зазорах, давления на поверхность жидкого припоя при пайке погружением в ванну, при действии электромагнитных сил и др.

Процесс заполнения капиллярного зазора под действием электромагнитных сил происходит в три стадии. На первой стадии возрастает мгновенная скорость затекания. На второй стадии происходит резкое уменьшение контактных углов смачивания и изменение мениска с выпуклого на вогнутый. При этом мгновенная скорость заполнения зазора резко снижается, хотя и остается отличной от нуля. На третьей стадии повторно увеличивается мгновенная скорость, но до значительно меньшей величины, чем на первой стадии. Максимальное значение мгновенной скорости заполнения при этом тем больше, чем больше величина электромагнитного давления. Значение скорости заполнения капиллярного зазора под действием электромагнитных сил на порядок больше, чем при капиллярном его заполнении, и может регулироваться величиной электромагнитного давления.

При телескопическом типе соединения сборочный зазор между деталями из одинакового материала равен  $\delta_0 = (D_0 - d_0)/2$  и может изменяться лишь при неравномерном нагреве. Если температурный коэффициент линейного расширения соединяемых материалов не зависит от температуры и если наружная деталь будет нагреваться быстрее внутренней, то диаметр наружной детали  $D_{t1} = D_0(1 + \alpha_0 t_1)$ ; тогда диаметр внутренней детали будет  $d_{t2} = d_0(1 + \alpha_0 t_2)$ . При условии, что  $t_1 > t_2$ , зазор между деталями  $(D_{t1} - d_{t2})/2$  будет возрастать, а если  $t_1 < t_2$ , т. е. внутренняя деталь будет нагреваться быстрее, то зазор между соединяемыми деталями будет уменьшаться. По мере выравнивания температуры соединяемых деталей, когда температура их выравнивается  $t_1 = t_2$ , зазор между деталями станет равным сборочному.

При пайке разнородных материалов в условиях равномерного нагрева зависимость диаметров  $d_i$  и  $D_i$  деталей от температуры будет иметь следующий вид:  $d_i = d_0(1 + \alpha_1 t)$ ,  $D_i = D_0(1 + \alpha_2 t)$ ,

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — температурные коэффициенты линейного расширения внутренней и наружной деталей соответственно. Тогда ширина зазора между ними

$$\delta_t = \frac{D_t - d_t}{2} = \frac{D_0(1 + \alpha_2 t) - d_0(1 + \alpha_1 t)}{2} = \frac{D_0 - d_0}{2} + \frac{(D_0 \alpha_2 - d_0 \alpha_1)}{2} =$$

$$= \delta_0 + \frac{(D_0 \alpha_2 - d_0 \alpha_1)}{2}. \quad (18)$$

Уравнение (18) может быть упрощено, так как  $D_0$  мало отличается от  $d_0$ . Если положить, что  $D_0 \sim d_0 \sim D$ , то зависимость ширины зазора между деталями из разнородных материалов от температуры будет иметь следующий вид:

$$\delta^{\alpha_1 \alpha_2} = \delta_0 + \frac{D \Delta t}{2} (\alpha_2 - \alpha_1). \quad (19)$$

Если  $\alpha_1 > \alpha_2$ , то при нагреве зазор между деталями  $\delta^{\alpha_1 \alpha_2}$  будет уменьшаться, а при  $\alpha_1 < \alpha_2$  — возрастать.

При определенной температуре происходит пережим деталей (при  $\alpha_1 > \alpha_2$ ) и зазор перестает существовать. Температура, при которой зазор исчезает при нагреве, определяется по уравнению (19) при условии, что  $\delta^{\alpha_1 \alpha_2} = 0$ :

$$\Delta t = \frac{-2\delta_0}{(\alpha_2 - \alpha_1)D}.$$

Например, если внутренняя деталь изготовлена из аустенитной стали, а наружная из ферритной при ширине сборочного зазора между ними 0,05 мм и разнице  $\alpha_2 - \alpha_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  при температуре 500 °С паяльный зазор исчезает. В этих условиях жидкий припой с температурой плавления 500 °С в зазор не затечет. Кроме того, в результате обжима в деталях могут произойти значительная пластическая деформация и последующий процесс рекристаллизации. Если зазор исчезает при температуре ниже температуры рекристаллизации, то в контакте пластически деформированного материала с жидким припоем может развиваться хрупкое разрушение.

В паяных соединениях телескопического типа, в которых наружный (охватывающий) элемент изготовлен из материала с более высоким температурным коэффициентом линейного расширения, ширина зазора при пайке возрастает по сравнению с шириной сборочного зазора, а при охлаждении — уменьшается. При этом паяный шов подвергается сжатию, под действием которого он может упрочняться. Сжатие препятствует также возникновению и развитию микротрещин в шве при циклических изменениях температуры, что обеспечивает надежную работу трубопроводов в условиях теплосмен и тепловых ударов. Это подтверждено при пайке трубопроводов из алюминиевых и медных труб, в которых наружная алюминиевая труба была покрыта слоем никеля, нане-

сенного химическим способом, а внутренняя медная труба припаивалась к ней легкоплавкими припоями.

Для активирования заполнения зазора припоем при бесфлюсовой пайке иногда используют его подвод через металлическую губку. По данным Г. А. Яковлева, низкотемпературная пайка металлов: меди, никеля, молибдена, алюминия и других, а также полупроводников (кремния, германия) припоями на основе свинца и олова в водороде возможна с применением никелевой ленты (губки) толщиной 140 мкм, катаной и спеченной из карбонильных порошков с пористостью 75 % и линейным размером капилляров 3 — 10 мкм. Ленту предварительно укладывают в зазор, а на ее свободный выступ припой. Паяемые материалы обезжиривают и травят (химически): пайку проводят в пружинных кассетах, обеспечивающих прижим соединяемых деталей под давлением от 0,5 до 5 МПа. При впитывании в металлическую губку жидкий припой, по-видимому, очищается от кислорода и распространяется по губке, достигая поверхности паяемого материала. Полное смачивание соединяемых деталей меди свинцом при использовании медной губки происходит при температуре 420 °С, а при никелевой губке — при температуре 330 °С. При смачивании свинцом на поверхности меди образуется прослойка твердого раствора никеля. Губка положительно влияет на смачивание меди и снижает температуру пайки, если она изготовлена из металла, образующего с медью непрерывный ряд твердых растворов.

Эксперименты по пайке в космосе показали, что в условиях микрогравитации никаких изменений в металле на атомном уровне (диффузия, поверхностное натяжение, химическая реакция) не происходит. Изменения проявляются на макроскопическом уровне (массо- и теплоперенос, механизмы роста кристаллов и т. п.).

В условиях невесомости (летающая космическая лаборатория) установлено, что в противоположность наземным условиям зазоры стыков заполняются жидким припоем равномерно, без провисания: смачивание паяемого материала жидким припоем и растекание последнего по основному материалу происходит под действием капиллярных сил и межатомных сил сцепления: диспергирующие частицы основного материала в расплаве припоя распределяются равномерно, по объему и в шве отмечается склонность к мелкозернистому строению: возможно получение пайкой качественных стыковых, нахлесточных соединений и скруток проводников, проведение ремонта отверстий путем припайки заплат [13]. Пайка в космосе отличается от пайки на земле отсутствием удельного веса у припоя из-за ничтожно малого ускорения, отсутствия конвекции в шве из-за очень низкого остаточного давления: стремления жидкого припоя к сферической форме.

Источником теплоты при пайке в космосе является солнечная энергия (мощность 1,7—2 кВт). На высоте 100 км остаточное давление в окружающем пространстве  $1,33(10^{-4}—10^{-5})$  Па. В паяных швах отсутствуют гелий, водород, атомарный азот и

кислород. Радиус галтельного участка паяного шва уменьшается: припой принимает форму капли с приплюснутой вершиной. Пайка в космосе требует минимальных зазоров. В паяных соединениях наблюдается меньше дефектов, связанных с усадкой сплавов: швы менее окислены.

#### 4. ХИМИЧЕСКАЯ ЭРОЗИЯ ПАЯЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПАЙКЕ

Общей химической эрозией называют дефект паяного соединения, проявляющийся в разрушении паяемого материала при пайке. Равномерно развитая химическая эрозия называется общей: развитая в отдельных участках паяемого металла — локальной: развитая по границам зерен или блоков — межзеренной или межблочной.

Относительное количество расплавившегося паяемого металла при химической эрозии определяется объемом жидкого припоя  $V_{ж}$ , находящегося в контакте с ним, и плотностью припоя, а также площадью  $S$  его контакта с паяемым материалом и предельной растворимостью  $C_{ж}$  паяемого металла в жидком припое при температуре пайки:

$$Q = \rho_{ж} V_{ж} C_{ж} / S.$$

С учетом этого потеря массы  $M$  за время  $\tau$  составит

$$Q = \int_0^{\tau} V_{\tau} d\tau = \rho C_{ж} \frac{V_{*}}{S} (1 - e^{aS_{\tau}/V_{*}}),$$

где  $a$  — коэффициент растворения атомов твердого материала в жидком припое.

Из приведенных уравнений следует, что химическая эрозия является монотонной функцией пяти переменных  $C_{ж}$ ,  $V_{ж}$ ,  $S$ ,  $\tau$ ,  $a$  ( $a = a_0 e^{-Q(R\tau)}$ ), т. е. первая производная этой функции не меняет знак. Отсюда можно сделать следующие выводы:

1) с увеличением времени взаимодействия  $\tau_{п}$  химическая эрозия увеличивается;

2) скорость химической эрозии  $dQ/d\tau$  является монотонно убывающей функцией. Поэтому при легировании припоя паяемым металлом до  $C < C_{ж}$  скорость эрозии может быть значительно уменьшена, а при  $C = C_{ж}$  станет равной нулю. Например, скорость химической эрозии меди в жидком припое ПОС 61 при пайке уменьшается примерно в 100 раз при введении в него до 2 % Cu;

3)  $Q(\tau)$  — монотонно убывающая функция. Следовательно, скорость химической эрозии уменьшается с понижением температуры;

4)  $Q$  возрастает с увеличением предельной концентрации паяемого металла в припое:

5) концентрация  $C_{\text{ж}}$  паяемого металла в жидком припое при прочих равных условиях возрастает с уменьшением объема припоя и поверхности их контакта  $S$ ;

6) при уменьшении объема (количества) жидкого припоя  $V_{\text{ж}}$  химическая эрозия уменьшается.

Общее время изотермического контактного плавления паяемого металла и растворения в жидком припое до предельной растворимости ( $C_{\text{ж}}$ ) может быть рассчитано в первом приближении по формуле  $\tau = x^2 / (2Dt)$ , где  $x$  — глубина плавления,  $t$  — температура, и составляет несколько секунд.

Возможную степень химической эрозии паяемого металла в более легкоплавком жидком металле можно в первом приближении определить по  $C_{\text{ж}}$  на их двойной диаграмме состояния.

Наличие на границе паяемого металла и припоя прослойки химического соединения, нарушающего их непосредственный контакт, уменьшает скорость развития химической эрозии или прекращает ее развитие. Установлены три типа зависимости развития общей химической эрозии от температуры [12] (рис. 51): *a* — непрерывное развитие; *б* — повышение химической эрозии, затем торможение ее развития в некотором интервале температур и снова повышение; *в* — возрастание скорости химической эрозии с последующим ее замедлением.

Первый тип зависимости имеет место при пайке металлов припоями, основы которых образуют с ними диаграммы состояния с непрерывным рядом твердых растворов или ограниченными твердыми растворами. Развитие химической эрозии по второму типу наблюдается при большом количестве жидкого припоя, образующем в контакте с паяемым металлом прослойки химических соединений. Третий этап зависимости имеет место при контакте  $M_{\text{к}}$  с ограниченным количеством припоя независимо от характера их взаимодействия, когда процесс химической эрозии при повышении температуры замедляется.

Избирательная (селективная) химическая эрозия коррозионно-стойких сталей наблюдается при использовании жидких металлов лития, натрия, калия в качестве теплоносителей: при этом происходит интенсивный переход хрома из стали в жидкий расплав с последующим образованием в нем оксидов хрома.

Локальная поверхностная химическая эрозия  $M_{\text{к}}$  в виде «ручьев» возникает при взаимодействии хромоникелевой стали 12Х18Н9Т с припоем системы Ni — Cr — Mn при температуре 1250 °С в течение 2,5 ч [12].

Межзеренная и межблочная эрозия связана с особым энергетическим состоянием границ зерен. Особое дислокационное строение металлов и наличие разориентации способствуют повышению

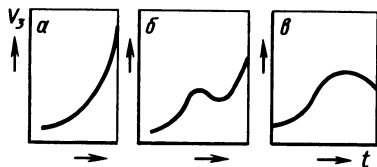


Рис. 51. Характер зависимости скорости развития химической эрозии от температуры

энергетического состояния границ зерен и скорости диффузии вдоль них компонентов припоя, особенно компонентов, образующих твердые растворы внедрения (углерод, бор и др.). Особое энергетическое состояние границ зерен и блоков служит основным стимулом локального контактного твердожидкого плавления в начальной его стадии и возникает самопроизвольно вследствие термодинамического стимулирования. Развитие межзеренной эрозии облегчается при условии, если предельная растворимость жидкой фазы в твердой достаточно мала, а при температуре пайки на диаграмме состояния  $M_k-M_n$  имеет место большой концентрационный перепад между температурами солидуса и ликвидуса. Методы оценки склонности  $M_k$  к химической эрозии в контакте с жидким  $M_n$  приведены в ГОСТ 21549—76.

## 5. РОСТ ПРОСЛОЕК ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПАЯНЫХ ШВАХ

Если паяемый металл взаимодействует с припоем с образованием между ними химических соединений, то при пайке и высокотемпературной эксплуатации паяных соединений в шве на границе с паяемым металлом могут возникать и расти сплошные прослойки таких соединений. Прослойки химических соединений, как правило, хрупкие и значительно отличаются от паяемого металла и припоя по температурному коэффициенту линейного расширения: все это может способствовать хрупкому разрушению паяных соединений.

Во многих случаях металлы  $A$  и  $B$  способны к образованию нескольких химических соединений. М. Г. Окнов экспериментально показал, что в контакте твердого и жидкого металлов, способных к образованию нескольких химических соединений, возникает и растет прежде всего химическое соединение, наиболее богатое легкоплавким металлом: менее богатые легкоплавким металлом прослойки химических соединений образуются по месту контакта металлов  $A$  и  $B$  в процессе последующей выдержки  $t_n$  при повышенной температуре.

На скорость роста прослойки химического соединения при пайке существенно влияет удельный объем жидкого припоя. Этот рост будет тем больше, чем больше отношение предельной растворимости паяемого металла в жидком припое  $S_{ж}$  при температуре пайки к его растворимости при температуре солидуса шва, т. е. чем больше растворенного паяемого металла выделится из жидкого раствора при затвердевании. Так как с увеличением температуры пайки соответственно возрастает и предельная растворимость  $S_{ж}$  паяемого металла в жидком припое, то при прочих равных условиях этот рост будет тем больше, чем выше температура пайки.

Начальная стадия возникновения прослойки химического соединения на границе  $T-J$  изучена слабо. Практически в резуль-

тате шероховатости поверхности паяемого металла, несовершенства кристаллической решетки, наличия зерен и других дефектов химическое соединение возникает сначала в отдельных местах контакта, вдоль межфазной границы  $T—Ж$  с последующим образованием сплошной прослойки, которая затем растет по толщине. Параболический закон роста прослоек химических соединений при фронтальном их продвижении во многих случаях является первым приближением, так как часто по фронту роста прослойки наблюдаются отдельные ее выступы, растущие со скоростью выше средней.

Время подготовительного периода образования прослойки химического соединения определяется кинетикой диффузионных процессов на этом этапе и энергией активации процесса:

$$\tau_c = k e^{Q/(RT)},$$

где  $k$  — постоянная, зависящая от времени.

Энергия активации процесса  $Q$  может быть определена по данным о продолжительности подготовительных периодов  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , полученных экспериментально для двух различных температур  $T_1$  и  $T_2$ . Тогда

$$\tau_1/\tau_2 = e^{Q_n/RT_1}; \quad e^{Q_n/RT_2}.$$

Скорость и направление роста прослойки химических соединений в изотермических условиях определяются соотношением парциальных коэффициентов диффузии атомов твердого и жидкого металлов через эту прослойку.

При больших значениях энергии активации  $Q$  и достаточно низкой температуре пайки  $t_n$  подготовительный период  $\tau_0$  может оказаться настолько большим, что станет соизмеримым со временем пайки. В этих условиях прослойка химического соединения может не образоваться или иметь достаточно малую толщину.

Скорость роста прослоек химических соединений, их состав и структура определяются не только термодинамическими, но и кинетическими факторами — скоростью протекания реакции и характером перехода химического соединения из одного равновесного состояния в другое, иногда через метастабильное состояние. В этих условиях порядок появления прослоек химических соединений может не соответствовать порядку их чередования, предусмотренному равновесной диаграммой состояния.

При взаимной диффузии твердых металлов рост прослойки химического соединения происходит по параболическому закону:  $x^2 = 2R_T\tau$ , где  $x$  — толщина прослойки химического соединения;  $R_T$  — константа, зависящая от температуры;  $\tau$  — время.

Впоследствии было указано на возможность более общего параболического закона роста:  $x^n = R_T\tau$ , где  $n = 3$  или иному дробному или целому числу. Практически для обработки результатов

экспериментов обычно используют параболическую зависимость при  $n=2$ . Такая кинетика роста прослоек химических соединений в твердом состоянии отвечает многим случаям диффузионной кинетики, устанавливаемой уравнением диффузии Фика.

Исследование скорости роста прослойки химических соединений при пайке проводят на образцах по ГОСТ 21548—76.

Для определения периода активации роста прослойки при заданной температуре используют метод последовательных приближений.

Для торможения роста прослойки химических соединений в припой необходимо ввести достаточно малое количество нового компонента, более активно химически взаимодействующего с основным материалом, чем компоненты припоя, и образующего барьерный слой химического соединения малой толщины, не ухудшающего механических свойств соединения [15, 22].

## **6. ОХРУПЧИВАНИЕ ПАЕМОГО МЕТАЛЛА В КОНТАКТЕ С ЖИДКИМ ПРИПОЕМ**

При наличии в паемом металле растягивающих напряжений, возникающих при его наклепе, образовании неравновесных структур или концентрационных изменений в них, температурном градиенте в контакте паемого металла с жидким припоем может наступить охрупчивание  $M_k$  и образование в нем трещин.

Многие исследователи связывают самопроизвольное хрупкое разрушение твердых металлов при контакте их с жидкими только с поверхностным фактором — уменьшением поверхностного натяжения твердого тела (эффект адсорбционного понижения прочности и пластичности, эффект Ребиндера). Вместе с тем авторы работы [12] указывают на возможность решающего значения объемного фактора и фактора, связанного с напряженным состоянием и растворением твердого металла в жидком. Полагают, что при этом в процессе образования трещин происходит спонтанная релаксация напряжений растяжения.

Наиболее сильное охрупчивание и понижение прочности имеют место при контакте твердых материалов с жидкими и с аналогичной химической связью (металлы с металлическими расплавами, ионные кристаллы с расплавами солей). Потеря прочности или пластичности особенно резко проявляется при контактно-реактивном плавлении металлов, находящихся под действием растягивающих напряжений. Оказалось, что во многих случаях самопроизвольное разрушение твердых металлов в контакте с жидкими сопровождается химической эрозией по границам твердых зерен, хотя наблюдаются разрушения и без видимого проникновения жидких металлов по границам твердых, а также в монокристаллах.

Опыт показал, что остаточные растягивающие напряжения при пайке деталей из одинакового материала  $M_k$  могут быть устранены

в процессе пайки при применении припоев с температурой плавления выше температуры снятия остаточных напряжений при достаточной длительности нагрева изделия.

Развитие хрупкого разрушения происходит только в условиях непрерывного поступления жидкой фазы к вершине трещины со скоростью не меньше скорости ее раскрытия.

Анализ данных по охрупчиванию твердых металлов в контакте с жидкими дает основание считать, что причины самопроизвольного и вынужденного хрупкого разрушения весьма разнообразны.

Метод оценки склонности паяемого материала к охрупчиванию в контакте с жидким припоем дан в ГОСТ 20487—75. Экспериментальные данные показывают, что охрупчивание паяемого металла  $M_k$  в контакте с жидким припоем  $M_n$  в условиях растягивающих напряжений имеет место при пайке никеля припоем ПСр 15, фосфористых, кремниевых, никелевых бронз и латуней легкоплавкими припоями. По данным Н. А. Барескова [12], наименьшей чувствительностью к охрупчиванию при пайке медными припоями обладают двухфазные аустенитно-ферритные стали с содержанием 20—60 %  $\delta$ -феррита.

Сталь 12Х18Н10Т содержит до 20 %  $\delta$ -феррита. Наиболее склонны к хрупкому разрушению в контакте с медными припоями в условиях действия растягивающих напряжений, в том числе в местах, подвергнутых пластической деформации или наклепу, стали 12Х18Н10Т (содержание  $\delta$ -феррита  $< 20$  %) и 09Х164Б. При пайке припоем ПСр 72 трубок из стали 12Х18Н9Т в местах их изгиба или сборки в замок со значительной пластической деформацией кромок или при контактно-реактивной пайке гальванически посеребренных поверхностей сталей с медным листом происходит растрескивание стали с заполнением трещин припоем.

## 7. ТЕМПЕРАТУРА РАСПАЙКИ

Физико-химическое взаимодействие между паяемым материалом и припоем при пайке является необратимым процессом и сопровождается изменением химического состава и свойств в зоне паяного шва и диффузионной зоны. Эти изменения в зависимости от характера взаимодействия  $M_k$  и  $M_n$  могут быть незначительными или весьма существенными. Они возникают в процессе пайки, а также после пайки при гомогенизирующем отжиге паяного соединения или при высокотемпературной эксплуатации.

Изменение химического состава шва вызывает, в частности, изменение его температуры солидуса и ликвидуса и ширины температурных интервалов твердого и жидкотвердого состояния, которые во многих случаях могут существенно отличаться от температуры солидуса и ликвидуса припоя.

Температурный уровень работоспособности паяного соединения в значительной степени определяется температурой солидуса шва, так как вблизи и выше этой температуры резко уменьшается прочность и пластичность соединения. Структура и состав паяного

шва по его сечению неоднородны, поэтому в качестве температуры распайки шва принимают температуру выше температуры солидуса, при которой происходит кратковременное разрушение шва под давлением, характерным для большинства сплавов в твердожидком состоянии и равном примерно 0,098—0,196 МПа.

Возможность повышения температуры распайки швов не только повышает температуру их работоспособности, но позволяет осуществлять ступенчатую пайку, а также подпайку и ремонт одним и тем же припоем.

Характер изменения температуры солидуса паяного шва по сравнению с температурой солидуса припоя определяется его физико-химическим взаимодействием с паемым металлом, режимом и способом пайки.

Если основы паемого материала и припоя или их компоненты образуют эвтектики или непрерывный ряд твердых растворов с минимумом, то при пайке с затвердеванием паяного шва при охлаждении температура распайки обычно понижается. При диффузионной пайке температура распайки повышается: если припой и паемый металл имеют весьма слабое химическое сродство и не растворяются друг в друге в твердом состоянии, то температура распайки шва обычно находится в температурном интервале плавления припоя.

Стандартная методика определения температуры распайки паяных соединений по ГОСТ 21547—76 состоит в том, что образец, паянный внахлестку по заданному режиму, подвешивают за верхнюю половину в приспособлении, обеспечивающем требуемую скорость нагрева до температуры испытания и газовую среду.

При испытании температура шва определяется с помощью термпары, горячий спай которой предварительно крепят в глухом отверстии одной из половин образца с внешней стороны нахлестки. Термопару подключают к регистрирующему потенциометру КСП4. Температуру распайки образца, находящегося под напряжением при постоянном давлении 10 кПа (с учетом массы нижней половины образца), определяют в процессе его нагрева [23].

Образцы из стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм, паянные внахлестку в чистом проточном аргоне самофлюсующим припоем ВПр-2 с шириной зазора 0,10 мм по режиму  $t_n = 1050^\circ\text{C}$ ,  $\tau_n = 5$  мин, подвергали распайке при нагреве в чистом проточном аргоне в электропечи со скоростью нагрева  $20^\circ\text{C}$ . Температуру распайки фиксировали при киносъемке показаний потенциометра ЭПВ и сигнальной лампочки. Испытания на 17 образцах показали, что температура распайки составляет  $1150\text{—}1195^\circ\text{C}$  ( $t_{cp} = 1168^\circ\text{C}$ ), а температура плавления припоя  $970^\circ\text{C}$ .

Температура распайки швов нахлесточных соединений из алюминия, плакированного силумином (АПС), паянных без флюса на воздухе с предварительным лужением паемой поверхности припоем П200А (Sn — 10 % Zn) при слое полуды толщиной 10 мкм, находится в пределах  $583\text{—}600^\circ\text{C}$ , а образцов из того же мате-

риала, выполненных способом контактно-реактивной пайки в проточном аргоне через термовакуумное медное покрытие толщиной 10 мкм,— в интервале 570—598 °С.

К настоящему времени данные о температуре распайки соединений пока весьма ограничены.

## 8. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПАЕМОГО МЕТАЛЛА С ПРИПОЕМ

Совместимость  $M_k$  и  $M_n$  прежде всего зависит от характера физико-химического взаимодействия их металлических основ, определяемого диаграммой состояния. Хотя диаграмма состояния характеризует зависимость структуры сплавов от их химического состава и температуры лишь в равновесных условиях, термодинамически неравновесная система паяемый металл — припой в условиях пайки стремится к стабильному или метастабильному равновесию, и поэтому диаграмма состояния с учетом кинетического фактора позволяет прогнозировать направление развития физико-химических процессов на их границе и в шве как при пайке, так и при эксплуатации паяных соединений.

На рис. 52 представлены типы диаграмм состояния двойных систем, расположенные в порядке возрастания химической связи между элементами  $A$  и  $B$ .

Результаты анализа влияния характера диаграммы состояния основ паяемого материала и припоя на контактные процессы их взаимодействия — смачивание, химическую эрозию, газовую и диффузионную пористость, образование прослоек химических соединений, охрупчивание паяемого металла в контакте с жидким припоем, температуру распайки — приведены в работе [16].

При отсутствии химической связи компоненты системы  $A$  и  $B$  не образуют между собой сплавов ни в твердом, ни в жидком состоянии (рис. 52,  $a — д$ ). По мере возрастания химической связи компоненты  $A$  и  $B$  образуют ограниченные жидкие (рис. 52,  $e$ ),

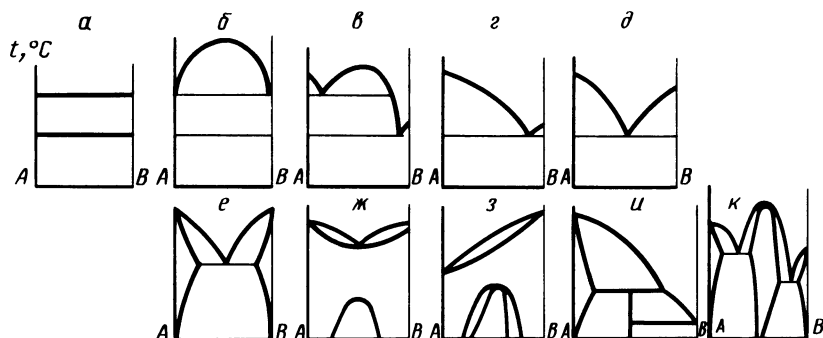


Рис 52. Типы диаграмм состояния двойных систем сплавов, расположенные в порядке возрастания химического сродства  $A$  и  $B$

Таблица 36. Фактическая и прогнозируемая физико-химическая совместимость

| Материал                     | Основа готовых припоев |                       |                     |                     |                     |                     |                       |                     |                   |  |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|--|
|                              | Ga                     | Bi                    | Sn                  | Sn—Pb               | Sn—Zn               | Pb                  | Cd                    | Zn                  | Mg                |  |
| Zn                           | (C <sub>6,4</sub> )    | (C <sub>6,3</sub> )   | C <sub>6</sub>      | (C <sub>6</sub> )   | (C <sub>6</sub> )   | C <sub>6</sub>      | C                     | H <sub>7</sub>      | H <sub>7</sub>    |  |
| Магниевые сплавы             | (C <sub>5,3</sub> )    | (C <sub>5,3</sub> )   | H <sub>5,3</sub>    | H <sub>5,3</sub>    | H <sub>5,3</sub>    | H <sub>5,3</sub>    | C <sub>10</sub>       | C <sub>5</sub>      | C                 |  |
| Алюминиевые сплавы:          |                        |                       |                     |                     |                     |                     |                       |                     |                   |  |
| АД1                          | C <sub>6,4</sub>       | C <sub>8</sub>        | C <sub>8,6</sub>    | C <sub>8,6</sub>    | C <sub>8</sub>      | C <sub>8</sub>      | (C <sub>1,2,4</sub> ) | C                   | H <sub>5</sub>    |  |
| АМц                          | C <sub>6,4</sub>       | C <sub>8</sub>        | C <sub>8,6</sub>    | C <sub>8,6</sub>    | C <sub>8</sub>      | C <sub>8</sub>      | (C <sub>1,2,4</sub> ) | C                   | H <sub>5</sub>    |  |
| АМг2                         | (C <sub>6,4</sub> )    | (C <sub>8</sub> )     | C <sub>8</sub>      | C <sub>8</sub>      | C <sub>8</sub>      | C <sub>8</sub>      | (C <sub>1,2,4</sub> ) | C                   | H <sub>5</sub>    |  |
| АМг6                         | (C <sub>4,6</sub> )    | (C <sub>8</sub> )     | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>2,4</sub> )   | C                   | H <sub>5</sub>    |  |
| АВ                           | (C <sub>4,6</sub> )    | (C <sub>8</sub> )     | (C <sub>8,6</sub> ) | (C <sub>8,6</sub> ) | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>2,4</sub> )   | (C)                 | H <sub>5</sub>    |  |
| Д20                          | (C <sub>4,6</sub> )    | (C <sub>8</sub> )     | (C <sub>8,6</sub> ) | (C <sub>8,6</sub> ) | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>8</sub> )   | (C <sub>2,4</sub> )   | (C)                 | H <sub>5</sub>    |  |
| Ag                           | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>3</sub> )     | (C <sub>5,3</sub> ) | (C <sub>3,5</sub> ) | (C <sub>5,3</sub> ) | (C <sub>3,5</sub> ) | (C <sub>3,5</sub> )   | (C <sub>3,5</sub> ) | (H <sub>5</sub> ) |  |
| Au                           | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>5,3</sub> )   | C <sub>5,3</sub>    | C <sub>5,3</sub>    | (C <sub>5,3</sub> ) | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )     | (C <sub>5</sub> )   | (H <sub>5</sub> ) |  |
| Медь М1                      | C <sub>5</sub>         | (C <sub>6</sub> )     | C <sub>5</sub>      | C <sub>5</sub>      | C <sub>5,3</sub>    | C <sub>2,6</sub>    | C <sub>5</sub>        | C <sub>5</sub>      | H <sub>5,3</sub>  |  |
| Латунь Л63                   | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>6</sub> )     | C <sub>5</sub>      | C                   | (C)                 | C <sub>2</sub>      | C <sub>5,3</sub>      | (C <sub>3</sub> )   | H <sub>5</sub>    |  |
| Оловянная бронза (Cu—20% Sn) | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>6</sub> )     | C <sub>5</sub>      | C                   | (C)                 | C <sub>2</sub>      | C <sub>5,3</sub>      | (C <sub>3</sub> )   | H <sub>5</sub>    |  |
| Титановые сплавы:            |                        |                       |                     |                     |                     |                     |                       |                     |                   |  |
| BT1                          | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>5</sub> )     | C <sub>5</sub>      | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )     | (C <sub>3</sub> )   | (C)               |  |
| OT4                          | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>5</sub> )     | C <sub>5</sub>      | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )     | (C <sub>3</sub> )   | (C)               |  |
| BT14                         | (C <sub>5</sub> )      | (C <sub>5</sub> )     | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5,3</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C)               |  |
| Сталь:                       |                        |                       |                     |                     |                     |                     |                       |                     |                   |  |
| 08кп                         | (C)                    | (C <sub>1,2,6</sub> ) | (C <sub>2,6</sub> ) | (C <sub>5,6</sub> ) | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>1,6</sub> ) | (C <sub>2</sub> )     | (H <sub>5</sub> )   | (C <sub>2</sub> ) |  |
| 10                           | (C)                    | (C <sub>1,2,6</sub> ) | (C <sub>2,6</sub> ) | (C <sub>5,6</sub> ) | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>1,6</sub> ) | (C <sub>2</sub> )     | (H <sub>5</sub> )   | (C <sub>2</sub> ) |  |
| 45                           | (C)                    | (C <sub>1,2,6</sub> ) | (C <sub>2,6</sub> ) | (C <sub>5,6</sub> ) | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>1,6</sub> ) | (C <sub>2</sub> )     | (H <sub>5</sub> )   | (C <sub>2</sub> ) |  |
| 12X18H10T                    | (C)                    | (C <sub>1,2,6</sub> ) | (C <sub>2,6</sub> ) | (C <sub>5,6</sub> ) | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>1,6</sub> ) | (C <sub>2</sub> )     | (H <sub>5</sub> )   | (C <sub>2</sub> ) |  |
| 08X13                        | (C)                    | (C <sub>1,2,6</sub> ) | (C <sub>2,6</sub> ) | (C <sub>5,6</sub> ) | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>1,6</sub> ) | C <sub>1,2</sub>      | H <sub>5</sub>      | H <sub>5</sub>    |  |
| Никелевые сплавы             | (C <sub>5</sub> )      | C <sub>3,5</sub>      | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>5</sub> )   | (C <sub>1,2</sub> ) | (C <sub>5</sub> )     | (C <sub>5</sub> )   | H <sub>5</sub>    |  |

Примечание. С — совместимы; С<sub>п</sub> — условно совместимы; Н — несовместимы, *n* = 1—9 (1 — адгезионная смачиваемость, 2 — плохое смачивание, затекание в зазор; 3 — общая химическая эрозия; 4 — межзеренная химическая эрозия, 5 — прослойки химических соединений, 6 — охрупчивание в контакте с жидким припоем; 7 — температура

ограниченные или неограниченные твердые (рис. 52, *е—з*) растворы. При сильной химической связи компоненты *A* и *B* способны к образованию неконгруэнтных химических соединений, плавящихся с разложением (рис. 52, *и*), и более химически прочных конгруэнтных химических соединений, плавящихся без разложения (рис. 52, *к*). Поэтому форма границы раздела основного металла и жид-

конструкционных материалов с основой готовых припоев при капиллярной пайке

| Al—Si—<br>—Cu                       | Al—Si                               | Ag                               | Au                               | Cu                               | Cu—P                             | Cu—Zr                            | Cu—Sn                            | Cu—Ni—<br>—Mn                    | Mn                               | Ni                               | Ti                               | Fe—Mn                            |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| H <sub>7</sub><br>H <sub>7,5</sub>  | H <sub>7</sub><br>H <sub>5,7</sub>  | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> |
| C <sub>9</sub><br>(C <sub>9</sub> ) | C<br>C                              | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> | H <sub>7</sub><br>H <sub>7</sub> |
| (C <sub>9</sub> )                   | C                                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| (C <sub>9</sub> )                   | H <sub>7</sub>                      | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| (H <sub>7</sub> )                   | H <sub>7</sub>                      | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| (C <sub>4</sub> )                   | H <sub>7</sub>                      | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| H <sub>5</sub><br>(C <sub>5</sub> ) | H <sub>5</sub><br>(C <sub>5</sub> ) | (C)                              | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| H <sub>5</sub>                      | H <sub>5</sub>                      | C                                | C                                | H <sub>7</sub>                   | C                                | C                                | C                                | (C <sub>3</sub> )                | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| H <sub>5</sub>                      | H <sub>5</sub>                      | C                                | (C)                              | H <sub>7</sub>                   | C                                | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| H <sub>5</sub>                      | H <sub>5</sub>                      | C                                | (C)                              | H <sub>7</sub>                   | C                                | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   | H <sub>7</sub>                   |
| C                                   | C                                   | C <sub>5</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | C <sub>5</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5</sub> )                | —                                | H <sub>7</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | C                                | (H <sub>7</sub> )                |
| C                                   | C                                   | C <sub>5</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | C <sub>5</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5</sub> )                | —                                | H <sub>7</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | C                                | H <sub>7</sub>                   |
| (C)                                 | (C)                                 | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5,3</sub> )              | C <sub>5</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5</sub> )                | (C <sub>5</sub> )                | —                                | H <sub>7</sub>                   | (C <sub>5</sub> )                | C                                | H <sub>7</sub>                   |
| C <sub>5</sub>                      | C <sub>5</sub>                      | C <sub>2</sub>                   | (C)                              | C                                | H <sub>5</sub>                   | C <sub>4,6</sub>                 | (C <sub>6</sub> )                | C                                | (C)                              | (C)                              | H <sub>7,5</sub>                 | C                                |
| C <sub>5</sub>                      | C <sub>5</sub>                      | C <sub>2</sub>                   | (C)                              | C                                | H <sub>5</sub>                   | C <sub>4,6</sub>                 | (C <sub>6</sub> )                | C                                | (C)                              | (C)                              | H <sub>7,5</sub>                 | C                                |
| C <sub>5</sub>                      | C <sub>5</sub>                      | C <sub>4,2</sub>                 | (C)                              | C                                | H <sub>5</sub>                   | C <sub>4,6</sub>                 | (C <sub>6</sub> )                | C                                | (C)                              | (C)                              | H <sub>7,5</sub>                 | C                                |
| C <sub>5</sub>                      | C <sub>5</sub>                      | C <sub>9,6,2</sub>               | (C)                              | (C)                              | H <sub>5</sub>                   | C <sub>4,6</sub>                 | C <sub>6</sub>                   | C                                | C <sub>3,9</sub>                 | C                                | H <sub>5</sub>                   | (C)                              |
| C <sub>5</sub>                      | C <sub>5</sub>                      | C <sub>8,9</sub>                 | (C)                              | C                                | H <sub>5</sub>                   | C <sub>4,6</sub>                 | C <sub>6</sub>                   | C                                | C <sub>3,9</sub>                 | C                                | H <sub>5</sub>                   | (C)                              |
| —                                   | (C <sub>1,2</sub> )                 | (C)                              | (C)                              | (C)                              | (C)                              | (C)                              | (C)                              | (C)                              | (C)                              | C                                | H <sub>5</sub>                   | (C)                              |

плавления и пайки выше температуры солидуса  $M_k$ , 8 — щелевая коррозия п. с., 9 — пониженная коррозионная стойкость, охрупчивание при хранении в результате упорядочения твердого раствора) В скобках приведена прогнозируемая совместимость

кого припоя после их взаимодействия и форма границы спая определяются характером взаимодействия  $M_k$  и  $M_n$ . Фактическая и прогнозируемая физико-химическая совместимость основ конструкционных материалов с основами припоев при капиллярной пайке приведена в табл. 36.

## Глава 7

# ПАЙКА ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 1. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Алюминий — металл, не имеющий полиморфного превращения, с относительно невысокой температурой плавления ( $660^{\circ}\text{C}$ ), легкий (плотность  $2,7 \text{ г/см}^3$ ), с высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и некоторых кислотах. При нагреве его модуль упругости быстро снижается, и поэтому алюминиевые конструкции при температурах  $250\text{—}300^{\circ}\text{C}$  и выше могут терять устойчивость. Температура солидуса применяемых в промышленности алюминиевых сплавов довольно низкая ( $500\text{—}640^{\circ}\text{C}$ ). Поэтому велика вероятность их перегрева, что при высокотемпературной пайке требует весьма узких интервалов нагрева. Температура рекристаллизации алюминия и его сплавов составляет  $250\text{—}300^{\circ}\text{C}$ , и при ней происходит разупрочнение алюминиевых сплавов, упрочненных предварительно наклепом.

Алюминиевые сплавы, упрочняемые по механизму дисперсионного твердения («старения»), при нагреве под пайку разупрочняются в результате коагуляции упрочняющих их фаз. В связи с этим пайке подвергают только алюминий и небольшое число деформируемых, термически необрабатываемых сплавов систем  $\text{Al—Si}$ ,  $\text{Al—Si—Mg}$ ;  $\text{Al—Mg—Si}$ ;  $\text{Al—Mg—Mn}$  и др. Практически не подвергаются высокотемпературной пайке деформируемые, термически обрабатываемые сплавы систем  $\text{Al—Cu—Mg}$  и  $\text{Al—Zn—Mg}$ , а также литейные сплавы систем  $\text{Al—Si—Mg}$ ;  $\text{Al—Cu—Si}$ ;  $\text{Al—Mg}$ ;  $\text{Al—Cu—Ti}$ ;  $\text{Al—Cu—Ti—Si}$ . Одной из причин этого является близость температур нагрева при закалке этих сплавов к температурам их солидуса и опасность вследствие этого перегрева паяемых сплавов. Закалка паяных соединений после пайки от более низких температур не обеспечивает достаточной прочности паяных соединений.

Алюминий с большинством легкоплавких элементов, составляющих основу легкоплавких припоев ( $\text{Sn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Na}$ ), образует монотектические диаграммы состояния, с весьма слабой взаимной растворимостью компонентов (кроме цинка, образующего с алюминием эвтектику при температуре  $382^{\circ}\text{C}$  и широкую область твердых растворов со стороны алюминия и олова). Поэтому низкотемпературная пайка алюминия и его сплавов применяется весьма ограниченно.

Большинство депрессантов алюминиевых припоев, таких, как Cu, Sn, Mn, Mg, Ti, имеют с алюминием высокое химическое сродство и образуют химические соединения, входящие в эвтектики. Такой компонент алюминиевых припоев, как кремний, образует с алюминием сплавы с простой, относительно пластичной эвтектикой.

Наиболее прочной является эвтектика с серебром ( $\sigma_{\text{в}} = 24,4$  МПа), а затем по мере убывания прочности располагаются эвтектики Al—Si—Cu; Al—Cu; Al—Ni; Al—Mg—Si. Наименее прочной является эвтектика Al—Mg—Cu ( $\sigma_{\text{в}} = 7,5$  МПа) [16].

Первые же попытки паять алюминий припоями и флюсами, пригодными для сталей и медных сплавов, потерпели неудачу. Этот металл и его сплавы не смачивались припоями, пригодными для пайки сталей и медных сплавов. Более двух десятилетий алюминий считали труднопаяемым и даже непаяемым металлом. Причина этого заключалась прежде всего в высокой химической стойкости его оксида.

Пленка оксида, образовавшаяся на воздухе при 20 °С, состоит из двух слоев. Внутренний слой оксида, прилежащий к металлу (барьерный), — компактный, с недостроенной кристаллической решеткой, т. е. аморфный, который может перейти в кристаллическую модификацию после длительной выдержки на воздухе или после двухчасовой выдержки при температуре выше 20 °С.

Наружный слой так называемой воздушно-оксидной пленки состоит из более проницаемого пористого оксида; его толщина зависит от продолжительности реакции и влажности окружающей атмосферы.

Наибольшая выдержка при температуре до  $\sim 500$  °С приводит к образованию аморфного оксида. После выдержки при температуре до 475 °С в течение 10—12 ч или после выдержки при температуре 500 °С в течение 2—4 ч наблюдается частичный переход оксида в кристаллическое состояние. Длительное окисление при температуре выше 475 °С ведет к полному переходу оксида в кристаллическое состояние.

После погружения в воду при температуре 60 °С на поверхности алюминия мгновенно образуется пленка байерита ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). При контакте с водой на поверхности алюминия образуется также гидрат оксида алюминия.

Состав и структура оксидной пленки, покрывающей алюминий, обуславливают ее свойства. При температуре 20 °С теоретическая плотность  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  по Р. К. Харту составляет 3,97 г/см<sup>3</sup>.

В интервале температур 0—100 °С средний коэффициент линейного расширения оксида алюминия  $\alpha = (6 \div 8) 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Температура плавления  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  составляет 2045 °С, температура кипения равна 2980 °С. Коэффициент его теплопроводности при температуре 20 °С  $\lambda = 30,145 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$ . Давление паров  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  при температуре его плавления равно  $45,5 \cdot 10 \text{ Па}$ ; давление диссоциации  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  при температуре 2000 °С —  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ , т. е.

оксид  $\text{Al}_2\text{O}_3$  практически не восстанавливается в используемых для этой цели газообразных средах и не испаряется при пайке. Этот оксид устойчив к действию воды и кислот.

На поверхности сплавов  $\text{Al—Mg}$  (с 2,8—8 %  $\text{Mg}$ ) при нагреве до 120 °С образуется пленка аморфного оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; при 120—350 °С —  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . При нагреве выше 400 °С растет двухслойная оксидная пленка: сверху оксид  $\text{MgO}$ , а под ним  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , что обусловлено большим давлением пара магния.

Вследствие перестройки кристаллической решетки и изменения физических свойств при нагреве до температуры пайки в оксиде алюминия возможны местные нарушения ее сплошности и другие дефекты, по которым может происходить контакт паяемого металла с жидким припоем.

Подготовка алюминиевых сплавов перед пайкой состоит из следующих операций: 1 — обезжиривания; 2 — травления в 10—15 %-ном  $\text{NaOH}$  при 60 °С; 3 — промывки в холодной воде; 4 — обработки в 20 %-ном растворе  $\text{HNO}_3$ ; 5 — тщательной промывки в проточной горячей и затем холодной воде; 6 — сушки горячим воздухом. Пайка проводится не позже чем через 6—8 ч после подготовки. При низкотемпературной пайке алюминий с чистой блестящей поверхностью можно паять без подготовки. После термообработки или плохих условий хранения необходима ее подготовка, а в некоторых случаях даже шлифование.

Обезжиривать поверхности деталей из алюминиевых сплавов перед пайкой можно в органических растворителях — бензине или ацетоне. Такие растворители пригодны для удаления неомыляемых щелочами жиров и маркировочных знаков. После сушки на воздухе в течение 10—20 мин процесс обезжиривания считается законченным. После предварительного обезжиривания толстый слой оксида может быть удален механически или химически.

Механическую очистку поверхности алюминиевых деталей и припоя проводят металлической щеткой или шлифовальной шкуркой. Детали, обработанные резанием, можно паять без дополнительной зачистки, но с обязательным удалением остатков эмульсии обезжириванием. Перед сборкой механически обработанные детали протирают бензином, этиловым спиртом или ацетоном.

Химическую обработку поверхности алюминиевых сплавов перед пайкой проводят в водных растворах едкого натра или едкого натра с кальцинированной содой и тринатрийфосфатом. Операция обезжиривания в таких растворах имеет пять переходов: травление в ванне, промывка в горячей воде (50—70 °С) в течение 30—40 с, осветление в 20—25 %-ном растворе азотной кислоты при температуре 17—28 °С в течение 10—20 с, промывка в горячей проточной воде и сушка в сушильном шкафу при температуре 80—100 °С в течение 20—30 с.

Алюминиевые сплавы перед пайкой можно травить и в 5 %-ном водном растворе  $\text{NaOH}$  при 150 °С в течение 10—15 с. При этом требуется тщательный контроль температуры.

Для травления алюминия и его сплавов может быть использован водный раствор 20 %-ной фосфорной и 10 %-ной азотной кислот со смачивающим агентом. Процесс травления осуществляют при погружении в раствор при температуре 80 °С с выдержкой 1 мин.

Детали из листов, плакированных силумином, могут быть подготовлены к пайке путем промывки их бензином, затем в 5—8 %-ном растворе каустической соды NaOH при температуре 60—80 °С, далее в холодной проточной воде и нейтрализованы в 10—15 %-ном растворе азотной кислоты (40—60 с) с последующей промывкой и сушкой в сушильном шкафу. После сушки на них могут быть водяные подтеки, которые не влияют на качество паяного соединения.

Подготавливают поверхности алюминия и его сплавов перед пайкой не позже чем за трое суток.

Подготовленные детали перед флюсовой пайкой собирают с равномерными зазорами шириной 0,15—0,3 мм. Фиксируют детали с учетом размеров и типа конструкции изделия и толщины его стенки путем установки деталей на место под действием собственной массы, точечной сваркой, свинчиванием, кернением, насечкой. Сложные изделия собирают и паяют в специальных прижимных и сборочных приспособлениях с механическими или пневматическими прижимами.

**Низкотемпературная пайка алюминия.** Пайку нагревом до температуры 450 °С проводят обычно оловянно-цинковыми, кадмиево-цинковыми и цинковыми припоями. Соединения из алюминия и его сплавов, паянные легкоплавкими припоями на основе олова или олова со свинцом, имеют низкую коррозионную стойкость как в условиях хранения, так и во всеклиматических условиях испытаний и в морской воде.

В 50—60-х годах было установлено, что склонность к коррозии может быть снижена при введении в легкоплавкие припой цинка. Однако существенного повышения коррозионной стойкости паяных соединений удастся достичь лишь при введении в эти припой  $\geq 50\% \text{Zn}$ . Вместе с тем подобное содержание цинка в оловянных и оловянно-свинцовых припоях приводит к существенному повышению температуры их полного расплавления ( $\geq 370\text{ °C}$ ). При ограничении температуры пайки 300 °С содержание цинка в припоях Sn—Zn не превышает 20 %. При содержании в припоях 30—40 % Zn частичная замена олова кадмием или кадмием и свинцом мало влияет на их температуру начала и конца кристаллизации.

Положительное влияние цинка на коррозионную стойкость соединений из алюминия и его сплавов, паянных оловянными или оловянно-свинцовыми припоями, по мнению Дж. Д. Дауда, обусловлено улучшением соотношения потенциалов паяемого металла и шва. Однако при этом важную роль играют процессы пассивирования, т. е. образования оксидной пленки на контактирую-

щих поверхностях металлов, тормозящие развитие коррозии. При развитии пассивирования соотношение потенциалов контактирующих металлов может и не оказывать существенного влияния на развитие коррозии. Развитие процессов пассивирования тормозится в узких зазорах между контактирующими металлами из-за затрудненного доступа в эти места кислорода, в результате чего в зазорах развивается щелевая коррозия.

Н. Ф. Лашко и С. В. Лашко высказали предположение, что развитие щелевой коррозии в соединениях из алюминия и его сплавов, паянных легкоплавкими припоями на основе олова или олово — свинец (отслоение шва от паяемого материала без видимых следов коррозии), связано с характером физико-химического взаимодействия олова и свинца с алюминием. Из двойных диаграмм состояния Al—Sn и Al—Pb следует, что при низкотемпературной пайке растворимость алюминия в олове и свинце весьма мала: при пайке алюминия такими припоями весьма слабо развивается диспергация оксидной пленки от мест ее разрушения. Это особенно проявляется при бесфлюсовой пайке с применением ультразвука или абразивной пайки. В результате этого связь между паяным материалом и швом осуществляется лишь по отдельным «мостикам» связи, между которыми располагаются невидимые для невооруженного глаза щели между паяным швом и основным материалом, по которым и протекает щелевая коррозия. При погружении паяного соединения в подсолненную воду образуются продукты коррозии (гидрооксиды), вызывающие изменение состава электролита, в результате чего снижается его pH, что способствует более интенсивному развитию коррозии.

С изложенной точки зрения, положительное влияние на коррозионную стойкость цинка в припоях с оловом и свинцом обусловлено повышением при этом растворимости в припое алюминия и, как следствие, более активным развитием процесса диспергации оксидной пленки на поверхности алюминия при низкотемпературной пайке. Процессу диспергации способствуют также повышение температуры и длительности выдержки при пайке, а также введение в припой других элементов, обладающих достаточно высоким химическим сродством к алюминию, в том числе образующих с ним химические соединения, особенно выше температуры пайки. К таким элементам с высоким химическим сродством к алюминию относятся серебро, сурьма, никель, а также медь, титан, магний, литий и др.

Слабо взаимодействуют с алюминием не только олово и свинец, но и кадмий. С. В. Лашко и В. П. Батраковым показано, что в этом случае введение цинка благоприятно для повышения коррозионной стойкости паяного соединения; припой ПЗ00А (60 % Zn—40 % Cd) образует с алюминиевым сплавом АМц коррозионно-стойкие паяные соединения, которые не снижают механических свойств после пребывания их в камере тропической атмосферы в течение четырех месяцев и в условиях полупромышленной атмосферы в

течение девяти месяцев. Наиболее коррозионно-стойкими в этих условиях являются соединения из алюминиевого сплава АМц, паянные припоями  $\text{Zn—20 \% Al}$  и  $\text{Zn—15 \% Cu}$  (П425А и П480А).

Исследования показали, что при ускоренных коррозионных испытаниях в растворе дистиллированной воды с 3 %  $\text{NaCl}$  и 0,1 %  $\text{H}_2\text{O}_2$  при 20 °С время до разрушения образцов из алюминиевого сплава АМц, паянного припоями  $\text{Sn—Pb}$ ,  $\text{Sn—10 \% Zn}$ :  $\text{Sn—15 \% Pb—7 \% Cd}$ , измеряется десятками часов, а паянных наиболее коррозионно-стойким припоем  $\text{Zn—5 \% Al}$  — тысячами часов. Введение в цинково-алюминиевый припой добавок олова, кадмия, свинца ухудшает коррозионную стойкость паяных соединений из алюминия: добавки хрома, меди, никеля, сурьмы, серебра способствуют ее повышению.

Для пайки алюминия и его сплавов используют припои системы  $\text{Pb—Zn}$ ,  $\text{Zn—Cd}$ ,  $\text{Sn—Pb—Zn}$ . Припои типа 63 %  $\text{Pb—34 \% Sn—3 \% Zn}$  обеспечивают лишь низкую коррозионную стойкость паяных соединений: припои 60 %  $\text{Zn—40 \% Cd}$  и 70 %  $\text{Zn—30 \% Sn}$  — среднюю их коррозионную стойкость, а припои  $\text{Zn—5 \% Al}$  и 100 %  $\text{Zn}$  — высокую коррозионную стойкость паяных соединений. Цинковый припой  $\text{Zn—5 \% Al}$  имеет соответственно температуру плавления 381 °С и температуру пайки 421—427 °С.

Наилучшими припоями, обеспечивающими наиболее высокую коррозионную стойкость и прочность, являются сплавы с 70—95 %  $\text{Zn}$  с добавками серебра, меди, алюминия. К недостаткам таких припоев относится относительно высокая температура пайки (370—510 °С), при которой наклепанный или нагартованный алюминий может отжигаться. При пайке этими припоями пригоден нагрев как газопламенный и погружением, так и в печи. Важнейшими технологическими особенностями пайки с этими припоями является необходимость кратковременного их нагрева ( $< 1$  с) и небыстрого перегрева (не выше 25 °С).

Соединения из алюминия и его сплавов, паянные припоями на основе олова или олово — свинец, могут использоваться только после нанесения на них специальных лакокрасочных покрытий или в вакууме, инертных газовых средах. Соединения, паянные цинковыми припоями, изготовленными из цинка с повышенным содержанием примесей олова, свинца, сурьмы, кадмия, склонны к развитию в паяных швах межкристаллитной коррозии, и поэтому такие припои для пайки алюминиевых сплавов, особенно для пайки изделий, работающих в кипящей воде, изготавливают из цинка чистоты 99,99.

Кроме того, цинковые припои склонны к межзеренной химической эрозии паемых алюминиевых сплавов: введение в цинковые припои алюминия ( $> 4$  %) снижает межзеренное проникновение припоя в паемый материал при условии строгого соблюдения термического режима пайки. Введение хрома способствует измельчению зерна цинковых припоев.

Для улучшения смачивающей способности и упрочнения цинко-

Т а б л и ц а 37. Легкоплавкие припои для пайки алюминия и его сплавов

| Основа      | Содержание легирующих элементов, %                                     | Температура плавления, °С | Примечание  |
|-------------|--|---------------------------|---|
| Sn          | 0,3—3 Bi; 0,5—2 Cu; 0,5—2 Ni; 0,3—2 Mg; Zn — 37,4—63,0                 | 160—250                   | Повышенная прочность паяного соединения   |
| Sn          | 7—9 Zn; 6—8 Bi; 2,4—4 Sb   | —                         | Повышенная коррозионная стойкость паяных соединений   |
| Sn          | 3—5 Zn; 2 Mg; 2 Ag; 2 Cu   | —                         | То же   |
| Sn          | 18—20 Cd; 0,5—1 Ag; 0,5—1 Ga   | —                         | Повышенная коррозионная стойкость паяных соединений   |
| Sn          | 1,5—2 Zn; ≤ 1,5 Ag; 0,1—5 Cu; 0,5—7 Mg                                 | 350                       | Повышенная коррозионная стойкость паяных соединений   |
| Sn          | 35—48 Zn; 0,5—1,5 Al; 0,1—0,8 Si; 0,5—1,1 Cu; 0,02—2,2 PЗМ             | < 350                     | Средняя коррозионная стойкость паяных соединений. Для абразивной пайки с газопламенным нагревом   |
| Pb          | 1—10 Sn; ≤ 5 Ag; ≤ 0,1 Sb  | —                         | Повышенная коррозионная стойкость паяных соединений   |
| Pb          | 3—15 Sb; 0,115 Zn; 0,1—5 Ag; примеси < 0,05 %                          | 250—360                   | Для ультразвуковой, вакуумной и флюсовой пайки; нагрев — погружением или в печи   |
| Pb          | 5—30 Sn; 1—10 Bi; 0,5—5 Ag   | —                         | Повышенная коррозионная стойкость паяных соединений   |
| Sn          | 20—40 Zn; 10—57 Cd   | 300                       | Для флюсовой пайки  |
| Zn          | 40—50 Cd; 1—8 Cu; 2—10 Sn; 0,5—1,5 Ga; 0,5—1 Ag; 0,5—1,5 Al            | 350                       | Повышенная коррозионная стойкость паяных соединений. На алюминий предварительно наносят цинк, никель, медь химическим, гальваническим или термовакуумным способами. Нагрев при пайке газопламенным или паяльником |
| Zn          | 7,5—11,5 Al; 3,5—4,5 Cu; 0,005—0,2 Be; примеси < 0,3                   | 440 *                     | Высокая коррозионная стойкость паяных соединений. Соединения не корродируют в кипящей воде в течение 100 ч  |
| Zn (99, 99) | 3—7 Al; 0,2—3 Cr   | —                         | То же   |
| Zn          | 5—7 Al; 0,5—1 Cu; 0,005—0,5 Mg; 0,05—0,1 Mn; 0,1—0,4 Ni; 0,05—0,2 Cr** | 440                       | Высокая коррозионная стойкость паяных соединений. Припой технологичен и не изменяет цвета   |
| Zn          | 7,5—11,5 Al; 3,5—4,5 Cu; 0,005—0,2 Be; примеси < 0,3; 4,3              | 440                       | Высокая коррозионная стойкость паяных соединений. Швы не корродируют в кипящей воде в течение 100 ч. Для паяного соединения $\sigma_s = 171$ МПа  |

|    |   |         |   |
|----|---|---------|---|
| Zn | 3—6 Al; 1,5—3,5 Cd; 1—2 Mg  | <450    | Высокая коррозионная стойкость в промышленной атмосфере                           |
| Zn | 3—7 Al; 0,5—1 Ag; 0,005—0,015 Mg; 0,005—0,1 Ni; 0,05—0,2 Cr; 0,005—0,2 Si; 0,001—0,05 Be; металл*** | 440     | Высокая коррозионная стойкость паяных соединений для ультразвуковой пайки, прочны |
| Zn | 7,5—11,5 Al; 3,5—4,5 Cu; 0,005—0,2 Be; примеси <0,3   | 440 *   | Соединения не корродируют в кипящей воде. Для печной пайки                        |
| Zn | 3—4,5 Al; 1—3 Ag; 0,1—0,8 Mg  | 330—420 | Паяные швы не склонны к межкристаллитной коррозии                                 |
| Zn | 3—7 Al; 0,3—2 Cr  | —       | Для флюсовой пайки. Склонны к усадке  |
| Zn | 0,5—1,5 Al; 0,1—0,8 Si; 0,02—2,2 PЗМ; 0,5—1,1 Cu; 27,9—44,6 Sn                                      | —       | Для абразивной пайки с газопламенным нагревом                                     |
| Zn | 17,2—40 Al; 4—15 Cu; 0,2—2,2 Ag   | <450    | То же   |
| Zn | 34 Cd   | 265—305 | Для ультразвуковой пайки труб погружением   |

\* Температура пайки.

\*\* Может содержать 0,01—0,1 Ti.

\*\*\* Соотношение Be и мышьяка от 1 : 1 до 1 : 10.

вых припоев для пайки алюминиевых сплавов А. Г. Спасским и Г. К. Смирновым предложено легировать их галлием. Исследования показали, что введение в припой Sn—40 % Zn галлия в количестве 1,5 % повышает его временное сопротивление разрыву от 68,6 до 98 МПа, не влияя на его удельное электросопротивление и не снижает коррозионную стойкость паяного соединения. Однако увеличение содержания галлия в припое выше 1,5 % резко снижает прочность припоя и его коррозионные свойства. Показано, что соединения из сплавов Д16 и АМг6, паянные припоем с 1,5 % Ge, выдерживают вибрационную нагрузку при ускорении 5—10 g, частоте 2000 Гц и циклическом нагреве от —60 до 60 °С, а также вакуум-плотны при давлении до  $1,33 \times 10^{-1}$  Па, но должны быть защищены лакокрасочными покрытиями.

В табл. 37 приведены составы легкоплавких припоев для пайки алюминия и его сплавов, предложенные в последние годы за рубежом. Необходимо при этом отметить, что припой Sn — (18—20) % Cd — (0,5—1) % Ag — (0,5—1,5) % Ga образует паяные соединения из алюминиевого сплава АМц, выдерживают частоту 20—2000 Гц, пере-

грузки в 35 g длительностью 1—10 мкс, а также термоциклирование от  $-60$  до  $+60$  °C; паяные соединения вакуум-плотны при давлении от  $1,33 \cdot 10^{-3}$  до  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па.

Для цинковых припоев характерна не только интенсивная межзеренная, но и общая химическая эрозия алюминия и его сплавов.

Считают, что введение в оловянные припои меди, никеля, магния, цинка, сурьмы также повышает их прочность и легкоплавкость. Добавки магния, образующего соединение  $Mg_2Si$ , упрочняют паяное соединение.

*Флюсовая пайка.* Реактивно-флюсовая пайка алюминия получила развитие лишь в 1935—1936 гг. Реактивные флюсы предназначались для реактивно-флюсовой низкотемпературной пайки алюминиевых сплавов без готового припоя и содержали в основном хлорид олова. Такие флюсы нашли применение для пайки алюминиевых кабелей. При низкотемпературной пайке алюминия и его сплавов с реактивными флюсами в качестве припоев могут быть использованы сплавы: 1) 70 % Zn и 30 % Sn и 2) 95 % Zn и 5 % Al, с нагревом в пламени, в печи или погружением.

Перед пайкой место соединения покрывают реактивным флюсом. При газопламенном нагреве флюс во избежание перегрева шва не должен соприкасаться с пламенем. После образования газообразных продуктов реакции в виде белого дыма и проникновения восстановленного жидкого металла в зазор соединения охлаждается, а остатки флюса немедленно смываются.

Флюсы с хлоридом аммония имеют преимущества по сравнению с флюсами, содержащими HCl. При применении  $SnCl_2$  в реактивных флюсах вместо  $ZnCl_2$  температура восстановления металла снижается, а гигроскопичность флюса с хлоридом олова меньше, чем флюса с хлоридом цинка. Пары  $AlCl_3$  разрывают оксидную пленку, а восстановленные легкоплавкие металлы контактно плавят алюминий.

Для низкотемпературной пайки алюминия используют флюсы, приведенные в табл. 31 [12]. Среди них флюс Ф54А обеспечивает лучшее затекание в зазор припоя П250А и растекание его по алюминию и цинковому покрытию, но, по данным В. И. Павлова, он менее активен при пайке алюминия с медью, латунью, сталью, чем флюсы с солью висмута, например: 7,1 % бромид висмута, 47,9 % уксусной кислоты, олеиновая кислота — остальное. Температурный интервал активности флюса 290—380 °C. Остатки этого флюса не вызывают коррозии паяных соединений в полупромышленной атмосфере.

Экзотермическую пайку алюминия проводят в флюсовых ваннах при погружении в жидкий расплав реактивных флюсов. Паяемые детали погружают в ванну при перегреве припоя на 50—100 °C, а при экзотермической пайке с локальным нагревом — строго в соответствии с графиком процесса. При пайке крупногабаритных изделий необходим их подогрев для сокращения времени пребывания изделия в ванне с жидким флюсом.

При пайке низкотемпературных алюминиевых сплавов с органическими флюсами рекомендуемая ширина паяльного зазора 0,12—0,37 мм, а с солевыми неорганическими флюсами — 0—0,20 мм.

*Бесфлюсовая пайка.* Единственным способом бесфлюсовой низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов до середины 30-х годов была так называемая шаберная пайка, при которой предварительно лудили паяемую поверхность с помощью шабера, удаляя острым концом под слоем жидкого легкоплавкого припоя верхний слой металла вместе с оксидом  $Al_2O_3$ .

Это направление в технологии низкотемпературной пайки алюминия получило впоследствии дальнейшее развитие. Оксидную пленку с поверхности алюминия удаляют не только шабером, но и металлическими щетками, абразивными частицами, погруженными в расплавленный припой и разрушающими оксидную пленку в процессе обратнопоступательного или вращательного перемещения их по облуживаемой поверхности.

Для лужения деталей легкоплавкими припоями их нагревают на 20—40 °С выше температуры плавления припоя. Лужение проводят абразивным прутком (карандашом) или кругами, металлической сеткой, растирая жидкий припой по паяемой поверхности с помощью ветоши или асбеста до металлического блеска и отсутствия лысин. Для лужения обычно применяют припой с температурой плавления ниже 350 °С. После абразивного лужения в условиях отсутствия пыли, попадания жиров хранение деталей возможно до 5 сут, а в полиэтиленовых мешках — до 30 сут.

Другими способами бесфлюсовой низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов являются ультразвуковая и абразивно-кавитационная пайка (с предварительным лужением).

При ультразвуковой (УЗ) пайке кавитация в припоях возможна при введении в них энергии ультразвуковых колебаний частотой 18—60 кГц при интенсивности излучения  $(8—10) \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. При этом в жидком припое возникают макро- и микропотоки, уносящие частицы оксидов, перемешивающие его и обеспечивающие воздействие на твердые частицы абразива или первичные кристаллы, находящиеся в припое при его жидкотвердом состоянии.

При пайке алюминия в УЗ ваннах с оловом при интенсивности колебаний более 9,5 Вт/см<sup>2</sup> и температуре 280 °С наступает кавитация и развивается УЗ эрозия. Особенно сильная УЗ эрозия алюминия имеет место в придонной области ванны: с повышением температуры она усиливается. Интенсивность УЗ колебаний при пайке, обеспечивающая УЗ лужение, зависит также от состава припоя. В припое П250А интенсивность УЗ колебаний должна быть ниже 14 Вт/см<sup>2</sup>, в припое Sn—50 % Zn — ниже 1 Вт/см<sup>2</sup>, в олове, содержащем ферротитан, — 9,5 Вт/см<sup>2</sup> (при температуре ниже 300 °С). Длительность лужения менее 1 с.

Ультразвуковое лужение алюминия — малопроизводительный процесс, особенно при сложной форме поверхности.

В качестве абразивных частиц при кавитационно-абразивной пайке может быть использован порошок ферротитана дисперсностью 0,6—1,4 мм в количестве 1—7 % массы припоя. В припоях систем Sn—20 % Zn, Sn—50 % Zn с широким интервалом затвердевания ту же роль могут играть первичные кристаллы цинка (ниже температуры ликвидуса, в котором первичные кристаллы еще не образуют при срастании жесткого скелета).

Полное абразивно-кавитационное облуживание образца алюминия в припое Sn—50 % Zn при 300 °С происходит за 10 с при интенсивности колебаний  $I=2$  Вт/см<sup>2</sup> и малой глубине эрозии (0,007 мм), т. е. значение глубины эрозии того же порядка, что и при абразивном лужении. Способ успешно использован, например, при пайке многожильных проводов с медными наконечниками.

Локальное горячее лужение алюминиевой ленты возможно при нанесении на облуживаемый участок флюса и пропускании ленты через пару нагревательных валков. Расплавленный припой подается на поверхность ролика и через него на подлежащий лужению участок.

Предложен ряд других способов низкотемпературной пайки алюминия и его сплавов.

На поверхность алюминиевого сплава, очищенную от оксидной пленки, может быть нанесен канифольно-спиртовой флюс. Для этого деталь погружают в ванну, состоящую из двух жидких несмешивающихся слоев, обладающих весьма ограниченной взаимной растворимостью: раствора HF (снизу) и раствора канифоли в этиловом спирте (сверху). Деталь, выдержанная в растворе HF в течение ~3 мин, в верхней части ванны покрывается слоем канифольно-спиртового флюса и в таком виде может быть запаяна легкоплавкими припоями.

Для получения паяных соединений из алюминия и его сплавов с высокой коррозионной стойкостью в реактивный флюс с хлоридом цинка вводят ингибитор (0,12—1,69 %)  $\text{CuCl}_2$  и жидкий алифатический кетон с молекулярной массой 184 (22,5—37,5 %).

В таком флюсе (паяльной жидкости), нагретом до температуры 260—345 °С, паяют погружением пластинчатые радиаторы. Образование и плавление припоя завершается в результате теплоты экзотермической реакции между  $\text{ZnCl}_2$  и алюминием.

*Низкотемпературная пайка по покрытиям.* Один из путей повышения коррозионной стойкости паяных соединений из алюминиевых сплавов при пайке их легкоплавкими припоями — нанесение барьерных покрытий металлов, имеющих большое химическое сродство к алюминию и совместимых с припоями. К таким покрытиям относятся цинковые, никелевые и медные.

Покрытие может быть нанесено плакированием, а также химическими и электролитическими методами, термовакuumным и ионным напылением.

Слои меди или никеля, нанесенные электролитическим спосо-

бом на алюминиевые сплавы АМц и особенно АМг, могут отслаиваться от поверхности и вспучиваться при нагреве до температуры 200 °С и выше. Более надежно ионное напыление алюминиевых сплавов никелем в специальных гипофосфитных растворах или в ванне, состоящей из 400 г/л хлористого никеля, 20 г/л фтористоводородной кислоты и 40 г/л борной кислоты. При этом не требуется специального подогрева и в ванне нет резких колебаний значений рН. Никелирование в растворе хлористого никеля возможно в монтажных условиях: достаточно нанести на поверхность металла несколько капель раствора, чтобы произошло удаление оксидной пленки алюминия и выделение никеля.

Для улучшения адгезии никелевого слоя к поверхности алюминиевого сплава применяют термообработку (нагрев до температуры 250 °С в течение 2 ч): затем никелированную поверхность паяют обычными легкоплавкими припоями по известной технологии. Полученный слой никеля позволяет проводить неоднократный нагрев под пайку. Однако временное сопротивление разрыву паяных соединений алюминиевых пластин, предварительно никелированных в ваннах с хлористым никелем и паянных припоем ПОС 61, невелико ( $\sigma_b = 9,8$  МПа). По данным Ю. А. Цумарева, при пайке телескопических соединений труб из стали с охватывающей трубкой из алюминия с химически никелированной внутренней поверхностью в результате прижима  $\tau_{ср}$  возрастает до 24,5—29,4 МПа.

Покрытие алюминиевых сплавов никелем ( $\delta = 15 \div 20$  мкм), наносимым химическим способом, может быть применено при пайке легкоплавкими припоями (оловянно-свинцовыми, кадмиевыми) до температуры пайки 450—480 °С с применением флюсов ЛК2, ЛТИ120 и др. Нагрев деталей под пайку до температур выше 280 °С должен быть достаточно быстрым для того, чтобы исключить выгорание флюса и, как следствие, пористость в паяном шве. Время нагрева до расплавления свинцово-серебряного припоя ПСр2,5 при пайке не должно превышать 3,5 мин, припоя ПСр 3Кд — 1,5—2 мин. Это время может быть увеличено до 5 мин, если нагрев при пайке проводить в среде проточного аргона. Сопротивление срезу соединений из сплава АМц, поверхность которого перед пайкой была никелирована в гипофосфитных растворах, паянных припоем ПСр 2,5, равно 17—19 МПа, а припоем ПСр 8 КцН — 18—29 Па, ПОС 61—24—69 МПа.

По данным П. Г. Горячева, химическое меднение алюминия и его сплавов перед пайкой возможно в смеси 50 % CuO и 50 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Оптимальная температура нагрева алюминия при таком покрытии 480—530 °С. Ниже 480 °С покрытие не образуется: выше 530 °С алюминий в виде фольги может возгораться в результате выделения теплоты реакции. Время контакта алюминия с расплавом  $\text{CuO} + \text{NH}_4\text{Cl}$  составляет 3—5 с. Толщина покрытия 10—15 мкм. Образующийся слой меди плотный и не отслаивается от алюминия при многократных перегибах и нагреве до 180 °С.

Остатки расплава смеси на меденной детали легко отслаиваются при охлаждении. Толщина покрытия 10—15 мкм.

Меднение возможно не только путем погружения алюминия в расплавленную смесь, но и при нанесении ее в виде порошка на поверхность нагретой алюминиевой детали. При этом нагрев может быть осуществлен на крышке печи газопламенной горелкой. Перед меднением поверхность алюминиевых деталей не требует предварительной обработки. Расход смеси для меднения 0,5 г на 6 см<sup>2</sup>. Медненую поверхность промывают содовым раствором. Далее возможна пайка припоем типа ПОС 40 с флюсами. Для предотвращения развития коррозии в контакте алюминия с медью целесообразно меднить и торцы алюминиевых деталей. По такому покрытию возможна пайка с припоями типа ПОС и соответствующими флюсами.

Алюминиевую проволоку для улучшения ее смачиваемости при пайке гальванически покрывают цинком, оловом или другими металлами.

Для соединения алюминиевых деталей с медными в электротехнике предложено наносить на алюминиевую деталь одно или несколько гальванических покрытий. Толщина гальванических покрытий должна превышать высоту неровностей паяемой поверхности. Температура нагрева при пайке должна быть выше температуры образования эвтектики Al — Cu (Заявка 2532317 ФРГ, МКИ<sup>3</sup> кл. В 23 К 1/02).

После покрытия поверхности алюминия очень тонким слоем серебра возможна бесфлюсовая пайка погружением паяемого изделия в жидкий цинк или цинковые припои, которые хорошо смачивают посеребренную поверхность алюминия.

Достаточно высокая коррозионная стойкость проводов из алюминия, паянных легкоплавкими припоями, может быть обеспечена при предварительном цинковании паяемой поверхности (толщина цинкового покрытия до 2 мкм) и лужении в ванне с расплавленным оловом. По данным А. А. Суслова и И. С. Григорьевой, плакирование алюминиевых сплавов цинком обеспечивает высокую коррозионную стойкость соединений, паянных оловянными припоями.

Необходимо учитывать, что припой П200А, нанесенный на поверхность алюминиевых сплавов АД1, АМц и АМгб в виде полуды, резко снижает их относительное удлинение и в меньшей степени сопротивление разрыву.

По данным Ф. Д. Милеса, сплавы типа Al — Mg, при содержании 0,5 % Mg в нагартованном состоянии особенно подвержены межзеренному проникновению в них легкоплавких припоев. Поэтому эти сплавы перед низкотемпературной пайкой необходимо отжигать при температуре выше температуры рекристаллизации.

**Высокотемпературная пайка алюминия и его сплавов.** Высокотемпературная пайка алюминия и его сплавов в печах осуществляется главным образом готовыми припоями (см. табл. 13) и контактно-реактивными флюсами. Характерно, что для этой цели при-

меняют главным образом припой на основе алюминия  $\text{Al—Si}$ ,  $\text{Al—Zn}$ ,  $\text{Al—Cu—Si}$ ,  $\text{Al—Mn—Si}$ . Совместимость сплавов с такими припоями характеризуется степенью химической эрозии, газовой пористости и охрупчивания при контакте их с жидкими припоями.

Выше температуры  $500^\circ\text{C}$  растворимость алюминия в цинке резко возрастает: значительной величины достигает растворимость алюминиевых сплавов в припоях П575А, 590А, эвтектическом силумине. Особенно сильно развивается эрозия в галтельных участках швов, где скопляются большие количества жидкого припоя. В этом случае образуются более развитые и грубые галтельные участки шва.

В соединениях из сплава АМц, паянных эвтектическим силумином, при больших выдержках ( $> 25$  мин) могут появиться достаточно резко выраженные усадочные трещины в галтельных участках швов. Длительные выдержки при пайке припоем П590А приводят к утолщению галтельных участков шва, а при пайке припоем П575А (в течение 15—25 мин) развиваются усадочные трещины в галтельных участках швов, а также усадочные рыхлоты и «прострелы» с черной каймой, обусловленные обратной ликвацией эвтектики  $\text{Zn—Al}$ . Поэтому пайка алюминиевых сплавов припоем П575А должна быть кратковременной (5—10 мин).

Прочность соединений из сплава АМц, паянных припоями П425А, 34А и В62, при достаточной нахлестке (3—4 толщины листа) приближается к прочности паемого металла, а температура распайки становится на  $50—100^\circ\text{C}$  выше температуры плавления припоев вследствие повышения температуры ликвидуса.

Если после пайки изделие должно быть подвергнуто анодированию и при этом цвет паяного шва не должен отличаться от цвета паемого металла, то не следует применять цинковые (П425А, П480А) и алюминиевые припои, легированные значительными количествами кремния или меди, так как швы чернеют при анодной обработке.

С ростом предельной растворимости алюминия в припоях с повышением температуры процесс подплавления его под оксидной пленкой и диспергации последней становится все более активным. Вероятно, при пайке с галогенидными флюсами возможна и электрохимическая диспергация оксидной пленки через ее несплошности в результате электрохимического растворения паемого металла в электролите — расплаве флюса.

*Флюсовая высокотемпературная пайка готовым припоем.* Флюсовая высокотемпературная пайка алюминия и его сплавов готовым припоем может быть выполнена с локальным нагревом в пламени паяльных ламп, горелок, ТВЧ и общим нагревом в печах и погружением в флюсовые ванны. Для высокотемпературной пайки алюминия наиболее широкое применение нашли припои 34А и эвтектический силумин.

Плакирование листов из алюминиевых сплавов слоем припоя

Таблица 38. Состав флюсов для высокотемпературной пайки алюминия, %

| Марка или номер флюса | NaF  | NaCl  | KF   | ZnCl  | LiCl  | KCl   | Другие компоненты       |
|-----------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------------------------|
| Ф370А                 | 5    | —     | —    | —     | 38    | 47    | 10 CdCl <sub>2</sub>    |
| Ф380А                 | 5    | —     | —    | 10    | 38    | 47    | —                       |
| Ф320А                 | 6    | —     | —    | 24    | 42    | 28    | —                       |
| 17                    | —    | —     | —    | —     | 41    | 51    | —                       |
| 124                   | 6,1  | 21,9  | —    | 8     | 22,8  | 41,2  | —                       |
| ТПИ-3                 | 5—15 | 20—30 | 2—10 | —     | 5—20  | 25—50 | 2—10 CdCl <sub>2</sub>  |
| 1                     | —    | —     | 9—13 | 1—3   | 30—50 | 40—50 | 1—6 CdCl <sub>2</sub>   |
| 2                     | 4—6  | 18—22 | 4—6  | 1—2   | 8—12  | 35—45 | 18—20 CaCl <sub>2</sub> |
| 3                     | —    | 34    | —    | —     | 37    | —     | 20 BaCl <sub>2</sub>    |
| 4                     | —    | 10    | —    | —     | 35    | 45    | —                       |
| 5                     | —    | 12    | —    | —     | 34    | 44    | —                       |
| 6                     | —    | 15—17 | 3—5  | —     | 22—25 | 49—51 | 3—5 AlF <sub>3</sub>    |
| 7                     | —    | —     | —    | 20—40 | —     | —     | 60—80 CuCl <sub>2</sub> |

Примечание. Флюсы № 17, 3 содержат эвтектику KF—AlF<sub>3</sub> в количестве 8 %, 9 %, а № 4, 5 — в количестве 10 % соответственно.

облегчает процесс подготовки под пайку и пайку многих изделий. Для плакирования обычно применяют припой типа силумина.

Приведенные в табл. 38 флюсы № 1—6 и № 17 предназначены для пайки алюминиевых сплавов погружением. Наиболее технологичны флюсы № 17, 4, 5 и 6, так как они имеют высокую жидкотекучесть и сравнительно низкую температуру кристаллизации, что снижает унос флюса из ванны при выеме изделия. Такие флюсы почти полностью выливаются из узких каналов изделий. Однако за исключением флюса № 6, предложенного Е. И. Сторчаем и С. И. Барановым, они содержат повышенное количество LiCl и поэтому имеют более высокую стоимость.

Флюс № 7 имеет температурный интервал активности 500—600 °С и весьма эрозионно активен. Его остатки удаляются промывкой в содовом водном растворе, а затем водой.

#### Технологические особенности пайки алюминия и его сплавов.

Для пайки алюминиевых деталей можно применять паяльные лампы, бензовоздушные и газовые горелки, работающие на пропане, бытовом газе и т. п., с поддувом кислорода или воздуха. Ацетиленокислородное пламя непригодно, так как вредно влияет на активность солевых флюсов типа 34А, применяемых при пайке алюминия в пламени.

Практически пайке в пламени газовых горелок подвергают детали с толщиной стенки до 40 мм. Минимальная толщина паемых деталей из алюминиевых сплавов при этих же условиях примерно равна 0,6—0,8 мм, т. е. больше, чем при пайке в печи и жидких флюсах.

Крупные детали при пайке в газовом пламени ввиду высокой теплопроводности алюминиевых сплавов и тонкостенные детали для предотвращения коробления предварительно подогревают в печи до температуры 400—450 °С. При соединении деталей разных

толщин пламя направляют на массивную деталь, так как иначе возможен перегрев тонкостенной детали и непрогрев массивной. Смежные соединяемые части деталей должны иметь одинаковые или близкие размеры во избежание больших внутренних напряжений и трещин в швах.

При пайке ажурных тонкостенных конструкций из алюминиевых сплавов применение локального нагрева не обеспечивает высокого качества изделий из-за развития в паемом металле значительных тепловых деформаций, высокой теплоемкости материала, труднодоступности мест пайки. Пайку подобных конструкций более целесообразно вести в печах или флюсовых ваннах, так как нагрев в них происходит относительно равномерно, что предотвращает коробление изделий.

*Пайка в печах.* Изделия перед пайкой обычно собирают в зажимном приспособлении с укладкой припоя или с предварительным нанесением его плакированием на паемую поверхность. Перед пайкой собранное изделие покрывают флюсом и затем паяют. Пайку крупных алюминиевых изделий необходимо вести в электрической печи с отдельными зонами для нагрева, сушки флюса, пайки и медленного охлаждения. Транспортирующие и прижимные устройства могут быть изготовлены из алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния, предварительно сильно окисленной поверхностью для изоляции ее от воздействия флюсов. При печной пайке, как правило, используются реактивные флюсы.

При флюсовой пайке конструктивно сложных соединений из алюминия и его сплавов (например, при пайке трубки из сплава АМцПС в трубную алюминиевую доску) нанесение флюса на собранное перед пайкой соединение из водного раствора часто не обеспечивает качественного формирования паяного шва даже при температуре 600—610 °С из-за плохого смачивания неплакированной трубки. В этом случае предварительное покрытие трубок слоем гальванической меди (толщиной 2—5 мкм) обеспечивает отличное их смачивание припоем, тонкость и плавность галтельных участков и их чистоту и возможность пайки при 580 °С.

При пайке алюминиевых сплавов в печах, особенно типа ПАП (с газовым теплоносителем), легко соблюдать температурный режим во избежание развития в основном металле пережога или недопустимой его химической эрозии припоями. Максимально допустимый перепад температур по изделию из алюминиевых сплавов  $\pm 5$  °С. Перед пайкой собранное изделие при нормальной температуре погружают в водный раствор тщательно перемешанного флюса. Флюс может быть нанесен в виде спиртовой пасты. Флюс 34А можно наносить на паемые детали из водного раствора, содержащего 1,5 объема воды и 1 объем флюса. Такой раствор не теряет флюсующей способности в течение четырех дней. Через семь дней раствор становится непригодным для флюсования.

Флюсующая способность флюса Ф124 и особенно флюса Ф5 при нанесении их из водных растворов сравнительно хуже, чем

флюса 34А. Их содержат в специальных ваннах из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т или винипласта.

Изделие с нанесенным флюсом загружают в печь, нагретую до температуры пайки или несколько выше, с учетом расхода части теплоты на нагрев изделия, прижимного приспособления и снижения при этом температуры до температуры пайки, и выдерживают при температуре пайки в течение 5—25 мин в зависимости от массы изделия и приспособления.

При пайке в печах крупногабаритных тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов АД1, АМц и АМг применение флюсов типа 34А вызывает насыщение паяемого металла цинком, восстанавливаемым на его поверхности из хлорида цинка, содержащегося в флюсе [12]. Поэтому использование флюсов, содержащих хлорид цинка, при пайке в печах требует тщательного контроля и ограничения температуры и времени пайки. В связи с этим, например, применяют предварительное флюсование или быстрый нагрев флюсованного изделия до рабочей температуры пайки.

Для печной пайки алюминия и его сплавов более целесообразно применение сухих порошков флюса типа Ф5, содержащих хлориды олова и кадмия. При пайке такими флюсами на поверхности паяемого металла высаживаются олово и кадмий, слабо взаимодействующие с алюминием даже при длительном времени пайки. Паяные соединения, выполненные с флюсом Ф5, имеют более тонкие галтельные участки. Сопротивление усталости паяных соединений, выполненных с применением обоих флюсов, практически одинаково ( $\sim 78,4$  МПа). Сопротивление срезу соединений из АМц, паянных припоем 34А с флюсами 34А и Ф5, после испытания в течение шести месяцев во влажной атмосфере снижается на 16 и 10 % соответственно.

Перед пайкой крупногабаритных тонкостенных узлов из сплавов АМц, АМг после сборки и подгонки деталей обычно выполняют прихватку (с шагом 150—200 мм) ручной аргонодуговой сваркой. Оптимальная ширина зазора 0,05—0,2 мм. При меньшей ширине зазора возникают непропаи, обусловленные недостаточным заполнением его припоем: при большем зазоре во многих случаях в швах возникают пустоты, так как припой стекает вдоль шва.

Температуру в печи необходимо контролировать термopарами, расположенными в центре каждой нагреваемой секции печи. Узлы перед загрузкой устанавливают на специальный поддон, на который при пайке стекают излишки флюса: борта поддона экранируют изделие от прямого теплоизлучения нагревательных элементов печи.

Флюсы Ф124 и ТПИ-3 не теряют активности после растворения в воде: их обычно наносят на поверхность конструктивно сложных изделий погружением в собранном перед пайкой виде в водный раствор флюса (4 кг смеси компонентов флюса на 8 л воды). После пайки остатки флюсов тщательно удаляют путем

промывки в проточной холодной, затем горячей, снова холодной воде и 3 %-ном растворе хромового ангидрида.

Пайка алюминиевых отливок имеет особенности, обусловленные наличием грубой шероховатой поверхности, оксидной пленки и газовой пористости. Кроме того, отливки, в отличие от деталей из деформированных сплавов, обычно более массивны. Поверхностная оксидная пленка с отливок может быть удалена химическими или физическими методами: грубая поверхность — обработана механически. Газовая пористость может быть сведена к минимуму при высококачественном литье, игнорирована или устранена локально механическим путем. При этом зачистка напильниками или металлическими щетками малопригодна при подготовке под пайку дефектных мест отливок, так как паяемая поверхность должна быть строго параллельна поверхности соединения, а ручной инструмент образует неровности на поверхности. В связи с этим лучше применять обработку резанием. Кроме того, если время между обработкой и пайкой слишком велико, то дефектные места отливок необходимо дополнительно очищать от грязи и масла. Соединяемая поверхность должна быть перед пайкой облужена абразивным или флюсовым способом.

Если отливка велика, то требуется специальный подогрев ее при лужении и пайке.

Изделия из литейных алюминиевых сплавов — силуминов могут быть запаяны контактно-реактивным способом через прослойку гальванической меди ( $\delta = 3,8 \div 5$  мкм). Такой способ был применен при изготовлении панелей охлаждения электронной аппаратуры (пайка штырьковых элементов охлаждения к накладной пластине). После подготовки поверхности и нанесения гальванического медного покрытия детали собирали в стальном приспособлении и паяли при 527—538 °С. Поджатие деталей происходило вследствие разницы коэффициентов линейного расширения материалов деталей и приспособлений. По месту контакта с медным покрытием образовывалась эвтектика Al—Cu—Si при температуре 524 °С, а при выдержке 1 ч происходило изотермическое затвердевание шва. Сопротивление разрушению паяного шва было не ниже 235 МПа.

Исправление дефектов отливок из алюминиевых литейных сплавов проводят путем пайки дефектных мест — раковин. Для крупных отливок, слишком больших для одноразового нагрева, может быть использован дополнительный нагрев в печи, газопламенной горелкой, в индукторе или горячими плитами. Для защиты деталей от сквозняка или контакта с холодными поверхностями используют изолирующие зазоры и асбестовые листы. При низкотемпературной пайке дефектов отливок в виде крупных раковин в них закладывают пробки из припоя, близкие по форме и объему, и затем расплавляют их с облуживанием кромок.

По способу пайки с флюсом поковок, не вызывающим коррозии паяных соединений ( $KAlF_2$ ,  $K_6AlF_6$ ), на предварительно нагретые

до 100—150 °С алюминиевые детали наносят флюс. Пайку деталей в сборе проводят в атмосфере сухого азота при температуре  $600 \pm 5$  °С.

*Пайка алюминиевых сплавов во флюсовых ваннах.* Крупногабаритные тонкостенные конструктивно сложные изделия, например пластинчато-ребристые теплообменники, иногда паяют во флюсовых ваннах.

Присутствие во флюсе влаги приводит к коррозии и снижает активность расплава. Поэтому его обезвоживают с помощью стружки сплавов Al — Mn или Al — Mg (30—70 % Mg) за 2—3 ч до пайки. Стружку предварительно подогревают до температуры 150—200 °С. Количество стружки должно составлять 0,5—8 % массы всего расплава флюса. После этого шлак с поверхности расплава удаляют. В хорошо обезвоженном расплаве флюса алюминиевый сплав после погружения в течение 5 мин не темнеет, прочность паяных соединений повышается.

Сопротивления срезу образцов, паянных в необезвоженном флюсе и испытанных при температурах 20 и —196 °С, соответственно равны 55,8 и 95 МПа, а в обезвоженном флюсе Al—Mg (до 70 % Mg) — 98—137 МПа.

Во флюсовых ваннах паяют изделия из технического алюминия или сплава АМц, плакированных силумином. Для пайки крупногабаритных изделий при температуре 600—620 °С удобен сплав АМцПС, так как АПС в этих условиях почти полностью теряет прочность. При необходимости получения высокой ударной вязкости паяных швов при температуре —196 °С применяют припой Al—(6—8 %) Si. Этот припой имеет более низкую эрозионную активность, чем припой Al — 10 % Si. При этом толщина плакирующего слоя (во избежание сильной химической эрозии) не должна превышать 100 мкм. Толщина плакирующего слоя припоя, содержащего менее 9 % Si, не должна превышать 30 мкм.

Перед погружением в ванну паяемый сплав обезжиривают при 60 °С 2 мин в ванне, содержащей 50 л/г  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ; 50 г/л  $\text{NaHCO}_3$ ; 15 г/л  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 1 л  $\text{H}_2\text{O}$ , промывают в горячей воде, травят в 10 %-ном растворе NaOH при 60 °С, промывают в горячей и холодной воде и сушат сжатым воздухом. Перед погружением в расплав флюса изделие подогревают в электропечах или над ванной до температуры 400—560 °С, затем погружают в расплав флюса, нагретый до температуры 620 °С или перегретый (в зависимости от отношения массы флюса к массе изделия).

|   |       |      |      |       |
|---|-------|------|------|-------|
| Снижение температуры расплава, °С . . . . .     | 0     | 2—3  | 5—7  | 20—25 |
| Отношение массы флюса к массе изделия . . . . . | 100:1 | 25:1 | 15:1 | 5:1   |

Подогрев предохраняет от попадания влаги в ванну, уменьшает степень коробления изделия и приспособления, стабилизирует температуру ванны.

Прижимное приспособление для пайки изделия должно быть

достаточно жестким и обладать возможно меньшей массой для сокращения времени и расхода энергии на подогрев; приспособление не должно препятствовать свободному доступу жидкого флюса к паяемому изделию. Элементы приспособления следует надежно предохранять от попадания на них жидкого припоя и припаивания к ним деталей узла. Приспособления для пайки изделий во флюсовой ванне изготавливают из никелевых сплавов, например ХН67МВТЮ, имеющих коррозионную стойкость в расплавах флюсов и высокую прочность при температуре 650 °С.

После удаления из флюсовой ванны изделие выдерживают над ней для стекания расплава солей и затвердевания шва, вынимают из приспособления и охлаждают на воздухе, затем отмывают от остатков флюса. Изделие после пайки для удаления остатков флюса промывают в горячей и холодной проточной воде с последующей обработкой в 15 %-ном растворе  $\text{HNO}_3$  и 10 %-ном растворе хромового ангидрида или промывают в горячей воде (50—60 °С) с помощью волосистой щетки (2—10 мин), затем погружают на 30 мин в холодную проточную воду, выдерживают в горячем (60—80 °С) 2 %-ном растворе хромового ангидрида (5—10 мин), снова промывают в холодной проточной воде (5 мин) и сушат в шкафу при температуре 60—80 °С.

Для проверки наличия остатков ионов хлора после флюсовой пайки на поверхность паяного шва наносят каплю 3 %-ного раствора  $\text{AgNO}_3$ , в котором в присутствии ионов хлора образуются белые хлопья  $\text{AgCl}$ , в этом случае промывку повторяют.

При пайке с общим нагревом в печах и во флюсовых ваннах допускается одна перепайка: при локальном нагреве допускается две подпайки после тщательной зачистки подпайваемых мест и подогрева изделия до температуры 400—450 °С с последующей промывкой его от остатков флюса.

*Бесфлюсовая высокотемпературная пайка с контактно-реактивным активированием.* Высокая хрупкость образующихся в швах двойных эвтектик  $\text{Al—Cu}$ ,  $\text{Al—Mg}$ ,  $\text{Al—Ag}$  — существенное препятствие для использования бесфлюсовой контактно-реактивной пайки алюминиевых сплавов. Повышение механических свойств паяных соединений возможно в результате разбавления хрупкой эвтектики паяемым металлом или пластичным готовым припоем в процессе пайки.

Предварительное нанесение покрытий на алюминиевые сплавы, вступающие с ними в контактно-реактивное плавление, например меди или серебра, устраняет необходимость флюсования при нагреве в защитной среде. Наилучшую коррозионную стойкость паяных соединений обеспечивает термовакуумное или ионное напыление меди или серебра. Гальваническое нанесение этих покрытий ухудшает коррозионную стойкость паяных соединений, вероятно, вследствие присутствия под ними остатков электролита.

При толщине покрытий 10 мкм из меди и серебра формирование шва наиболее удовлетворительное; галтельные участки шва плав-

ные или сплошные, непропаи практически отсутствуют, газовые поры наблюдаются редко и в единичном числе. Покрытие толщиной 5 мкм не обеспечивает сплошных и плавных галтельных участков шва, а покрытие толщиной 15 мкм приводит к заметному увеличению химической эрозии основного металла в жидкой эвтектике, особенно в галтельных участках шва.

Эрозионная способность тройных эвтектик  $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Si}$ ,  $\text{Al} - \text{Ag} - \text{Si}$  при температурах их плавления мало отличается, но с повышением температуры глубина химической эрозии сплава АМц в эвтектике  $\text{Al} - \text{Ag} - \text{Si}$  почти не изменяется, тогда как в эвтектике  $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Si}$ , особенно начиная с температуры 555 °С, она резко возрастает и при температуре 595 °С достигает 0,13 мм, т. е. в 6 раз больше, чем в эвтектике  $\text{Al} - \text{Ag} - \text{Si}$ .

Относительно прочные паяные соединения из сплава АМц при пайке двойными эвтектиками  $\text{Al} - \text{Cu}$  и  $\text{Al} - \text{Mg}$  могут быть получены только при значительных перегревах ( $\geq 630$  °С) [20]. При разбавлении образующихся хрупких эвтектик  $\text{Al} - \text{Cu}$  и  $\text{Al} - \text{Ag}$  силумином обеспечиваются прочность и пластичность паяных соединений такие же, как и при флюсовой пайке при нагреве до температуры ~580 °С. Для этого удобно, например, изготовлять одну из соединяемых деталей из алюминиевых сплавов, плакированных силумином (АПС, АМцПС), а прослойку серебра или меди наносить на неплакированную припоем деталь.

Паяные соединения из сплава АМг6 по сравнению с АМг2 отличаются несколько более высокими механическими свойствами и интенсивным прониканием припоя по границам зерен, что обусловлено, по-видимому, участием в контактно-реактивном плавлении также включений магниевой фазы  $\text{Mg}_2\text{Al}_5$ .

Способ бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов с контактно-реактивным активированием применим для соединения алюминиевого сплава АМцПС с коррозионно-стойкой сталью 12Х18Н10Т, покрытой слоем гальванического серебра ( $\delta \sim 15$  мкм), наносимого на никелевый гальванический подслоя ( $\delta = 4 \div 6$  мкм). Режим пайки: температура 580 °С; выдержка 0 мин. Полученные паяные соединения отличались хорошими галтельными участками, плотным швом и достаточно высокой прочностью ( $\sigma_b = 65,6$  МПа) и пластичностью и имели тонкую ( $\delta \sim 1 \div 2$  мкм) интерметаллидную прослойку.

По данным коррозионных испытаний (шесть месяцев в тропической и влажной камере), паяные соединения из АМц, выполненные с прослойкой меди или серебра, не обнаруживают существенного снижения прочностных характеристик. При пайке в интервале температур 545—575 °С (с прослойкой меди) и 565—585 °С (с прослойкой серебра) снижение сопротивления срезу после коррозионных испытаний не превышает 2—4 % и 0—3 % соответственно.

Для сложных конструкций из алюминиевых сплавов, плакированных силумином (7,5; 10; 12 % Si), разработан вариант кон-

тактно-реактивной пайки, при котором на паяемую поверхность электролитически наносится никель: режим нанесения:  $t = 82^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 2,5$  мин. Осажденный слой никеля защищает металл от окисления. Пайку ведут в печи в атмосфере азота. При пайке происходит экзотермическая реакция алюминия с никелем и образуется трехкомпонентная эвтектика  $\text{Al—Si—Ni}$ , играющая роль припоя [48].

По данным Канаи Томиёси, изделие из алюминиевых и медных деталей может быть запаяно способом контактно-реактивной пайки после покрытия деталей слоем серебра. Нагрев при пайке ведут в вакууме или безокислительной атмосфере в присутствии паров металлов — геттеров. Например, таким способом был запаян медный диск, прижатый болтом к торцовой части алюминиевого стержня, имеющего ребра охлаждения. Нагрев при пайке проводили в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) при  $570^\circ\text{C}$  с выдержкой 30 мин в присутствии паров магния. Охлаждение узла проводили в среде азота.

По другому варианту контактно-реактивной пайки алюминиевую деталь покрывают медью или медным сплавом, содержащим  $\geq 95\%$  Cu. Слой медного покрытия толщиной 1,3—13 мкм может быть нанесен любым способом. В прижатом состоянии детали нагревают до  $560\text{—}640^\circ\text{C}$  в безокислительной атмосфере или невысоком вакууме. Микровыступы на соединяемых поверхностях разрушают оксидную пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и обеспечивают контакт алюминия с медью и наступление контактно-реактивного плавления. При пайке выдержка может достигать 30 мин.

Пайка алюминиевых сплавов, по С. С. Ловери, возможна также после покрытия определенным количеством металлического марганца хотя бы одной из паяемых поверхностей с последующим нагревом в вакууме при условии размещения между паяемыми деталями припоя. Способ обеспечивает высокую прочность соединения. Марганец наносится перед пайкой в виде частиц размером 35 мкм из суспензии со связкой, разлагающейся при нагреве. Масса наносимого покрытия на  $\sim 600\text{ мм}^2$  1—2 мг. Состав припоя (%): 12 Si, 0,3 Cu, 0,8 Fe, 0,2 Zn, 0,1 Mg, 0,15 Mn и Al — остальное. Состав связки: акриловая кислота с поливиниловым спиртом и канифолью 5—50 %. Частицы марганца могут быть правильной или неправильной формы, предпочтительно размером 38—44 мкм. Припой может быть использован, например, в виде порошка, проволоки. Пайку проводят в вакууме при давлении не ниже  $1,33 \times 10^{-2}$  Па и температуре  $580^\circ\text{C}$ . Собранный образец перед пайкой помещают в алюминиевый ящик и загружают в печь с последующей откачкой.

*Контактная твердогазовая вакуумная пайка алюминия в парах металлов.* Способ пайки в парах магния алюминиевых сплавов, плакированных силумином, разработан С. Дж. Миллером в 1962 г. [14]. В сочетании с контактно-реактивным активированием этот способ использован А. А. Сусловым и С. Н. Лоцмановым в 1966 г.

Высокотемпературная вакуумная пайка алюминия и его сплавов в перенасыщенных парах магния может быть осуществлена по разной технологии. Собранные изделия из АМцПс помещают в печь. Туда же помещают навеску магния, вакуумируют печь до разрежения  $\sim 1,33 \cdot 10^{-1}$  Па и нагревают затем при продолжающейся откачке до температуры пайки. Недостатками такого варианта технологического процесса являются его большая длительность и сильное испарение магния при нагреве.

Для дезактивирования печи и ускорения охлаждения паяного соединения после пайки в вакууме с парами магния камеру пайки заполняют сухим азотом и охлаждают в этой среде до  $\sim 38^\circ\text{C}$ . Это повышает в вакуумной камере давление и задерживает испарение магния.

По другому варианту для предотвращения сильного испарения магния и ускорения нагрева изделия печь после откачки и нагрева до  $300^\circ\text{C}$  заполняют осушенным азотом и продолжают нагрев в его атмосфере до  $530\text{—}577^\circ\text{C}$ ; затем печь снова герметизируют, откачивают до требуемого разрежения и нагревают до температуры пайки. Недостатком такой технологии является необходимость использования оборудования для осушки азота и низкая производительность процесса пайки.

По данным А. В. Барсукова, производительность процесса вакуумной пайки в парах магния может быть повышена, если исключить использование защитного газа, нагрев собранного изделия проводить на воздухе, а испарение магния начинать из жидкого сплава при температуре на  $50\text{—}10^\circ\text{C}$  ниже температуры плавления припоя. Процесс пайки при этом будет состоять из нагрева до  $530\text{—}550^\circ\text{C}$  в обычной воздушной печи собранного изделия в тонкостенном контейнере из коррозионно-стойкой стали с навеской сплава  $\text{Cu—}34,6\text{ Mg}$  с температурой плавления  $552^\circ\text{C}$ , переноса контейнера в вакуумную печь, герметизации и откачки ее до давления  $1,33 \cdot 10^{-2}\text{—}1,33 \cdot 10^{-3}$  Па и нагрева до температуры пайки. Для изменения температуры плавления сплава  $\text{Cu—Mg}$  и регулирования скорости испарения магния сплав можно легировать никелем и германием; применяется легирование припоя  $\text{Al—Si}$  магнием ( $0,6\text{—}1,5\%$ ).

В связи с быстрым запылением внутренних стенок вакуумных печей при пайке алюминиевых сплавов силуминами, содержащими магний, и пониженной коррозионной стойкостью паяных ими соединений предложено вместо магния в алюминиевые припои с кремнием вводить литий, бериллий, лантан и (или) церий [10].

При оптимальных режимах в паяных швах образуются сплавы, близкие в тройным эвтектикам  $\text{Al—Si—Cu}$  и  $\text{Al—Si—Ag}$  при применении прослоек меди или серебра соответственно. Толщина наносимого слоя серебра или меди  $10\text{—}12\text{ мкм}$ : при пайке в шов переходит до  $5\text{—}7\%$  Ag. Паяные соединения, полученные комбинированным способом, обладают удовлетворительной прочностью (табл. 39) и повышенной коррозионной стойкостью по сравнению

с соединениями, полученными при флюсовой пайке. Наилучшие свойства соединений обеспечиваются при нагреве в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па) при температурном градиенте по изделию  $\pm 10^\circ \text{C}$ .

Пайку ведут в водоохлаждаемой рабочей камере с электронагревателем и системой экранов. Магний испаряется из куска или листов, помещенных предварительно внутрь тонкостенной оболочки, полностью охватывающей изделие или припой.

Разработка печей непрерывного действия обеспечивает высокую производительность этого процесса. Установлено, что при введении в припой элементов, образующих с алюминием химические соединения (Ag, Cu, Mg), ухудшается смачиваемость алюминиевых сплавов при бесфлюсовой пайке.

В Японии разработаны новые способы бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов в инертной атмосфере газов с добавкой паров галогенидов. На смачивание при бесфлюсовой пайке благоприятно влияют добавки по 0,1 % Sb, Bi, Ba, Si [43].

Для сохранения подготовленной под пайку поверхности на нее предложено наносить слой масла. При пайке в вакууме этот слой при нагреве удаляется (вакуумное обезжиривание).

По данным К. Д. Миллера, пайка алюминия и его сплавов в вакууме ( $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$  Па) возможна припоем (3—15 % Si, 0,4—10 % Mg, 0,25 % Cu, Al остальное) в виде порошка из отдельных компонентов или лигатур, нанесенных предварительно в место пайки. Порошки должны быть химически чистыми (особенно кремний) и просеяны через сито (130 отверстий на 1 см). Порошок меди должен быть предварительно восстановлен в водороде при  $800^\circ \text{C}$ . В качестве связки используют метилцеллюлозу. Наилучшие результаты получены при пайке в течение 1 мин при температуре  $588^\circ \text{C}$  алюминиевых листов, плакированных припоем Al—10 % Si в сочетании с порошком, содержащим 75 % Mg и 25 % Cu в вакууме ( $p = 3,3 \cdot 10^{-1} - 2,66 \cdot 10^{-2}$  Па).

*Бесфлюсовая пайка алюминия на воздухе.* Возможность бесфлюсовой высокотемпературной пайки алюминиевых сплавов на воздухе с предварительным лужением впервые рассмотрена в 1965 г. С. В. Лашко, А. М. Никитинским и Н. Ф. Лашко. Среди легкоплавких припоев для этой цели наиболее подходящим оказался оловянно-цинковый припой с 10 % Zn (П200А).

Как показали исследования Г. Н. Уполовниковой и Р. С. Красиной, при высокотемпературной бесфлюсовой пайке на воздухе алюминиевых теплообменников силумином для предварительного абразивного лужения оптимальным является припой, содержащий 10 % Zn, 10 % Pb и 80 % Sn. Такие теплообменники в условиях

Таблица 39. Сопротивление срезу соединений из алюминиевых сплавов, паянных в парах магния

| Сплав | Покрытие | $\tau_{\text{ср}}$ , МПа |
|-------|----------|--------------------------|
| АМг6  | Серебро  | 81,3                     |
| АМг6  | Медь     | 76,4                     |
| АМц   | »        | 71,5                     |
| АМцПС | »        | 62,7                     |

криогенных температур ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) показали достаточную прочность ( $\tau_{\text{ср}}=83,3$  Па) и хорошую коррозионную стойкость в условиях тропической атмосферы.

Толщина слоя припоя П200А, наносимого при лужении абразивным способом перед пайкой высокотемпературными припоями ПСр54Кц, 34А и эвтектическим силумином, должна быть 0,03—0,05 мм (на сторону). Допустимое время между лужением и пайкой зависит от толщины слоя полуды и при толщине 50 мкм составляет не менее 120 ч. Глубина химической эрозии при пайке высокотемпературными припоями по облуженному слою намного меньше, чем при пайке с флюсом 34А. Нагрев при пайке может быть осуществлен в печи, индукционным способом в среде аргона и на воздухе. Паяные швы обладают высокой вакуумной плотностью и коррозионной стойкостью во влажной и полупромышленной атмосфере.

Лужению перед пайкой подвергают все соединяемые поверхности. Наиболее удобна укладка припоя в зазор или использование в конструкциях листов алюминиевых сплавов, плакированных припоем, например силумином (АПС, АМцПС).

Как показали исследования, оптимальная толщина слоя полуды  $10 \pm 2$  мкм. Меньшее количество полуды может привести к непрочным и снижению качества паяного шва, а большее существенно влияет на развитие химической эрозии. При толщине полуды 10 мкм средняя глубина эрозии при нагреве до  $560\text{—}590^{\circ}\text{C}$  в течение 5—20 мин не превышает 40—80 мкм. С повышением температуры пайки до  $600\text{—}610^{\circ}\text{C}$  средняя глубина эрозии основного металла в слое полуды и силумине возрастает.

Паяные соединения из сплавов АМцПС и АМц, выполненные по этой технологии с нагревом на воздухе, имеют стабильные характеристики (табл. 40).

**Т а б л и ц а 40. Влияние температуры и времени пайки на характеристики паяных соединений АМцПС+АМц (толщина листов 3 мм, нахлестка 3 мм, испытано по пять образцов)**

| Температура,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Время пайки,<br>мин | Соппротивление<br>срезу, МПа | Угол изгиба,<br>градусы |
|------------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|
| 550                                | 5                   | 51—68,6                      | 120                     |
| 580                                | 5                   | 92,1—115,6                   | 170                     |
| 590                                | 3                   | 102,9—122,5                  | 180                     |
| 600                                | 3                   | 108,8—125,4                  | 180                     |

После длительного хранения перед пайкой облуженные детали подвергают травлению по режимам: 1) выдержка в 20 %-ном растворе NaOH в течение 1 мин, промывка в воде, погружение в 50 %-ном растворе  $\text{HNO}_3$  на 1 мин, промывка в воде, сушка; 2) выдержка в 5 %-ном растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в течение 30 с, промывка волосяной щеткой в воде, сушка.

При пайке в интервале температур 550—570 °С образуются вполне удовлетворительные по виду галтельные участки шва. Однако прочные паяные соединения можно получить только после пайки при температуре 580—600 °С, т. е. после расплавления силумина. Наибольшее количество олова, переходящее в паяный шов с облуженной поверхности при пайке, не превышает 1 % и не оказывает заметного действия на температуру распайки и на прочностные характеристики паяных соединений.

*Бесфлюсовая форвакуумная пайка припоями, содержащими легкоиспаряющиеся элементы, не восстанавливающие  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и не связывающие  $\text{H}_2\text{O}$ .* Висмут, кадмий и цинк не способны восстанавливать  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и связывать  $\text{H}_2\text{O}$ . Однако будучи введенными в алюминиевые припои, они при испарении в форвакууме усиливают разрушение пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на плакированном слое из припоя и химически адсорбируются на паяемом металле в местах несплошности оксидной пленки, выросшей в условиях форвакуума, и тем самым способствуют ее диспергации перед фронтом растекающегося припоя [15].

Припои 34А и силумин, легированные одним из легкоиспаряющихся элементов (цинком, висмутом, кадмием) при любом расположении их у зазора: рядом с ним, ниже или выше, не затекают в капиллярный зазор при любом его наклоне, но растекаются по поверхности сплава АМц. По-видимому, наличие на поверхности жидкого растекающегося припоя оксидной пленки, образовавшейся на нем, при подплавлении алюминия под пленкой оксида и паров металлов препятствует смачиванию верхней детали и развитию процесса заполнения зазора жидким припоем.

При расположении исследуемых припоев над вертикальным зазором или в специальном питателе пары легкоиспаряющегося элемента не препятствуют заполнению зазора припоем, а пленка оксида, образовавшаяся на припое перед его расплавлением, остается вне зазора.

Припой 34А и силумин с добавками 5 % Вi или 5 % Сd вполне удовлетворительно затекают в V-образные зазоры при некапиллярной пайке. При Y-образных зазорах происходит заполнение лишь некапиллярной части шва, вероятно, вследствие попадания в закрытую подложкой капиллярную нижнюю часть зазора паров легкоиспаряющихся элементов. Капиллярная пайка этими припоями осуществлена при условии вытекания их из питателя — сквозного отверстия в верхней пластине нахлесточного соединения.

Методом крутого восхождения (с единственным шагом изменения содержания легирующего элемента на 1 %) обнаружено, что наиболее высокая прочность некапиллярного паяного соединения ( $\sigma_b = 10,78 \div 11,76$  МПа) наблюдается при использовании висмута или кадмия в количестве 2—5 % при пайке по режиму  $t_n = 620$  °С,  $\tau = 22$ —25 мин: оптимальное содержание в силумине магния 2—8 % и цинка 5—10 %.

При пайке алюминия к самофлюсующимся относятся припои,

содержащие 10 % Si, легированные лантанидами в количестве 0,1—0,001 %. Такие припои предварительно наносят в виде плакированного слоя толщиной 5—10 % толщины материала, а процесс пайки производят в вакууме ( $p = 2,66 \cdot 10^{-3}$  Па). Для этой цели пригодны также силумины, содержащие 8—11 % Si — (0,05—10) % К, где К — один из легкоиспаряющихся элементов — Bi, Mg, Cd и др.

**Контактно-реактивная прессовая пайка.** В последние годы интенсивно развивалась контактно-реактивная прессовая пайка алюминия и его сплавов. Одна из наиболее старых технологий — пайка с применением больших давлений для удаления жидкой эвтектики из зазора — использована при разработке способа Alcoa-260.

Процесс Alcoa-260 может быть осуществлен, в частности, с прокладкой медной фольги (0,075—0,125 мм) между соединяемыми деталями и нагреве между угольными блоками при умеренном давлении 7,8—14,7 МПа и без флюса: нахлестка 9,5—12,7 мм, время пайки 15 с, медная фольга должна быть полностью израсходована при контактно-реактивном плавлении. Характерно, что при давлениях  $\leq 49$  кПа выдавливание жидкой фазы из зазора недостаточно, а сопротивление срезу паяного соединения, шов которого содержит значительное количество малоэластичной эвтектики, находится в пределах 37,2—65,6 МПа. Прочность соединения при этом тем ниже, чем больше выдержка при температуре пайки до приложения давления.

О. Е. Осинцев, Н. А. Баресков и другие исследователи изучали контактно-реактивную прессовую пайку алюминиевых сплавов через прослойку серебра (15—25 мкм), нанесенную плакированием при температуре 200 °С с обжатием 45—50 %. Слой серебра может быть нанесен только на одну из соединяемых деталей. Пайка возможна в вакууме ( $p = 6,65$  Па) с прижимом деталей в резуль-

Т а б л и ц а 41. Сопротивление срезу нахлесточных соединений из алюминиевых сплавов после контактно-реактивной пайки в вакууме

| Конструкционный материал | Напыленный контактный материал |                   | Температура пайки, °С * | Сопротивление срезу, МПа | Пластичность |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|
|                          | Наименование                   | Толщина слоя, мкм |                         |                          |              |
| АМц                      | Cu                             | 15                | 655                     | 57                       | Низкая       |
| АМц **                   | Cu                             | 15                | 645                     | 90                       | Высокая      |
| АМцПС                    | Cu                             | 15                | 565                     | 99                       | »            |
| АМцПС ***                | Cu                             | 15                | 555                     | 63                       | Низкая       |
| АМц                      | Ag                             | 12                | 560                     | 70                       | Средняя      |
| АМц                      | Ag                             | 25                | 580                     | 196                      | Высокая      |
| АМг6                     | Ag                             | 12                | 565                     | 77,4                     | »            |

\* Выдержка при температуре пайки 5 мин.

\*\* Интенсивное межзеренное проникание жидкой фазы в паяемый материал.

\*\*\* Термовакuumное напыление

тате действия атмосферного давления и нагрева при температуре 575—600 °С в течение 10—15 мин и выдержкой при оптимальной температуре пайки  $590 \pm 5$  °С в течение 5—7 мин (табл. 41).

Паяные соединения из алюминия и его сплавов припоями типа силумина склонны к межкристаллитной коррозии в солевых, щелочных и кислотных растворах, например в пищевых продуктах.

## 2. МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Трудности пайки магниевых сплавов обусловлены прежде всего образованием на их поверхности пленки оксида  $MgO$ , обладающего высокой химической стойкостью и практически не диссоциирующего в аргоне или вакууме или в известных в настоящее время активных газовых средах. Для удаления пленки применяют активные флюсы, содержащие хлористые и фтористые соли лития, калия и натрия, а пайку легкоплавкими припоями выполняют с предварительным абразивным лужением.

Перед пайкой деталей из магния и его сплавов с их поверхности должны быть тщательно удалены все загрязнения, оксиды и слой, образующийся при оксидировании. От жиров и грязи поверхности очищают ветошью, смоченной в бензине, этиловом спирте. Консервирующий смазочный материал удаляют кипячением в (0,5—1) %-ном водном растворе соды в течение 20—30 мин, последующей промывкой в теплой воде и сушкой при 60—80 °С.

Для пайки магниевых сплавов нашел применение флюс ДАУ-452 — аналог флюса 380Мг состава (%): 42,5  $KCl$ , 10  $NaCl$ , 37  $LiCl$ , 10  $NaF$ , 0,5  $Na_2AlF_6$ ; температура плавления 380 °С. Остатки флюсов способствуют интенсивной коррозии паяного соединения и должны быть тщательно удалены не позже чем через 30 мин после пайки. Флюсы имеют большую плотность, чем припой на основе магния, и поэтому даже при быстром ведении процесса в паяном шве присутствуют флюсовые включения. При механической обработке паяного шва резанием и удалении с галтельных участков верхнего слоя могут вскрыться поры, поэтому паяные швы снова тщательно промывают.

Нашел применение также флюс состава (%): 89 плавленого карналита, 8 криолита, 3 оксида цинка; температура плавления 425—620 °С. При пайке сплавов  $Mg-Al-Zn$  при температурах выше их солидуса существует опасность образования легкоплавких эвтектик, плавления основного металла по границам зерен, что приводит к его охрупчиванию и разупрочнению.

Из-за сравнительно невысокой температуры плавления магния и его сплавов (640—655 °С) для пайки непригодны припои на основе меди, серебра, золота. Алюминиевые припои также непригодны из-за способности к активному химическому взаимодействию с магнием и образованию хрупких интерметаллидов в паяном шве. Поэтому в качестве припоев для пайки магниевых сплавов применяют припои на магниевой основе.

Таблица 42. Магниевые припои для пайки магниевых сплавов

| Припой | Состав припоя, % |         |                |                         | Температура<br>ликвидуса,<br>°С | $\sigma$ , литого<br>припоя, МПа |
|--------|------------------|---------|----------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|        | Al               | Zn      | Mg             | Другие<br>элементы      |                                 |                                  |
| AZ125  | 12               | 5       | 83             | —                       | 560                             | —                                |
| AZ92   | 9                | 2       | 89             | 0,002 Be                | 595—600                         | —                                |
| П450Мг | 1                | 13—15   | 84—86          | —                       | 600                             | 127—147                          |
| П380Мг | 2—2,5            | 23—25   | 72,5—75        | —                       | 550—600                         | 127—147                          |
| 4      | 25—27            | 1—1,5   | 73,9           | 0,1—0,3 Мп              | 435                             | 88,2—117,6                       |
| 5      | 21—22            | 0,2—0,5 | Осталь-<br>ное | 0,1—0,3 Мп;<br>25—26 Cu | 415                             | 68,6—88,2                        |

Для снижения температуры ликвидуса в магниевые припои вводят алюминий, цинк, кадмий; для повышения их коррозионной стойкости — марганец; для предотвращения возгорания — бериллий; для улучшения смачивания — галлий. Магниевые припои, содержащие значительные количества алюминия (см. табл. 42, AZ125, AZ92 4 и 5), отличаются низкой коррозионной стойкостью и высокой эрозионной способностью по отношению к паяемому металлу. Глубина химической эрозии основного металла при пайке припоями AZ92 и AZ125 достигает 1—1,5 мм.

Припои 4 и 5 (табл. 42) непригодны для пайки тонкостенных конструкций из магния и сплава МА1: при пайке этими припоями деталей из сплавов МА2, МА3 и МА5 с толщиной стенки  $\leq 3$  мм имеет место сквозное проплавление металла. Припои П380Мг и П450Мг менее интенсивно растворяют магниевые сплавы (глубина химической эрозии  $\sim 0,2$  мм), чем остальные припои. Паяные швы, выполненные этими припоями, хорошо окисдируются, что придает изделиям хороший вид и повышает их коррозионную стойкость.

Применение магниевого припоя  $11 \pm 0,5$  % Cd;  $12 \pm 0,5$  % Al;  $4 \pm 0,5$  % Ni с температурой плавления 560—580 °С и флюсов № 134 и 143 обеспечивает прочность паяных соединений  $\tau_{ср} = 190$  МПа, но остатки флюсов способствуют коррозии паяемого металла и должны быть тщательно смыты.

Медь, свинец, кремний резко снижают коррозионную стойкость магниевых сплавов. Поэтому в магниевых припоях должно быть  $\leq 0,1$  % Cu, 0,001 % Fe, 0,3 % Si. Оксидную пленку с поверхности удаляют погружением деталей на 10—12 мин в ванну с водным раствором хромового ангидрида (28—80 г/л при 60—70 °С или 150—260 г/л при 15—30 °С) с последующей промывкой в воде при температуре не ниже 50 °С, затем в холодной проточной воде и просушкой. Удалять оксиды можно и механическим способом — шлифовальной шкуркой или стальной щеткой и др. Наиболее надежно травление в горячей щелочи (5—10 мин), а затем в 2 %-ном холодном растворе лимонной кислоты. После травления детали необходимо тщательно промыть и просушить.

После подготовки детали паяют не позже чем через 2,5 ч. Стружка из магниевых сплавов при пайке может легко возгораться: поэтому с острых кромок паяных деталей снимают фаски (от  $0,5 \times 45^\circ$  до  $1 \times 45^\circ$ ) или закругляют их под небольшим радиусом ( $\sim 1$  мм); исходя из этих соображений резьбу нарезают после пайки. При капиллярной пайке магниевых сплавов готовыми припоями оптимальная ширина зазора составляет 0,05—0,15 мм.

При пайке магниевыми припоями детали нагревают в электропечах, флюсовых ваннах, в пламени бензиновоздушных горелок, а также ТВЧ. Для хорошего смачивания паяемого металла и затекания припоя в зазор деталь нагревают на  $20\text{--}50^\circ\text{C}$  выше температуры солидуса припоя. Нагрев ведут снизу, чтобы пламя горелки не соприкасалось с поверхностью, по которой должен растекаться припой. Крупные детали при местном нагреве могут заметно коробиться, поэтому их предварительно подогревают в электропечи до температуры  $300\text{--}350^\circ\text{C}$ .

Магниевые сплавы паяют с местным нагревом в пламени газовых горелок, ТВЧ и т. д. по той же технологии, по которой паяют алюминиевые сплавы. После пайки остатки флюсов тщательно удаляют, погружая паяное изделие на 30—60 мин в кипящий раствор углекислой соды, предотвращающей коррозионное воздействие горячей воды на магний и его сплавы. Затем изделие промывают в 0,5 %-ном водном растворе хромпика  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ .

При пайке в печах флюс предварительно наносят на место пайки в виде сухого порошка. Замешивание флюса с водой или спиртом затрудняет растекание припоя. При пайке в пламени горелки флюс можно применять в виде пасты, замешанной на воде и, что еще лучше, на спирте. Регулировать температуру пайки в печи магниевых сплавов следует с точностью  $\pm 5^\circ$ , что можно достигнуть экранированием изделия. Вследствие интенсивной взаимной диффузии жидкого магниевого припоя и основного металла выдержка после выхода на рабочую температуру пайки обычно не должна превышать 1—2 мин, после чего паяные изделия охлаждают на воздухе.

Перед пайкой в ваннах с расплавленным флюсом деталь подогревают: паяют при температуре на  $8\text{--}12\%$  выше температуры ликвидуса припоя в течение 30—45 с.

Сплав МА1 в паяных соединениях, выполненных магниевыми припоями, имеет прочность примерно на 50 %, а остальные деформируемые сплавы на 10—30 % меньше, чем в исходном состоянии. Испытания паяных швов в атмосфере в течение 2 лет и в камере влажности в течение 40 сут дали положительные результаты.

По данным И. Ю. Марковой, бесфлюсовая контактно-реактивная пайка магниевых сплавов возможна с тонкими прослойками меди, никеля, серебра или алюминия, нанесенными ионным способом. Толщина прослоек до 20 мкм. Процесс возможен в чистом аргоне. Температура пайки  $450\text{--}600^\circ\text{C}$ , прочность нахлесточных соединений  $\tau_{\text{ср}} = 68,6$  МПа.

Магний с большинством легкоплавких металлов образует химические соединения. Исключение составляет система Cd—Mg. Магний с кадмием при затвердевании образует непрерывный ряд твердых растворов, однако в твердом состоянии в этой системе образуются три упорядоченные фазы, что приводит к снижению пластичности припоев. Среди легкоплавких припоев применяют главным образом припой Cd—Mg, легированные цинком, а в некоторых случаях оловом.

Химические соединения свинца с магнием не только малопластичны, но весьма коррозионно-нестойки. Поэтому паяные швы, выполненные легкоплавкими оловянно-свинцовыми или свинцовыми припоями, обладают низкой коррозионной стойкостью.

Согласно И. Ю. Марковой, возможна пайка магния и его сплавов галлиевыми пастами, например, состава (%): 4 Mg, 4 Cd, 4 Zn, 88 Ga или 4 Mg, 4 Cd, 1 Zn, 11 Sn, 25 Zn, 55 Ga,  $t_n = 150 \div 600$  °C. Прочность паяных соединений  $\tau_{ср} \sim 58,8$  МПа.

Небольшие детали после покрытия электролитическим слоем меди или серебра можно паять в ваннах, на дне которых находится жидкий легкоплавкий припой, а над ним слой нагретого до температуры пайки глицерина с 1 % триэтаноламина. При медленном погружении в нагретый глицерин изделие нагревается: при соприкосновении с жидким припоем последний заполняет зазоры между паяемыми деталями.

## Глава 8

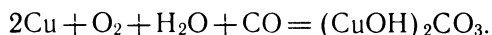
# ПАЙКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

**Особенности пайки.** К числу особенностей меди и ее сплавов, влияющих на выбор способа пайки, относятся химическая стойкость оксидов: содержание во многих сплавах легкоиспаряющихся элементов — цинка, кадмия, марганца: склонность кислородсодержащей меди и некоторых ее сплавов к водородной хрупкости: повышенная способность меди образовывать интерметаллиды с некоторыми компонентами припоев: повышенная способность меди и ее сплавов к хрупкому разрушению в контакте с жидкими припоями: повышенная горячеломкость некоторых медных сплавов.

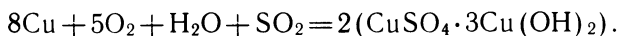
По степени трудности получения паяных соединений медные сплавы можно разделить на две группы: 1) медь и ее сплавы, образующие при нагреве под пайку и в процессе пайки оксиды с невысокой свободной энергией образования и поэтому относительно легко удаляемые при флюсовой пайке; 2) сплавы, при нагреве на которых возникают оксиды с высокой свободной энергией их образования.

К первой группе медных сплавов относится сама медь и ее сплавы, содержащие в основном следующие элементы: цинк, олово, свинец, фосфор, сурьму, железо, никель, марганец.

Обычное окисление поверхностного слоя меди на воздухе идет в основном по уравнению



При содержании в воздухе  $\text{SO}_2$  параллельно может протекать реакция



В присутствии  $\text{H}_2\text{S}$  образуется черная пленка из  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{CuS}$ .

Заметное взаимодействие меди с кислородом наступает уже при  $200^\circ\text{C}$  и идет по схеме  $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} \rightarrow \text{CuO}$ . Оксид меди  $\text{CuO}$  начинает образовываться лишь после получения пленки оксида  $\text{Cu}_2\text{O}$  достаточной толщины ( $> 0,25$  мкм), что обусловлено тем, что такой процесс последовательного окисления развивается в основном в результате диффузии (сквозь пленку оксида  $\text{CuO}$ ) атомов меди к кислороду (к поверхности). Первоначальная стадия

окисления меди малозаметна, так как оксид  $\text{Cu}_2\text{O}$  мало отличается по цвету от меди. Оксид  $\text{CuO}$  довольно устойчив, и его распад на  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{Cu}$  начинается лишь при температуре около  $800^\circ\text{C}$ , а в чистом кислороде при температуре  $1100^\circ\text{C}$ .

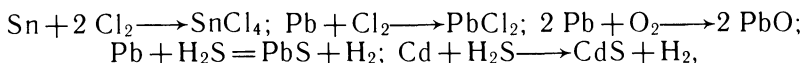
На воздухе медь окисляется сравнительно быстро. По данным Дж. Ф. Расмуссена и других исследователей, при температуре  $20^\circ\text{C}$  уже через 1—3 мин толщина оксидной пленки составляет 0,002 мкм, и такая поверхность не смачивается легкоплавкими припоями без флюсов. Скорость роста оксидной пленки на меди зависит от температуры и времени нагрева. При температуре  $495^\circ\text{C}$  через 1 с толщина оксидной пленки достигает 1,8 мкм, через 50 с — 5 мкм, через 70 с — 17 мкм. Для сохранения очищенной поверхности меди от окисления на нее наносят лужением слой припоя  $\text{Sn—Pb}$  или  $\text{Sn}$  толщиной 3—5 мкм. Слой полуды из олова сохраняет паяемость меди весьма длительно: слой полуды из припоев типа ПОС из-за образования при вылеживании на его границе с медью хрупких прослоек интерметаллидов  $\eta$  и  $\epsilon$  ухудшает паяемость луженой меди, так как в результате расхода олова из слоя полуды припоями типа ПОС на образование химических соединений луженая поверхность обогащается свинцом.

При выходе прослойки химического соединения на поверхность также ухудшается смачиваемость облуженной поверхности. Особенно плохо смачивается фаза  $\eta$  ( $v=180^\circ$ ); фаза  $\epsilon$ , образующаяся между медью и  $\eta$ -фазой, смачивается лучше ( $v=65^\circ$ ).

Слой полуды толщиной 40—60 мкм из припоя ПОС 61, нанесенный центробежным способом ( $f=1700 \text{ мин}^{-1}$ ) и промытый в воде после сушки, имеет очень хорошую паяемость и через семь месяцев хранения.

Защитный лак, напыленный на слой полуды, обеспечивает смачиваемость слоя в течение 6 месяцев, так как через него диффундируют газы.

При запрессовке металлических деталей в пластмассу из нее выделяются газообразные соединения  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ , пары фенола. При этом с компонентами покрытия олова, свинца, кадмия, серебра происходят реакции, например,



продукты которых ухудшают паяемость покрытий. Наиболее влияют на паяемость хлор, сероводород, сернистый газ (при наличии влаги).

Для предотвращения взаимодействия покрытий с подготовленной поверхностью деталей с выделяющимися при запрессовке в пластмассы газами и газами атмосферы при хранении используют так называемые консервирующие флюсы, сохраняющие смачиваемость деталей припоями до одного года. Такие флюсы не должны быть коррозионно-активными, снижать сопротивление изоляции, должны легко удаляться растворителями, хорошо смачивать

Таблица 43. Состав консервирующих флюсов, %

| Компоненты                             | КБС     | КБГС      | КББС      | ФКПС  |
|--|---------|-----------|-----------|-------|
| Бензотриазол                           | —       | —         | 4,8—8     | —     |
| Гексаметиленамин М-нитробензойнокислый | —       | 0,5—2,5   | —         | —     |
| Канифоль сосновая                      | 4,25—5  | 6—7,5     | 5—10      | 10—60 |
| Кислота борная                         | 4,25—5  | 2—3,5     | 2—3       | —     |
| Спирт этиловый (или этилацетат)        | 90—91,5 | Остальное | Остальное | 40—90 |

поверхность деталей и образовывать плотно прилегающие к металлу слои без трещин. Детали, покрытые флюсом, не должны слиться при сушке и хранении, а компоненты флюсов не должны быть дефицитными и дорогостоящими. Состав консервирующих флюсов приведен в табл. 43.

На поверхности сплавов системы Cu—Zn—Sn (а также сплавов меди, содержащих Pb, As, Fe, Ni, Mn) образуются оксиды на основе CuO и Cu<sub>2</sub>O или оксиды на основе других элементов первой группы периодической системы со сравнительно невысокой свободной энергией их образования, а потому относительно легко диссоциирующих при низкотемпературной пайке. Тонкие слои оксидов Cu<sub>2</sub>O и CuO растворимы в канифоли.

Медные сплавы, легированные алюминием, бериллием, хромом, кремнием, цирконием, титаном, а также элементами первой группы периодической системы, отличаются тем, что на их поверхности при пайке образуются труднорастворимые во флюсе и не разлагаемые другими способами оксиды на основе этих элементов.

На поверхности медных сплавов, содержащих кремний, обнаружены силикаты: на поверхности оловянных бронз во внутреннем слое окарины обнаружен оксид Sn<sub>2</sub>O; на поверхности медно-никелевых сплавов, содержащих 7 % Ni и более, во внутреннем слое окарины содержится оксид NiO, а во внешнем — оксид меди. На поверхности медных сплавов, легированных алюминием, бериллием, кремнием и большими количествами цинка, присутствуют оксиды этих элементов, характеризующиеся высокой химической стойкостью и высокой свободной энергией их образования.

Для подготовки поверхности меди и ее сплавов перед пайкой применяют, кроме обычных способов механической очистки и обработки в щелочных растворах, некоторые специфические способы активирования их поверхностей: применение 5 %-ного раствора серной кислоты может оказаться достаточным для подготовки к пайке меди. Для очистки поверхности бронз и сплавов на основе Ni—Ag, Ni—Cu и Cu—Cr после обработки в 5 %-ном растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> их необходимо дополнительно погружать в 2 %-ный раствор бихромата натрия с 3 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Поверхностный слой медных сплавов, содержащих кремний, готовят к пайке при последовательном погружении в 5 %-ный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, затем в смесь 2 % HF и 3 %

$\text{H}_2\text{SO}_4$  и далее в раствор, применяемый для подготовки бронз, не содержащих элементов с большим сродством к кислороду. Для подготовки поверхностного слоя алюминиевых бронз применяют два раствора: смесь 2 % KF и 3 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и смесь 2 %-ного раствора бихромата натрия с 5 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Слои оксидов, образующихся на алюминиевых, бериллиевых, хромистых бронзах, могут быть удалены перед пайкой также в 20—30 %-ном растворе серной кислоты в воде. Температура воды 60—80 °С. Растворение оксидов возможно также в водном растворе азотной кислоты (30 об. %  $\text{HNO}_3$ ). После снятия окисной пленки детали должны быть промыты для удаления следов кислоты и осушены. Оксиды кремния, бериллия, алюминия перед пайкой удаляют во фтористо-водородной кислоте или в смеси соляной и азотной кислот, после чего поверхность сплава немедленно защищают слоем достаточно активного флюса.

Для низкотемпературной пайки изделий с очищенной от слоя оксидов поверхностью применяют активированные канифольные флюсы, содержащие молочную и другие кислоты.

Алюминиевая бронза имеет структуру  $\alpha$ -твердого раствора алюминия и меди и сложную оксидную пленку, состоящую из трех слоев: 1 —  $\text{Cu}_2\text{O}$ , 2 —  $\text{CuO}$  с частицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 3 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . С повышением температуры (при нагреве под пайку) в окислительной атмосфере на поверхности медно-алюминиевых сплавов образуется слой пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [15, 16]. Поэтому удаление оксидов при пайке алюминиевых бронз затруднено. Их пайку рекомендуется проводить реактивными флюсами, содержащими соли цинка или кадмия (от 10 до 30 %). Такие флюсы улучшают условия смачивания алюминиевых бронз и увеличивают прочность паяных соединений. Так, при пайке бронзы БрАЖ9 — 4 с применением флюса 209 без предварительного покрытия сопротивлением срезу паяного соединения примерно равно 28,9 МПа: с медным покрытием — 322 МПа, а с реактивным флюсом без покрытия — 413,8 МПа. Пайку реактивными флюсами с солями цинка производят в интервале температур 850—900 °С, а солями кадмия при 725—775 °С.

При пайке меди легкоплавкими припоями используют неорганические и органические флюсы.

Бесфлюсовая пайка легкоплавкими припоями меди возможна и в водороде. Пайка меди в водороде возможна только при температуре от —50 до 60 °С и выше температуры 900 °С.

Пайку бериллиевых бронз, содержащих от 0,5 % Be и выше, проводят в печи с защитной атмосферой. При нагреве в интервале температур 300—500 °С в них образуются хрупкие твердые химические соединения. Поэтому после пайки при 625—700 °С необходима стабилизация структуры путем закалки в воде паяного соединения с последующим отжигом при 300—400 °С.

Предложен новый высокоэкономичный способ бесфлюсовой пайки меди и ее сплавов легкоплавкими припоями в среде проточ-

ного сухого (перегретого) водяного пара, активированного газообразными добавками HCl, являющегося одновременно и теплоносителем, обеспечивающим нагрев изделия до температуры пайки. Такая газовая среда является дешевой и доступной для пайки [1].

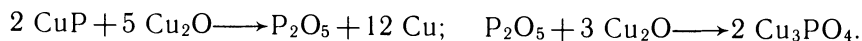
Один из способов бесфлюсовой пайки меди состоит в том, что детали обрабатывают в специальном растворе, состоящем из 90 % органического растворителя (спирта, ацетона, эфира, бензина или их производных) с температурой кипения 30—160 °C: 7—8 % полиспиртовых производных (глицерина, этиленгликоля и др.): 2—3 % органического галогенизированного агента (диметиламина, солянокислого анилина), добавленного для смачивания раствором и активирования поверхности. После обработки в зазор помещают припой на основе свинца и собранный узел паяют в печи с безокислительной атмосферой.

При пайке меди самофлюсуемость легкоплавких припоев, не содержащих олова (например, припой СК7), обеспечивается введением в них натрия. Исследованиями О. П. Ксенофонтова и Э. Н. Дорофеевой показано, что наиболее эффективно введение в такие припои натрия в виде его гидрида, образующегося при растворении металлического натрия в припое (1—5 %) в среде водорода. К числу припоев, активируемых натрием, относятся припои: 17,5 % Zn — 82,5 % Cd,  $t_{пл}=266\text{ °C}$  (для стали): 50 % In — 50 % Pb,  $t_{пл}=926\text{ °C}$  и 52 % In — 48 % Pb (для никеля и меди),  $t_{пл}=316\text{ °C}$ : 82,5 Rb — 17,5 Cd,  $t_{пл}=248\text{ °C}$  и 81,7 Pb — 17,3 Cd — 1 Zn,  $t_{пл}=245\text{ °C}$  (для металлов с легко восстанавливаемыми оксидами).

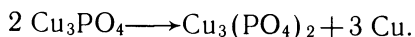
Припои перед пайкой наносят на паяемую поверхность методом натирания. Температура пайки всеми этими припоями ниже 300 °C. При пайке присутствующий в припое гидрид натрия окисляется на поверхности расплава припоя до оксида и гидрооксида. При полном его окислении пластичность паяного шва возрастает. Время действия гидрида натрия в припое при пайке зависит от его концентрации и при 5 % Na составляет 10—20 с на воздухе и увеличивается в среде инертных газов.

При высокотемпературной бесфлюсовой пайке меди и некоторых ее сплавов возможна бесфлюсовая пайка на воздухе припоями, легированными фосфором, но в условиях достаточно быстрого нагрева, например способом электросопротивления.

Установлено, что при высокотемпературной пайке меди меднофосфористыми припоями происходят реакции:



При охлаждении протекает реакция



Слабая связь меди с оксидом  $\text{Cu}_2\text{O}$  и разрушение последнего вследствие большой разницы их температурных коэффициентов

расширения приводят к образованию пористости на их границе, в которую и проникает медно-фосфористый припой, активно взаимодействующий с оксидом и смачивающий медь.

Роль жидких припоев при пайке в вакууме, по-видимому, не сводится только к развитию химической эрозии паяемого металла под оксидной пленкой, а в газообразном состоянии — к связыванию их парами свободного кислорода в вакууме, но также включает и взаимодействие некоторых из них с оксидами паяемого металла. Как показывают данные о свободной энергии реакций взаимодействия оксидов меди с оловом, марганцем, цинком, серебром с оловом и алюминия с железом, олово, цинк и алюминий термодинамически способны восстанавливать оксиды меди, серебра и железа соответственно, так как изменение свободной энергии соответствующих реакций во всем температурном интервале пайки имеет достаточно большие отрицательные значения (табл. 44).

По экспериментальным данным, в вакууме ( $p = 6,65 \cdot 10^{-2}$  Па) алюминий начинает смачивать железо при температуре 700—900 °С.

Бесфлюсовая высокотемпературная пайка меди и ее сплавов возможна в среде водорода с точкой росы — 30 °С припоем ПМФС6-0,15.

Температура распайки соединений из меди, паянных припоем Cu — (6—8 %)P, зависит от ширины паяльного зазора и существенно повышается при ширине зазора менее 0,1 мм.

Без флюса осуществляют и контактно-реактивную высокотемпературную пайку меди с контактной прослойкой серебра. Этим способом паяют пластинчато-ребристые теплообменники, работающие при температуре до 200 °С. Оптимальные результаты при пайке получены при шероховатости паяемых поверхностей, соответствующей  $Ra = 2,5 \div 2$  мкм. Для создания инертной среды при пайке оптимальным является гелий, имеющий в 6—9 раз более высокую теплопроводность, чем аргон. Нагрев до температуры пайки в гелии происходит в 2 раза быстрее, чем в аргоне, что особенно важно для тонкостенных крупногабаритных изделий. Перед сборкой соединяемые детали теплообменника погружают в спир-

**Таблица 44. Свободная энергия реакций взаимодействия оксидов меди, серебра с цинком, оловом, марганцем**

| Реакция   | Свободная энергия, кДж, при температуре, °С |         |         |         |         |     |
|---|---|---------|---------|---------|---------|-----|
|   | 300   | 400     | 500     | 600     | 700     | 800 |
| $\text{CuO} + \text{Zn} \rightarrow \text{Cu} + \text{ZnO}$             | — 259,5                                     | — 259,9 | — 257,8 | — 254,1 | —       | —   |
| $\text{Cu}_2\text{O} + \text{Zn} \rightarrow 2\text{Cu} + \text{ZnO}$   | — 223,5                                     | — 217,6 | — 212,2 | — 204,3 | —       | —   |
| $\text{Cu}_2\text{O} + \text{Mn} \rightarrow \text{Cu} + \text{MnO}$    | — 108,4                                     | 106,1   | — 104,2 | — 100,0 | —       | —   |
| $\text{CuO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Cu} + \text{MnO}$             | — 127,8                                     | 125,2   | — 127,0 | — 125,2 | —       | —   |
| $\text{Ag}_2\text{O} + 2\text{Sn} \rightarrow 2\text{Ag} + 2\text{SnO}$ | 284,6                                       | — 292,6 | — 300,9 | —       | —       | —   |
| $2\text{Ag}_2\text{O} + \text{Sn} \rightarrow \text{Ag} + \text{SnO}_2$ | — 509,8                                     | — 495,6 | — 481,8 | — 466,1 | — 466,1 | —   |
| $\text{Ag}_2\text{O} + 2\text{Sn} \rightarrow 2\text{Ag} + \text{SnO}$  | — 246,5                                     | — 243,2 | — 240,2 | — 235,2 | —       | —   |

товой раствор флюса ПВ209 (3—5 %). Сборка происходит в приспособлении.

Пайка теплообменников осуществляется с механическим прижимом ( $p=0,005$  МПа) в контейнере из стали 12Х18Н10Т размером  $800 \times 600 \times 450$  мм с песчаным затвором [11]. Нагрев проводится в камерной печи Н-85. Расход гелия 10—16 л/мин. Температура пайки 820—830 °С. После пайки изделия охлаждают сначала в открытой выключенной печи, а с температуры 150—200 °С — на воздухе. Время пайки в гелии 30—45 мин, тогда как в аргоне 60—90 мин, пайка сопровождается сквозной химической эрозией медных гофров.

Для высокотемпературной пайки латуни предложены пасты, состоящие из порошка припоя  $\text{Cu—P—Si}$  и флюса ПВ209 (паста 1) или порошка припоя  $\text{Cu—P—Zn}$  и флюса ПВ284 (паста 2). При пайке пастой 1 резко возрастает сопротивление срезу паяных соединений (от 25—31 % до 41—49 %) и становится на уровне свойств паяных соединений, выполненных серебряными припоями ПСр 45, ПСр 62. Температура пайки 750—780 °С, пористость швов 1—2 %.

Паяные соединения, выполненные пастой 2 по тому же режиму, обеспечивают более низкое сопротивление срезу и худшую пористость (10—15 %). При механических испытаниях на растяжение применяли стандартные образцы с нахлесткой 1,2—1,3 мм, с зазором шириной 0,05 мм. Время выдержки при пайке 1 мин. Особенностью технологии является длительная выдержка перед пайкой смеси порошка припоя ПМФС6-0,15 с сухим порошком флюса в течение 30 сут [23].

Перед пайкой меди пастой припоя ПМФС6-0,15 с флюсом ПВ209 поверхность паяемого металла зачищают металлической щеткой, обезжиривают ацетоном и собирают с фиксацией зазора. Порошок припоя различной дисперсности (лучше 5—300 мкм) можно получать в вертикальной вибромельнице МВВЛ-4. Смесь порошка припоя с флюсом ПВ209 сохраняется в сухом виде при температуре 20 °С не менее года.

Для получения пасты непосредственно перед пайкой в смесь порошка с флюсом добавляют воду и пасту наносят на паяемые детали. Паста обладает вяжущими и цементирующими свойствами, и сборка с ней возможна без приспособлений. Она затвердевает в первые же часы и может быть снова разбавлена водой. Вяжущие и цементирующие свойства пасты обусловлены образованием гидрата фторида калия  $\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Оптимальное соотношение смеси флюса с водой по объему 7:1 при соотношении припоя с флюсом ПВ209 равном 1:1 (по объему). При увеличении содержания флюса до 60 % паста становится нетехнологичной, а при 20 % флюса ухудшается смачивание материала пастой ( $\theta \geq 64^\circ$ ); при содержании флюса менее 20 % наблюдается дисмачивание паяемого материала.

Оптимальный режим пайки:  $t_n=780$  °С;  $\tau=57$  с. Максималь-

ные механические свойства и минимальная пористость шва (2 %) соединений обеспечиваются при соотношении по объему припоя, флюса и воды 7:7:2.

Исследования причин упрочнения паяного соединения показали, что при длительном вылеживании сухой смеси порошка припоя и флюса на поверхности частиц припоя появляются сложные комплексы фосфорно-кислых солей с медью:  $\text{Cu}_3(\text{PO})_4(\text{OH})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Cu}_3\text{PO}_4(\text{OH})_3$ ;  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$ . При этом образование поверхностного слоя начинается с окисления фосфида меди  $2\text{Cu}_3\text{P} + 4\text{O} = 3\text{Cu}_2\text{OP}_2\text{O}$ . При выдержке до 5 сут состав поверхностного слоя изменяется в результате реакции  $5\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{Cu}_3\text{P} = \text{P}_2\text{O}_5 + 16\text{Cu}$ , а через 45 сут на частицах припоя протекает реакция  $\text{P}_2\text{O}_5 + 3\text{Cu}_2\text{O} = 2\text{Cu}_3\text{PO}_4$ . Метафосфат меди  $\text{Cu}_3\text{PO}_4$  с течением времени переходит в ортофосфат меди  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ , по-видимому, вследствие диффузии  $\text{P}_2\text{O}_5$  через рыхлоты границ зерен. При хранении до 20 сут в газовых порах обнаружена тугоплавкая фаза ВР и  $\text{SiO}_2$ . Содержание  $\text{SiO}_2$  в металле шва с увеличением срока хранения не влияет на прочность: увеличение прочности паяного шва связано с образованием высокотвердой фазы ВР, содержание которой в металле шва после 20 сут хранения остается постоянным. Снижение прочности паяного шва, выполненного пастой в течение 0—5 сут хранения (см. рис. 26), обусловлено образованием на поверхности частиц припоя простых оксидов.

Соединения, паянные пастой из смеси порошков припоя и флюса ПВ209, после 20 сут хранения не уступают по механическим свойствам соединениям, паянным припоем ПСр 45. Они коррозионно-стойки во всех водосодержащих агрессивных средах, что обусловлено образованием на поверхности паяного соединения слоев фосфатной меди  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$  и силицида меди  $\text{Cu}_3\text{Si}$ : пористость таких соединений на 15—20 % ниже, чем при пайке серебряным припоем, что, по-видимому, обусловлено образованием на поверхности жидкого припоя жидкого соединения  $\text{Cu}_3\text{Si}$ , предохраняющего цинк от испарения при температуре 620—558 °С, и раскислением шва кремнием. Паста пригодна для пайки меди, ее сплавов, мельхиора, куньяля, молибдена, металлизированной керамики. Нагрев при пайке может быть печным и различными локальными источниками теплоты.

При высокотемпературной пайке алюминиевой бронзы необходимо применение флюса повышенной активности из-за высокой химической стойкости оксида алюминия, образующегося на такой бронзе: например, пригоден флюс, предложенный М. Р. Леписко, состава (%): 15—22  $\text{KBF}_4$ , 8—10 криолита, 5—8  $\text{ZnCl}_2$ , 8—10  $\text{CaF}_2$ , 9—11  $\text{MgCl}$ : тетраборнокислый натрий остальное.

В последние годы обнаружено, что введение в висмутовые припои германия, кремния, галлия способствует эффекту увеличения объема припоя при его затвердевании, что важно при подпайке мест течей в емкостях из меди. Кроме того, введение в висмутовые припои 0,5 % Ge упрочняет их.

Для пайки меди, кобальта, никеля предложена паста, пригодная для длительного хранения, содержащая (%): 30—35 флюса и 70—65 композиционного припоя, состоящего из порошка олова (60 %) и порошка меди (40 %). Состав флюса: 200 мл тританол-амина и 30 г бензойной кислоты (или бензоната висмута), 50 % аммония борфтористого. Температура пайки 250—270 °С. Составляющие порошки перемешивают в «пьяной бочке» 40 ч, а затем смешивают с флюсом. Остатки флюса после пайки смывают водой. После изотермической выдержки паяных образцов при 350 °С в течение 40 мин  $\tau_{ср}$  соединений из меди, паянных пастой, составляет 160 МПа. Процесс пайки может быть осуществлен в среде сухого водорода, восстанавливающего оксиды свинца, меди, никеля.

Для обеспечения постоянства электросопротивления паяных соединений меди используют свинцовые припои, в которые вводят кадмий, серебро (до 1 %), титан (0,05 %) и марганец (0,05 %).

Цинковые припои характеризуются низкой прочностью, плохой смачиваемостью меди и растекаемостью по ней даже с наиболее активными флюсами. Легирование цинка серебром, медью, магнием, алюминием и никелем при суммарном их содержании до 10 % приводит к значительному увеличению прочности и теплоустойчивости паяных сплавов.

С увеличением времени нагрева и времени выдержки при температуре пайки происходит интенсивный рост прослоек химических соединений, особенно по границе шва, и сопротивление срезу паяного соединения снижается со 100 до 20 МПа.

Способы нагрева с большой скоростью и приложением давления в момент расплавления припоя (например, электроконтактная пайка в графитовых клещах) обеспечивает отсутствие хрупких прослоек  $\epsilon$ - и  $\gamma$ -фаз, и в шве образуется структура  $\beta$ -латуни. При электроконтактном способе нагрева обеспечивается равномерный и быстрый нагрев, интенсивное перемешивание расплава и поэтому равномерное распределение дисперсных частиц химических соединений, упрочняющих данный шов. Приложение давления после расплавления припоя и активации соединяемых поверхностей приводит к выдавливанию избыточной жидкой фазы и предотвращению образования сплошных прослоек химических соединений по границе шва и, как следствие, к повышению прочности соединения.

При пайке меди взамен серебряных припоев в интервале температуры 456—526 °С было предложено применять цинковые припой состава (%): 1) 8,55 Ag, 2,2—2,45 Cu, 1—1,18 Al, 0,10—0,67 Mg, 0,50—0,41 Ni, Zn — остальное с температурным интервалом плавления 454—524 °С и плотностью 7,45 кг/см<sup>3</sup>, 2) 3,2—4,44 Ag, 2,5—2,6 Al, 0,06—0,10 Mg, 0,5—0,67 Ni, 1,25—1,36 Sn, Zn — остальное. Добавки олова и цинка понижают температуру солидуса и ликвидуса припоев, а добавки серебра до 7—8 % повышают их температуру ликвидуса.

Для пайки этими припоями используют флюс состава (%): 10 ZnCl<sub>2</sub>, 10 CuCl<sub>2</sub>, 80 эвтектика KCl—LiCl. Флюс имеет высокую

«живучесть», однако гигроскопичен. Угол смачивания при перегреве первого припоя на  $50^{\circ}\text{C}$   $16^{\circ}$ , на  $100^{\circ}\text{C}$   $11^{\circ}$ , а для второго припоя соответственно  $9^{\circ}$  и  $2^{\circ}$ ; удельное электросопротивление припоев выше удельного электросопротивления меди в 3,5—4 раза. Плотность припоев несколько выше, чем плотность чистого цинка. Оба припоя при  $20^{\circ}\text{C}$  пластичны, но разупрочняются при повышении температуры до  $100\text{—}180^{\circ}\text{C}$ . При  $-190^{\circ}\text{C}$  второй припой охрупчивается на 100 %, а первый на 25 %. Временное сопротивление припоев соответственно 248—304 и 120—93,1 МПа, относительное удлинение 1,7—4,3% и 0,3—2 %. Эти припои наиболее пригодны для способов пайки погружением и электросопротивлением (в угольных клещах).

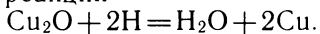
Припои типа ПОС (ПОС 40 и ПОС 61) подвержены искусственному старению вследствие распада твердого раствора олова на основе свинца. Кроме того, при пайке меди припоями, богатыми оловом, на границе шва и основного материала по границе шва образуются прослойки химического соединения  $\text{Cu}_5\text{Sn}_8$  ( $\eta$ -фаза), в результате чего прочность паяного соединения заметно снижается. Предотвращение такой прослойки возможно в результате весьма кратковременного контакта меди с припоем (1 с), что не всегда достижимо в производстве. Для улучшения механических свойств соединений меди, паянных припоями, богатыми оловом, предложено введение в припои элементов, имеющих более высокую химическую активность по отношению к меди, чем олово, например магния и титана. По данным, полученным С. В. Лашко и П. И. Лымарем, введение в припой ПОС 61 магния в количестве 0,05—0,09 %, а в припой ПОС 40 в количестве 0,05—0,07 % приводит к нарушению непрерывности прослойки  $\eta$ -фазы по границе шва с медью, что объясняется большим химическим сродством меди с магнием, чем меди с оловом, и измельчением структуры первичных олова и эвтектики в припое и шве. Исследование механических свойств паяных соединений после искусственного старения образцов при  $100^{\circ}\text{C}$  в течение 120, 720 ч показало, что припои, легированные магнием, обеспечивают более высокую прочность паяных соединений после пайки и после искусственного старения, чем припои, не содержащие магния. Эта разница для припоя ПОС 61 после старения достигает 24,8 %, а для припоя ПОС 40 — 15 %.

Кроме того, по данным испытаний на менискографе, введение добавок магния в припои ПОС 61 и ПОС 40 улучшает их смачиваемость меди и уменьшает окисляемость припоя в жидком состоянии.

В прослойках хрупких интерметаллидов по границе шва с основным материалом под действием термических напряжений, образующихся в процессе термоциклирования, возникают трещины. Как показали исследования, появление трещин сопровождается резким увеличением электросопротивления паяных соединений. Установлено, что соединения меди, паянные при  $420\text{—}450^{\circ}\text{C}$

оловом или припоями ПОС 61, ПОС 40, ПОС 10, ПСр 2,5 погружением с предварительной офлюсовкой после 5000 циклов нагрева (120—30 °С, 12—15 мин), не разрушаются. При указанном циклическом нагреве до 140 °С имело место заметное расплавление паяных соединений, обусловленное повышением плотности тока в местах растрескивания соединения. До температуры 140 °С в указанных условиях термоциклирования работают лишь соединения, паянные припоем ПСр 3.

**Водородная хрупкость.** При наличии малых примесей кислорода, преимущественно в виде оксидов меди, в меди и ее сплавах, нагреваемых в среде, содержащей водород, возникает опасность диффузии водорода в сплавы с последующим образованием воды по реакции



Под действием большого внутреннего давления паров воды при нагреве образуются местные внутренние разрывы паяемой меди или ее сплавов с последующим охрупчиванием. Охрупчивающее действие паров воды в меди усиливается с повышением температуры нагрева. Поэтому при высокотемпературной пайке применяют рафинированную от кислорода медь. В частности, для удаления кислорода в медь вводят фосфор с остаточным его содержанием 0,01—0,04 %, но при этом снижается ее электрическая проводимость.

**Склонность изделий из медных сплавов (латуней и бронз) к растрескиванию в контакте с активной газовой средой или в контакте с жидким припоем.** Известны случаи самопроизвольного разрушения латунных гильз в среде, содержащей аммиак.

Контакт жидких припоев с паяемым металлом при наличии в нем заметных растягивающих напряжений приводит к местному образованию трещин. Подобные случаи разрушения наблюдались при пайке фосфористых бронз, кремниевых бронз, латуней, медно-никелевых сплавов и других медных сплавов, особенно способных к большой пластической деформации и наклепу. Для устранения склонности к образованию самопроизвольных трещин при пайке (преимущественно при высокотемпературной) необходимо снимать в паяемых изделиях остаточные локальные растягивающие напряжения, образующиеся в результате особенностей конструкции изделия, их неравномерного наклепа при сборке, нагрева и охлаждения.

При лужении меди М1 жидким висмутом или свинцом развивается межзеренное проникновение припоя в основной материал, что находится в полном соответствии с характером их физико-химического взаимодействия (см. рис. 52, б). При этом свинец охрупчивает медь при температуре выше 600 °С после выдержки несколько секунд. Ниже этой температуры свинец и висмут не ухудшают прочность и пластичность меди.

Снятие остаточных растягивающих напряжений в наклепаных изделиях может быть обеспечено при нагреве выше и немного

ниже температуры их рекристаллизации и путем медленного нагрева.

**Способность припоев к смачиванию, растеканию по меди и ее сплавам и затеканию в зазор.** Наилучшей способностью к смачиванию и затеканию в зазор при пайке меди и ее сплавов среди легкоплавких припоев обладают оловянно-свинцовые. При затекании в зазор наиболее технологично олово, наименее технологичен свинец.

Свинцово-серебряный припой ПСр 3 (эвтектика: 3,5 % Ag; Pb — остальное) отличается относительно низкой способностью к растеканию, затеканию в зазор и смачиванию поверхности меди и латуни. Введение в припой до 5 % Sn (ПСр 2,5) несколько улучшает эту способность к растеканию, затеканию в зазор, смачиванию поверхности меди и латуни. Швы, выполненные свинцовыми припоями, при нормальной температуре обладают наиболее низким сопротивлением срезу, но теплостойки до температуры 200—250 °С.

Кадмиевые припой, так же как и свинцовые, обладают более низкой способностью к смачиванию и затеканию в зазор по сравнению с оловянно-свинцовыми.

Цинковые припой, легированные медью (2,5—5 %) и серебром (5—35 %), также плохо растекаются по меди и латуни. Технологические свойства цинковых припоев при пайке меди существенно повышаются при легировании их свинцом и оловом (~5 %). Припой такого типа ПЦА8М состава (%): 8 Al, 5 Cu, 1,4 Pb, 6 Sn, Zn — остальное ( $t_{пл} = 360 \div 410$  °С) вполне удовлетворительно растекается по меди и латуни с флюсом ФЦ-37; введение в припой более 5 % Sn приводит к охрупчиванию паяных соединений.

Улучшению растекаемости цинковых припоев способствует введение в них кадмия. К такому типу припоев относятся ПЦКдCu25-5 (24—25 % Cd, 4,5—5 % Ag, 4,5—5 % Sb, Zn — остальное:  $t_{пл} = 350$  °С), ПЦКлCpCu16-4-3 (16—17 % Cd, 3,7—4,3 % Ag, 5,9—3,1 % Sb, Zn — остальное:  $t_{пл} = 380$  °С).

Исследования затекания припоев ПОС 61, олова и свинца в горизонтальный зазор образцов из меди М1 и латуни Л62 в неизотермических условиях нагрева с водными флюсами, проведенные авторами совместно с И. Г. Нагапетяном, показало, что при нагреве образцов с уложенными у зазора припоем и водными флюсами «Прима II» (6 % Zn Cl<sub>2</sub>, 4 % NH<sub>4</sub>Cl, 3 % HCl, H<sub>2</sub>O — остальное) и гидразиновым флюсом (5 % N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>·2HCl, H<sub>2</sub>O — остальное) при температуре 195 °С начинается кипение флюсов. Пары галогенидов активно очищают поверхность меди и латуни от оксидов. При нагреве собранного внахлестку образца верхняя пластина размером 20×15 мм некоторое время остается менее нагретой, чем нижняя, лежащая на горячей подложке ( $t_b < t_n$ ). Расплавленный припой сначала смачивает нижнюю, более нагретую пластину, а затем, после нагрева до температуры смачивания, и верхнюю (см. рис. 14).

Температура медных пластин, необходимая для смачивания их оловом и припоем ПОС-16, зависит от состава применяемого флюса. При использовании флюса «Прима 3» и припоя ПОС 61 она равна 170 °С; олова — 220 °С; флюса «Прима 2» и припоя ПОС 61 — 210—215 °С; олова — 240 °С.

Во всех случаях растекание припоев ПОС 61 и олова происходит с образованием перед их фронтом блестящей каймы со значительно меньшим контактным углом смачивания, чем у припоя. Перед фронтом каймы после пайки обнаружен темный ореол. По данным рентгеноструктурного анализа порошка, снятого с блестящей каймы (в медном  $K_{\alpha}$ -излучении), она состоит из олова, свинца и цинка. Темный ореол состоит из олова и свинца.

Время заполнения зазора растет с увеличением зазора и снижением активности флюса, повышением стойкости оксидов на паяемом металле.

Снижение активности флюса (наиболее активен флюс «Прима 3», наименее — гидразиновый) и расположение припоя у широкой части неравномерного зазора приводят не только к увеличению времени его заполнения (22—60 с), но и к увеличению коэффициента пористости ( $k_p = S_p \cdot 100 / S_z$ , где  $S_p$  — площадь пор, мм<sup>2</sup>;  $S_z$  — площадь заполнения зазора припоем, мм<sup>2</sup>). С уменьшением зазора при прочих равных условиях увеличивается коэффициент пористости [16].

По-видимому, при этом все больше затруднен выход газовых пузырей, дрейфующих вдоль верхней пластины образца к галтельной части шва с открытой поверхностью жидкого расплава. Выход газовых пузырей с увеличением зазора облегчается вследствие увеличения радиуса галтельного участка шва.

На кинетику подъема жидкого припоя в вертикальном постоянном зазоре при введении его в контакт с паяемым металлом при температуре пайки решающее влияние оказывает ширина зазора. С уменьшением ширины зазора высота подъема припоя возрастает. Для зазоров шириной 0,1—0,5 мм процесс характеризуется неравномерной мгновенной скоростью, наибольшей в начале затекания и снижающейся с течением времени. При зазоре шириной 1 мм припой затекает более равномерно и с меньшей мгновенной скоростью.

На время подъема припоя в зазор существенно влияет его смачивающая способность: чем она больше, тем скорее заполняется зазор. Наименьший контактный угол смачивания меди при использовании флюса «Прима 3» среди исследованных припоев имеет ПОС 61. Этот припой имеет максимальную среднюю скорость заполнения вертикального зазора:

|   |      |    |      |
|---|------|----|------|
| Максимальная высота подъема припоя, мм, при зазоре шириной 0,1 мм . . . . . | 40   | 35 | 20   |
| Средняя скорость заполнения вертикального зазора, мм/с . . . . .            | 8    | 10 | 3,3  |
| Контактный угол смачивания, градусы . . . . .                               | 17,9 | 12 | 27,1 |

Максимальная высота подъема припоя в зазоре тем выше, чем меньше плотность припоя. При прочих равных условиях скорость затекания припоя уменьшается с увеличением зазора и с понижением активности флюса. Краевой угол затекания припоя в зазор в процессе подъема припоя с заданным флюсом изменяется слабо.

Таким образом, при пайке деталей с вертикальным зазором при кратковременном нагреве для гарантии затекания припоя на большую высоту кроме малых зазоров необходимо применение припоев с хорошей смачивающей способностью, меньшей плотностью и достаточно активных и надежно защищающих флюсов. При кратковременном нагреве более целесообразно введение в контакт припоя и паяемого металла при температуре пайки.

Обычно при конструировании паяных изделий с предварительной укладкой припоев над вертикальным зазором предусматривают технологические стенки [16]. Затекание припоя в вертикальный зазор сверху на образцах без технологической стенки в условиях контакта его с паяемым металлом при нагреве в печи возможно только при использовании припоев с достаточно малым контактным углом смачивания — олова и ПОС 61. При этом сразу же после расплавления припой затекает в зазор, перетекает в нижнюю его часть, заполняя его на максимально возможную высоту; излишек припоя вытекает из зазора.

Заполнение вертикального зазора сверху жидким свинцом, смачивающим медь, с контактным углом, большим, чем у олова и припоя ПОС 61, и физико-химически не взаимодействующим с нею, не происходит без технологической стенки. На образцах с технологической стенкой жидкий свинец заполняет зазор за большее время, чем олово и припой ПОС 61. Быстрее всех припоев в обоих случаях в зазор затекает олово.

Для конструкций с вертикальными зазорами и затеканием предварительно уложенного припоя сверху для предотвращения образования непропая высота зазора не должна превышать максимально возможную высоту его подъема в условиях пайки. Для припоев с пониженной смачивающей способностью (повышенным контактным углом смачивания) необходимо предусмотреть технологические стенки.

**Склонность меди и ее сплавов к химической эрозии в припоях при пайке и растворимость припоев в меди.** Экспериментальные данные подтверждают, что при погружении в жидкий припой до температуры 500 °С наименее эрозионно-активны припои на основе свинца, затем в порядке возрастания — припои на основе цинка, кадмия, олова, галлия. Способность меди к растворению в этих припоях увеличивается по мере возрастания его химического сродства к основе припоя. Выше температуры 500 °С особенно эрозионно-активны кадмий и цинк. Эрозионная активность припоев системы Sn—Pb возрастает с увеличением в них олова.

Скорость растворения меди в олове, кадмии, цинке особенно

интенсивно возрастает при удельном объеме жидкой фазы  $V_{\text{ж}}/S \geq 4,0$ , где  $S$  — площадь спая. При температурах, близких к температуре перитектического превращения наиболее легкоплавкого интерметаллида (температуры его устойчивости), имеет место торможение процесса растворения меди в жидком припое, что может быть использовано при выборе режима пайки (с целью уменьшения интенсивности эрозии при необходимости пайки при высоких температурах). При пайке при  $V_{\text{ж}}/S \approx 0,02$  (капиллярная пайка в печах и т. д.) скорость эрозии резко снижается после достижения предельной концентрации меди в шве.

Припои на основе цинка вследствие относительно высокой эрозионной активности применяют для пайки меди и ее сплавов при температуре не выше 500 °С. При пайке при температуре выше 500 °С время контакта жидких цинковых припоев с медью должно быть возможно короче: наиболее целесообразно применение индукционного нагрева или нагрева электросопротивлением.

Медь и медные сплавы интенсивно растворяются в жидких серебряных и медно-фосфористых припоях, а медно-никелевые сплавы — в жидкой меди: для сокращения времени контакта твердой и жидкой фаз пайку следует выполнять достаточно быстро. Наименее интенсивно растворяется латунь Л63 в припоях ПСр 50Кд и ПСр 37,5; припои ПСр 40, ПСр 45 и ПСр 15, ПСрМо 68—27—5 растворяют латунь значительно сильнее.

**Особенности нагрева медных сплавов при пайке.** Пайку кислородсодержащей меди (М2, М3) ведут в строго нейтральном пламени, так как при избытке в нем водорода последний диффундирует в металл (начиная с 400 °С и особенно интенсивно при 700 °С), соединяясь со свободным кислородом или оксидом меди (II) и образуя пары воды, способствующие сильному порообразованию в паяном шве.

Свинцовые латуни, кремниевые бронзы, оловянные бронзы и медно-никелевые сплавы склонны к горячеломкости: поэтому детали из них при пайке не нагревают на весу, не подвергают воздействию резких усилий или нагрузок, нагрев при пайке проводят достаточно медленно. Под действием нагрева при пайке возможно снижение механических свойств паяных соединений из бериллиевой бронзы, упрочняемой в процессе старения. Алюминиевые бронзы во избежание окисления и возможности образования хрупких интерметаллидов в шве следует паять, применяя быстрые способы нагрева.

Способы пайки нейзильбера и оловянных бронз легкоплавкими припоями такие же, как способы пайки латуни. При пайке свинцовых бронз следует избегать окисления свинца, оксиды которого могут уменьшить смачивание и растекание припоев. Кроме того, при пайке свинцовой бронзы, особенно при электроконтактной, ввиду низкой растворимости меди в свинце и низкой температуры плавления свинца часть его может вытечь из сплава.

Сплавы меди с никелем (особенно с 10 % Ni) или кремнием

и латуни склонны к хрупкому разрушению в контакте с жидкими легкоплавкими припоями, и поэтому их паяют только в отожженном состоянии.

Обнаружено, что пайка бескислородной меди с высокой электрической проводимостью припоем  $\text{Au} - 65\% \text{Cu}$  при температуре  $1025^\circ\text{C}$  отрицательно сказывается на пределе выносливости (малоцикловой усталости) паяных соединений. При испытании на усталость в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Па}$ ) при температуре  $300^\circ\text{C}$  разрушение крупных образцов вызывается преимущественно растрескиванием в точках контакта границ трех зерен. На образцах меньшей длины излом имеет следы как вязкого разрушения, так и скола.

**Влияние перегрева и пористости на свойства паяных соединений меди.** Для свинцовых припоев вследствие малой растворимости в них меди весьма характерно отсутствие влияния перегрева на прочность паяного соединения. Однако припои ПОС 40 и ПОС 61 перегревать при пайке не рекомендуется, так как прочность паяных соединений может снизиться вследствие роста по границе шва прослойки интерметаллида  $\text{Cu}_5\text{Sn}_6$ .

К числу особенностей оловянно-свинцовых припоев относится также повышенная их склонность к пористости в паяных швах при ширине зазора  $\leq 0,35$  мм (флюс — водный раствор  $\text{SnCl}_2$ ). В паяных швах, выполненных свинцово-серебряными (ПСр 2,5, ПСр 3) или кадмиевыми (ПСр 3Кд) припоями, пористость и непропаи наблюдаются в значительно меньшей степени и лишь при ширине зазора 0,1 мм.

Особенно развитая пористость в паяных швах, выполненных легкоплавкими припоями, наблюдается при пайке латуней (Л63 и др.), чем можно, по-видимому, объяснить более низкую прочность соединений из латуни по сравнению с прочностью соединений из меди (особенно стыковых), паянных теми же припоями. Вероятно, такая склонность к пористости в известной степени обусловлена худшей смачиваемостью латуней легкоплавкими припоями из-за большей химической стойкости  $\text{ZnO}$ , чем  $\text{CuO}$ , и трудностью вывода газовых пор из малых зазоров.

По данным, полученным на медных и латунных образцах, паяных внахлестку с зазором шириной 0,1 мм разными припоями и флюсами, на площадь растекания и появление несплошностей существенно влияют также флюсы. Хорошей растекаемости припоя не всегда сопутствует уменьшение несплошностей в паяемом шве, так как плохая смачиваемость припоем и растекаемость его по паяемому металлу лишь одна из причин образования в шве пористости. При слишком большой растекаемости припоя возможно затекание его по контуру нахлестки и появление непропаев в средней ее части.

Применение латуней Л90, Л68, Л63, ЛС59 в качестве металла для паяных конструкций во многих случаях ограничено в связи с образованием в паяных швах развитой газовой пористости.

Особенно большая газовая пористость в швах наблюдается после флюсовой газовой пайки высокотемпературными (серебряными) припоями крупногабаритных латунных волноводов (массой  $\geq 5 \cdot \text{кг}$ ). Образование такой пористости может привести к ухудшению прочностных, коррозионных, радиотехнических характеристик паяных соединений и их герметичности; брак, связанный с образованием такой пористости, достигает 20—30 %.

По данным С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко и А. М. Никитинского, Б. С. Шеера и Г. А. Асиновской, повышенная пористость в паяных соединениях из латуни при газопламенной пайке серебряными припоями возникает вследствие локальной несмачиваемости паяемой поверхности в результате неравномерного кратковременного нагрева и высокого давления паров цинка и газов, попадающих в полость, недостаточной активности флюса 209 и низкой его вязкости.

Печная флюсовая пайка, обеспечивающая равномерный нагрев, резко уменьшает газовую пористость в швах латунных конструкций, но ухудшает качество поверхности вследствие разложения флюса 209 и образования черных пригаров. При контактно-реактивной бесфлюсовой пайке латуни Л63, покрытой слоем серебра, с шероховатостью поверхности, соответствующей  $Rz = 6 \div 12$  мкм, как без готового припоя, так и с припоями ПСр 72, ПСр 45 и нагревом в печи, эффективно снижается пористость в паяных швах вследствие активного смачивания паяемой поверхности образующейся при контактно-реактивном плавлении со слоем серебра эвтектикой [16]. При газопламенной пайке мелких деталей из латуни пористость не образуется при применении флюса «Салют-1».

В последние годы возникла необходимость замены дефицитных серебряных припоев при пайке латуней более дешевыми и недефицитными медно-фосфористыми припоями, без добавки и с добавкой цинка, сурьмы, кремния. Однако при этом обнаружено, что припои системы  $\text{Cu}-\text{P}$  с сурьмой или цинком при пайке соединений с зазором шириной 0,3—0,6 мм обеспечивают невысокую прочность ( $\tau_{\text{ср}} = 147 \div 176,4$  МПа) и слабо удерживаются в вертикальных зазорах: припои  $\text{Cu}-\text{P}$  с кремнием (ПМФС6-0,15) обеспечивают более высокую прочность паяных соединений.

При введении в припой  $\text{Cu} - 10\% \text{ P}$  цинка резко понижается площадь растекания припоя по латуни, но сопротивление срезу соединения возрастает от 147 до 167,8 МПа (при 30 % Zn): ударная вязкость возрастает от 49 до 98 Дж/м<sup>2</sup>.

**Диффузионная пайка меди.** Вследствие широкой области твердых растворов на основе меди в системах  $\text{Cu}-\text{Ga}$  и  $\text{Cu}-\text{Sn}$  диффузионная пайка меди и латуни может быть выполнена оловом, припоями ПОС 40, ПОС 61 или пастами, содержащими медный порошок и галлий, медный порошок и порошок олова (например, с водным флюсом, содержащим 18 %  $\text{ZnCl}_2$ : 12 %  $\text{NH}_4$ :  $\text{H}_2\text{O}$  остальное).

Согласно диаграмме состояния системы  $\text{Cu—Ga}$  при температуре  $200^\circ\text{C}$  существует область твердых растворов на основе меди с содержанием до 20 % Ga. Среди интерметаллидов, образующихся в этой системе, лишь один является дальтони́дом ( $\text{CuGa}_2$ -фаза): он стабилен при температуре ниже  $254^\circ\text{C}$ . Остальные химические соединения относятся к электронному типу (модификации  $\beta$ -латуни):  $\gamma_3$  (ниже  $468^\circ\text{C}$ ),  $\gamma_2$  (ниже  $485^\circ\text{C}$ ),  $\gamma$  ( $836^\circ\text{C}$ ) и  $\beta$  ( $915^\circ\text{C}$ ).

Исследования, проведенные С. В. Лашко и В. Л. Гришиным в 1964 г., подтвердили возможность диффузионной пайки меди галлиевой пастой (50 % Ga — 50 % Cu) в вакууме ( $p=66,5 \times 10^{-2}$  Па) в течение 1—8 ч под давлением 49,3—58,8 кПа. Сопротивление срезу соединений по мере повышения температуры затвердевания от 50 до  $650^\circ\text{C}$  увеличивалось от 3,9 до 58,8 МПа.

Причиной сравнительно невысокого сопротивления срезу образцов было слишком большое количество галлия, оставшееся в шве. При этом выяснилась необходимость нагрева при пайке галлиевыми пастами в безокислительной среде (вакууме,  $p=6,65 \cdot 10^{-1}$  Па), так как нагрев на воздухе выше температуры  $400^\circ\text{C}$  приводит к резкому снижению сопротивления срезу паяных образцов из-за окисления галлия.

Л. А. Малохиной в 1983 г. была показана возможность диффузионной пайки меди М1 пастой галлия (65—70 %) с тонкодисперсным порошком меди, прокаленным предварительно в вакууме ( $p=6,65 \cdot 10^{-2}$  МПа) при  $700^\circ\text{C}$ . Паста предварительно выдерживалась при температуре  $18^\circ\text{C}$  в течение 3—4 сут. Перед пайкой пасту закладывали в зазор и под давлением 4,9—5,9 МПа нагревали до  $650^\circ\text{C}$  в вакууме ( $p=1,33 \cdot 10^{-1}$ — $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) в течение часа. Паяные соединения имели сопротивление срезу 60 МПа и температуру распайки выше  $1000^\circ\text{C}$ . В паяных соединениях при этом образуется диффузионная зона шириной до 50 мкм. Пайка на воздухе недопустима из-за интенсивного окисления галлия на воздухе. Временное сопротивление разрыву соединений, паянных на воздухе, едва достигает 5 МПа.

По данным Л. Л. Гржимальского, диффузионная пайка медных образцов галлиевыми пастами при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 90 мин с применением повышенного давления 1,47—2,94 МПа обеспечивает временное сопротивление разрыву стыковых соединений из меди до 196 МПа, т. е. равнопрочность соединений. Паста состояла из 60 % Ga, 30 % порошка меди (ПМ2) и 10 % In (ИН-0). Введение галлия снизило температуру плавления легкоплавкой составляющей до  $15,7^\circ\text{C}$  и улучшило ее смачивающую способность. Нагрев проводили ТВЧ в среде водорода на установке для диффузионной сварки типа А.306.08. Температура распайки образцов достигла  $950$ — $1000^\circ\text{C}$ . Показана возможность диффузионной пайки кобальта и железа, покрытых предварительно медным или никелевым покрытием. Стыковые соединения из железа с никелевым гальваническим покрытием, паянные галлиевой пастой

того же состава, после нагрева при температуре 600 °С в течение 30 мин и давлении 2,94 МПа имели  $\sigma_{\text{в}} = 274,4$  МПа. Температура распайки достигла 1040—1050 °С.

При диффузионной пайке меди М1 оловом обнаружено, что при нагреве образцов в интервале температур 500—650 °С при выдержке 10—120 мин в шве интенсивно развивается диффузионная пористость в виде мелких пор, локализующихся главным образом в прослойке интерметаллида ( $\epsilon$ -фазы), рядом с паемым металлом. С увеличением выдержки при температуре 500 °С до 60—120 мин заметно увеличивается ширина прослойки  $\epsilon$ -фазы и число пор в ней, а ширина центрального участка шва со структурой эвтектики  $\eta + \epsilon$  — сужается.

После быстрого нагрева (за 1—2 мин) до температуры 700 °С в шве не обнаружено прослоек  $\epsilon$ -фазы и диффузионной пористости: шов состоит из редких участков  $\alpha$ - и  $\delta$ -фаз, разделенных протяженными участками с общими зернами твердого раствора  $\beta$ .

При образовании и развитии рядом со швом интерметаллидных прослоек  $\epsilon$ -фазы и пор снижается и без того невысокое сопротивление срезу паяного шва (с 343 до 9,8 МПа). При выдержке при температуре 650 °С в течение 600 мин поры и  $\epsilon$ -фаза в шве не образуются.

По данным рентгеноспектрального анализа, вблизи диффузионных пор интерметаллид становится обогащенным оловом, что может быть обусловлено большей скоростью ухода из него атомов меди в шов, чем атомов олова в медь. При нагреве до 800 °С в течение 15 мин прочность паяных соединений резко возрастает и достигает  $\tau_{\text{ср}} = 15$  МПа.

По данным С. Дебрита, В. Хоффмана и других исследователей,  $\epsilon$ -фаза в контакте припоя ПОС 61 с медью при выдержке 72 ч появляется лишь при температуре 400 °С. При температуре 500 °С в  $\epsilon$ -фазе возникает пористость Киркендала. Рост  $\epsilon$ -фазы происходит по закону  $X^2 = K(T)$ , что находится в полном согласии с данными авторов о развитии диффузионной пористости в соединениях из меди, паянных оловом [15].

Авторами совместно с О. И. Грицевец и Т. Н. Волковой показано, что высокотемпературная пайка меди оловом взамен серебряных припоев с образованием достаточно прочного паяного соединения ( $\tau_{\text{ср}} = 147 \div 176,4$  МПа) возможна при температуре 800—820 °С с выдержкой 15—120 мин, а при быстром (за 1—2 мин) нагреве — при 700 °С в течение 120 мин. Для диффузионной пайки меди оловом для сокращения времени гомогенизации и уменьшения диффузионной пористости могут быть использованы композиционные припои, состоящие из смеси порошков меди и олова, прокаленных предварительно в вакууме ( $p = 6,65 \cdot 10^{-2}$  Па) при 700 °С. Паста предварительно выдерживалась при температуре 18 °С в течение 3—4 сут. Перед пайкой пасту закладывали в зазор и под давлением 4,9—5,9 МПа нагревали до 650 °С в вакууме ( $p =$

$=1,33 \cdot 10^{-1} < 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) в течение часа. Паяные соединения имели  $\tau_{\text{ср}} = 60$  МПа и температуру распайки выше  $1000^\circ\text{C}$ . В паяных соединениях при этом образуется диффузионная зона шириной до 50 мкм. Пайка на воздухе недопустима из-за интенсивного окисления галлия. Временное сопротивление разрыву паянных на воздухе соединений едва достигает 5 МПа.

По данным Л. Л. Гржимальского, диффузионная пайка медных образцов галлиевыми пастами при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 90 мин с применением повышенного давления 1,47—2,94 МПа обеспечивает временное сопротивление разрыву стыковых соединений из меди до 156 МПа, т. е. равнопрочность соединений. Паста состояла из 60 % или 30 % порошка меди ПМ2 и 10 % Ga. Введение галлия снизило температуру плавления легкоплавкой составляющей до  $15,7^\circ\text{C}$  и улучшило ее смачивающую способность. Нагрев проводили ТВЧ в среде водорода на установке для диффузионной сварки типа А.306.08. Температура распайки образцов достигла  $950\text{—}1000^\circ\text{C}$ . Показана возможность диффузионной пайки кобальта и железа, покрытых предварительно медным или никелевым покрытием. Стыковые соединения из железа с никелевым гальваническим покрытием, паянные галлиевой пастой того же состава, после нагрева при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 30 мин и давлении 2,9 МПа имели  $\tau_{\text{ср}} = 274,4$  МПа. Температура распайки достигла  $1040\text{—}1050^\circ\text{C}$ .

## Глава 9

# ПАЙКА СТАЛЕЙ И ЧУГУНА

### 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

В зависимости от легирования сталей, температуры, среды и длительности нагрева на их поверхности образуются один или несколько слоев оксидов различного состава и термической стойкости. На углеродистых сталях возникают последовательно три слоя оксидов, отличающихся содержанием кислорода:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Последний оксид стабилен при температуре выше  $560^\circ\text{C}$  и при охлаждении распадается на  $\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$ . Последовательность образования, состав и структура оксидов на поверхности различных сталей определяются процессами взаимной диффузии кислорода из газовой среды и легирующих элементов из внутренних слоев стали к ее поверхности, а также широкой областью однородности структуры оксидов указанных выше типов в связи с существованием изоморфных оксидов типа  $\text{Me}_2\text{O}_3$  ( $\text{Me} = \text{Fe, Ni, Co}$ ),  $\text{Me}'\text{Me}'_2\text{O}_3$  ( $\text{Me}' = \text{Fe, Ni, Co}$ ;  $\text{Me}' = \text{Fe, Ni, Co}$ ) и  $\text{MeO}$  ( $\text{Me} = \text{Fe, Ni, Co, Mn, Mg, Ti}$ ) и др.

Поверхности деталей и припоя перед пайкой можно очищать химически или механически — металлической щеткой, шлифовальной шкуркой, шлифовальными кругами, дробеструйной обработкой. Детали, подвергаемые обработке резанием с эмульсией, только обезжиривают. В условиях массового производства тонкостенных деталей их поверхности очищают от оксидной пленки травлением в водных растворах кислот. Водный раствор для травления низкоуглеродистой и углеродистой сталей может содержать 10—15 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Процесс обработки в таком растворе состоит из травления, промывки в горячей проточной воде, нейтрализации в горячем растворе щелочи, промывки в горячей воде и сушки. Составы ванн для травления: 1) 1 объем серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (плотность  $1,4 \text{ г/см}^3$ ); 3 объема азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  (плотность  $1,4 \text{ г/см}^3$ ); 50 г/л фтористого натрия  $\text{NaF}$ ; режим травления:  $t = 17 \div 28^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 5 \div 20$  мин; 2) 85 г/л серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 215 г/л соляной кислоты  $\text{HCl}$ ; 10 г/л азотной кислоты  $\text{HNO}_3$ ; режим травления  $t = 50 \div 70^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 5 \div 10$  мин, раствор этого состава должен находиться в керамической ванне; 3) 1 г/л соляной кислоты; 3—5 г/л ингибитора; 1,5—2 г/л хлористого натрия; режим травления:  $t = 17 \div 28^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 10 \div 30$  мин.

Процесс травления в растворах составов 1 и 3 ведут в стальных ваннах, футерованных винипластом. Растворы составов 1 и 2 применяют для травления перед пайкой высоколегированной стали, содержащей на поверхности толстый слой оксидов (окалину). Раствор состава 3 применяют для травления перед пайкой углеродистой стали с окалиной и ржавчиной. После травления в растворе 3 проводят промывку деталей в горячей воде при температуре 50—70 °С в течение 30—40 с, осветление в растворе азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  (350—400 г/л) и плавиковой кислоты (4—5 мл/л) при температуре 17—28 °С в течение 10—20 с; промывку деталей проводят в горячей воде при температуре 50—70 °С в течение 30—40 с, сушку в сушильном шкафу при температуре 80—100 °С в течение 20—30 мин.

Травление коррозионно-стойких сталей может быть выполнено в растворах следующих составов: 1) 2—3 %  $\text{HCl}$ , 7—8 %  $\text{HNO}_3$ , 0,2 %  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  — остальное; температура раствора 20 °С; 2) 3 %  $\text{HNO}_3$ , 7 %  $\text{HCl}$ , 90 %  $\text{H}_2\text{O}$ ; температура раствора 80 °С; 3) 23 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 27 %  $\text{HCl}$ , замедлитель 15 %  $\text{KClO}$ , 0,1 % сульфированного клея,  $\text{H}_2\text{O}$  — остальное; температура раствора 40—50 °С; 4) 45 %  $\text{HCl}$ , 5—10 %  $\text{HNO}_3$ , замедлитель 0,1 %  $\text{KCl}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  — остальное; температура раствора 40—50 °С; 5) 1—2 %  $\text{BCl}$ , 10 %  $\text{HNO}_3$ , 0,1 % сульфированного клея,  $\text{H}_2\text{O}$  — остальное; температура раствора 40—50 °С; 6) 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 20 г/л  $\text{HCl}$ , 20 г/л  $\text{NaNO}_3$ ; температура раствора 70—75 °С.

После травления в растворе состава 1 детали обрабатывают в 25—30 %-ном растворе соляной кислоты до почернения их поверхности, промывают в холодной проточной воде, щеткой в горячей воде, в 10—15 %-ном водном растворе соды и снова в горячей воде. Сушат при температуре 100 °С.

Существенное значение имеет чистота обработки поверхности при укладке припоя у зазора; поверхность должна иметь параметры шероховатости:  $Ra=2,5 \div 0,63$  мкм;  $Rz=20 \div 10$  мкм; направление рисок должно совпадать с направлением затекания припоя. При размещении припоя в зазоре шероховатость поверхности не так важна.

Подготовленные под пайку детали хранят в сухом помещении при температуре не ниже 16 °С не более 48 ч, после чего требуется повторная очистка поверхности стали. В полиэтиленовых мешках срок хранения может быть увеличен. Конструкционные стали при длительном хранении защищают от окисления лужением или путем гальванического покрытия медью или никелем. Стальные изделия собирают с требуемым зазором, определяемым составом припоя и способом пайки по нагреву, удалению оксида.

При пайке углеродистых и низкоуглеродистых сталей легкоплавкими припоями ПОС 40, ПОС 61 в качестве флюсов могут быть использованы главным образом флюсы с ортофосфорной кислотой или активированные хлоридами цинка, олова, меди, кадмия.

По площади растекания мерной навески припоя ПОС 61 при нагреве в течение 54 с при температуре испытания обнаружено, что по мере возрастания активности флюсы для пайки углеродистых и низколегированных сталей можно расположить в следующий ряд: ЛК2, ЛТИ120, водный раствор  $ZnCl_2$ , 38Н, 10, «Прима 2». Наиболее активны при пайке этих сталей флюсы 10 и «Прима» [15].

Для улучшения качества паяных соединений из углеродистых и низколегированных сталей соединяемые поверхности деталей иногда предварительно подвергают лужению с применением водного раствора хлористого цинка, после чего тщательно смывают остатки флюса. Изделия паяют с флюсами, остатки которых не вызывают существенной коррозии, например, с канифольно-спиртовым флюсом.

Облуженные детали больших размеров паяют непрерывно подогреваемыми газовыми паяльниками или кислородно-водородными горелками; в качестве флюса при пайке в пламени горелок применяют триэтаноламин; считают, что остатки триэтанолamina не вызывают коррозии паяных соединений. Триэтаноламин, в отличие от флюсов ЛТИ120, ЛК62 и т. п., не обугливается в пламени горелок.

Характерно, что среди основ или компонентов припоев весьма слабое химическое сродство с железом имеют: Ag, Bi, Pb, Cd, Cu; слабым химическом сродством с ним обладают Au, Pd, Ga, Ni; более сильным химическим сродством Sn, образующее с ним химическое соединение с закрытым максимумом и монотектику. Сильным химическим сродством с железом обладают такие элементы, как Al, P, Ga, Si, Ti, Zr, Zn, образующие с ним диаграммы состояния с одним или несколькими химическими соединениями. Это во многом определяет характер их физико-химического воздействия, влияющего на совместимость сталей с припоями. В частности, образование прослоек хрупких соединений на границе со швом наиболее вероятно при содержании в припоях таких компонентов, между которыми с железом образуются химические соединения с открытым или закрытым максимумом при кристаллизации. Критические количества этих компонентов в припоях достаточно малы, и это следует учитывать при выборе системы легирования и соотношения компонентов.

Из легкоплавких припоев для пайки сталей нашли применение олово и оловянно-свинцовые припои: ПОС 40, ПОС 61. В паяных соединениях, выполненных этими припоями, образуются твердые растворы железа с оловом, а также прослойка химического соединения  $FeSn_2$ .

Соединения из оцинкованного железа, паянные оловянно-свинцовыми припоями, содержащими сурьму, имеют меньшую прочность и пластичность, чем соединения из стали или луженого железа, паянные бессурьмянистыми оловянно-свинцовыми припоями, из-за образования хрупких химических соединений с сурьмой по

Т а б л и ц а 45. Механические свойства нахлесточных соединений из стали или железа, паянных оловянно-свинцовыми припоями

| Припой  | $\tau_{ср}$ , МПа               |                     |              | $\sigma_s$ , МПа                |
|---------|---------------------------------|---------------------|--------------|---------------------------------|
|         | Железо, низкоуглеродистая сталь | Оцинкованное железо | Луженая жечь | Железо, низкоуглеродистая сталь |
| Pb      | 3,2                             | 5,0                 | —            | 77,42                           |
| ПОС 40  | 60                              | 46,0                | 48,0         | 98,98                           |
| ПОС 30  | 49                              | 41,1                | 35,3         | 112,7                           |
| ПОС 18  | 5,0                             | 42,1                | 45,1         | 102,9                           |
| ПОС 4—6 | 48,0                            | 25,5                | 44,1         | 100,9                           |
| Sn      | 13,7                            | 16,7                | —            | 77,4                            |

границе паяного шва (табл. 45). Прочность имеют соединения, паянные припоями ПОС 50 и ПОС 61. Прочность соединений зависит и от технологии пайки и величины нахлестки. Этим объясняется некоторое различие данных по прочности у разных исследователей. В частности, на прочность могут оказать влияние перегрев припоя, длительность пайки, состав флюса и т. п.

После пайки стали 20 легкоплавкими припоями с применением в качестве флюса водного раствора хлористого цинка сопротивление срезу соединений, паянных оловом при зазоре 0,1 мм, составляет (в среднем) 32,3 МПа, при пайке припоем ПОС 40—33,9 МПа, ПСр 2,5—27,4 МПа. При изменении ширины зазора от 0,1 до 0,3 мм сопротивление срезу не изменяется.

Временное сопротивление разрыву стыковых соединений из стали 20 составляет в среднем при пайке оловом 67,6 МПа, ПОС 61—56,8 МПа; ПОС 40—67,6 МПа; ПСр 2,5—5,09 МПа; сплавом Розе—21,3 МПа; существенно влияет на временное сопротивление при пайке стали 20 встык оловом и оловянно-свинцовыми припоями перегрев припоя. При перегреве припоя на 100 °С выше температуры ликвидуса временное сопротивление разрыву стыковых соединений, паянных припоем ПОС 40, в среднем снижается с 67,6 до 53,3 МПа, ПОС 61—с 5,9 до 29,4 МПа; оловом—с 67,6 до 44,1 МПа и сопровождается увеличением пористости шва, что, вероятно, и снижает прочность соединений.

Образующиеся в вакууме на поверхности высоколегированных коррозионно-стойких сталей типа 12Х18Н9Т, 14Х17Н2 и других оксиды со структурой шпинели не восстанавливаются жидким оловом. При 800 °С низкий угол смачивания таких сталей оловом, вероятно, связан с растрескиванием оксидной пленки и физико-химическим взаимодействием стали и железа с жидким оловом выше температуры образования соединения  $FeSn_2$ . По данным Г. С. Ходакова, энергия активации смачивания стали 12Х18Н9Т оловом при температуре 1000—1100 °С равна 103 586 Дж/моль, что соизмеримо с энергией активации диспергирования оксида под действием жидкого металла.

Из порошков оксидов ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), образующихся на поверхности сталей и олова при нагреве в вакууме, замешанных на воде, были отпрессованы таблетки под давлением  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Зависимость от температуры угла смачивания оловом таких таблеток показывает, что характер этой зависимости для  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  близок к характеру зависимости для коррозионно-стойких сталей. Углы смачивания для стали Ст3 и армко-железа, особенно при температуре до  $600^\circ\text{C}$ , близки к углам смачивания оловом оксида  $\text{SnO}_2$ . Вероятно, в этом случае жидкое олово проникает через несплошности в оксидной пленке и, реагируя с ней, образует оксиды олова<sup>1</sup>, по которым и происходит смачивание. При достаточной растворимости железа в олове будет развиваться диспергация оставшихся участков оксидной пленки. Полное смачивание образовавшегося оксида  $\text{SnO}_2$ , вероятно, происходит при температуре от  $700^\circ\text{C}$  и выше, что, по-видимому, обусловлено слабой растворимостью железа в олове при нагреве до  $700^\circ\text{C}$ , большой стойкостью шпинелей при воздействии на них жидкого олова. При вакуумной пайке стали оловом сначала происходит смачивание ее поверхности, а затем растекание олова. При этом капля олова сначала подплавляет материал под оксидной пленкой и затем происходит растекание олова. Установлено, что растекание начинается от температуры начала испарения олова в вакууме ( $p = 6,65 \cdot 10^{-2}$  Па). Поэтому было сделано предположение, что энергия активации растекания равна энергии активации испарения олова.

Процесс смачивания железа и углеродистой стали оловом в вакууме обусловлен нарушением сплошности верхнего рыхлого слоя  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , образующегося на их поверхности при температуре ниже  $560^\circ\text{C}$ . При взаимодействии этого оксида с жидким оловом происходит восстановление железа, так как свободная энергия реакции достигает  $-75,7$  Дж ( $t = 298^\circ\text{C}$ ) и  $-68,2$  Дж ( $400^\circ\text{C}$ ). На поверхности стали при температуре выше  $560^\circ\text{C}$  оксид  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  разлагается. По отношению к оксидам  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  олово не является восстановителем при температуре  $560^\circ\text{C}$ .

Легкоплавкие припои на основе цинка малопригодны для пайки углеродистых и низколегированных сталей из-за плохого смачивания, затекания в зазор и низкой прочности паяных соединений в результате образования по границе шва и стали интерметаллидной хрупкой прослойки.

Кадмиевые припои системы  $\text{Cd—Ag}$ , состоящие из металлов, не образующих твердых растворов с железом, без предварительного меднения плохо растекаются по его поверхности и не обеспечивают прочных паяных швов. Кадмиево-серебряные припои, легированные цинком — элементом, химически активно взаимо-

---

<sup>1</sup> Свободная энергия реакции  $2\text{FeO} + \text{SnO} = 2\text{Fe} + \text{SnO}_2$  при  $298^\circ\text{C}$  равна  $29,1$  кДж°, при  $400^\circ\text{C}$  —  $22,2$  кДж°, при  $800^\circ\text{C}$  —  $7,5$  кДж; при  $1100^\circ\text{C}$  —  $30,1$  кДж.

действующим с железом, способствуют получению более прочных соединений, чем припои типа ПОС или системы Pb—Sn.

Высокотемпературную пайку углеродистых сталей медью ведут в активных атмосферах, в которых восстанавливаются оксиды железа и меди при температуре 1093—1149 °С в водороде и его смесях с эндогазом или азотом. Активность смесей зависит от содержания водорода и паров воды; о влажности водорода и его смесей судят по точке росы, т. е. температуры, при которой из газовой среды начинает конденсироваться вода.

Как известно, оксиды FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, образующиеся на поверхности железа при температуре 20 °С, устойчивы при температуре 300—1000 °С, а в вакууме ( $p = 6,65 \cdot 10^{-1}$  Па) при нагреве до 950 °С. Оксид Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет упругость диссоциации при температуре 950 °С  $p_{O_2} = 3,15 \cdot 10^{-2}$  Па.

Минимальное содержание водорода в газовой смеси с азотом составляет 6 % при точке росы 21 °С. Экзотермический газ (6—13 % H<sub>2</sub>; 5—10 % CO и 5—7 % CO<sub>2</sub>) с точкой росы 2—4 °С является обычной восстановительной атмосферой для пайки низкоуглеродистых сталей медью. Для пайки коррозионно-стойких сталей необходима активная газовая среда со значительно более низкой точкой росы, чем для пайки низкоуглеродистых сталей, и с более высоким содержанием водорода (15—30 %).

Водород в богатом эндогазе восстанавливает оксиды на стали при температуре 538 °С, а при 316—538 °С может окислять сталь и приводить к образованию на ней голубого налета (оксида).

В последнее время из-за возрастания стоимости природных газов стала экономичной частичная замена их более дешевым азотом.

Водород стоит в 2—4 раза дороже, чем азот, поэтому применение газовых смесей его с азотом также существенно удорожает процесс пайки.

При введении в азот природных газов (4,9 %) возникает необходимость в обеспечении весьма низкой точки росы смеси. Лишь при этом достигается высокое качество соединений, паянных медью, и чистая поверхность стали. Однако при применении паст, содержащих оксиды меди, на поверхности деталей образуются черные рыхлые продукты, содержащие 7 % C, 62 % Cu, и возникает опасность науглероживания стали.

В качестве активных газовых сред для пайки сталей медью более экономичными являются смеси азота с метанолом. Метанол разлагается при нагреве, связывая кислород:  $CH_4 \rightarrow C + 2H_2O$ . При этом углерод может реагировать с водой и CO<sub>2</sub>, присутствующими в атмосфере. Газовая смесь поступает в печь, охлажденную до 4 °С, а точка росы печной атмосферы составляет 10—12,8 °С.

Стоимость метанола немного выше стоимости азота. Экспериментально подтверждено, что атмосфера азота с метанолом обеспечивает получение качественных паяемых стальных изделий при пайке медью и пастой, содержащей оксиды меди. Стоимость про-

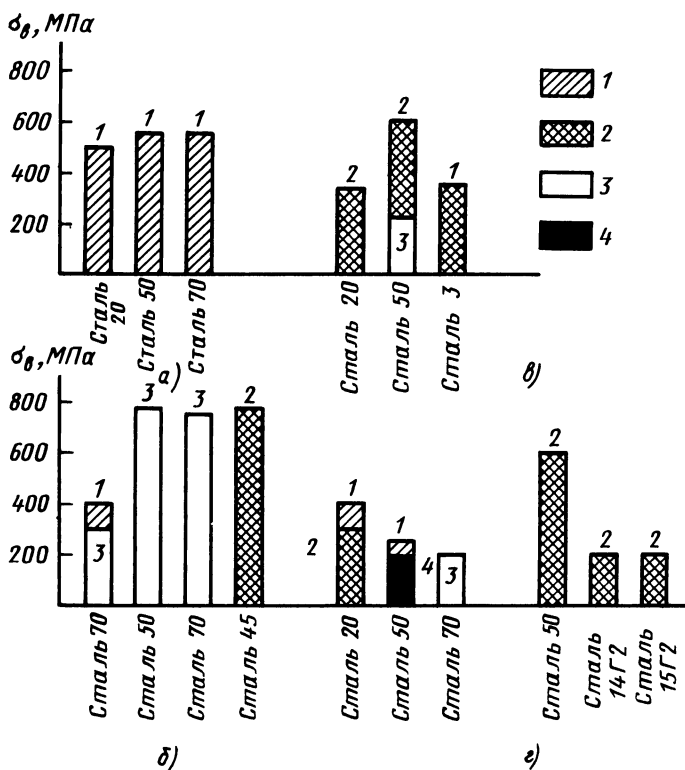


Рис. 53. Временное сопротивление разрыву соединений из углеродистых сталей паяных медью (а); латунями ЛОК62-06-04 (б) и Л63 (в); припоем ВЗМИ-87 (г) при различных способах нагрева:

цесса пайки в среде ( $N_2 + \text{метанол}$ ) значительно ниже, чем в атмосфере водорода и азота с водородом. При пайке скорость протекания этой смеси должна быть 9,3—13,9 см/мин.

Соединения из сталей, выполненные медью, медно-цинковыми и медно-серебряными припоями с флюсами ПВ200, ПВ209 или бурой, в том числе легированные кадмием и цинком — ПСр 40, ПСр 45 и др. обладают более высокой прочностью (исключая соединения, паянные припоями, содержащими значительное количество фосфора). Швы соединений, выполненные медью, техническим серебром, латунью, более прочны, чем исходные припой. Так, например временное сопротивление литой меди составляет 186,2—196 МПа, а стальных соединений, паянных медью в защитной среде, — 343 МПа; в отдельных случаях до 650 МПа (рис. 53, а, б). Временное сопротивление стального соединения, паянного техническим серебром, равно 333 МПа ( $\sigma_{\text{ср}}$  серебра равно 156,8 МПа). Временное сопротивление соединения из стали с 0,6 % С, паянного

в газовом пламени латунию Л63, изменяется в пределах 260—550 МПа при изменении ширины зазора от 2 до 0,2 мм.

Сопротивление срезу литой меди составляет 127 МПа; стального соединения, паянного медью, равно 166,6—196 МПа. Предел выносливости паяного соединения, как правило, ниже, чем предел выносливости стали. Повышение прочности паяных швов, выполненных медью, обусловлено растворением железа в жидкой меди. При последующем охлаждении паяного соединения в шве могут выделяться дендриты твердого раствора меди в железе. Медь и некоторые медные припои склонны к проникновению по границам зерен железа, низкоуглеродистых и конструкционных сталей.

В качестве припоя при пайке углеродистых и низколегированных сталей иногда используют чугуны.

По данным Т. Осава, способ контактной твердогазовой пайки в парах цинка был использован для пайки углеродистой стали, плакированной медью. Состав стали 0,35 % С. Толщина слоя медного гальванического покрытия 10 мкм. Перед пайкой поверхность медного покрытия обезжиривали трихлорэтиленом; нагрев проводили в парах цинка при 860—940 °С. При этом в паяном соединении образовывался сплав  $\text{Cu—Zn}$ . Пары цинка получали из гранулированного цинка, помещенного в открытые карманы контейнера. Нагрев вели в атмосфере водорода в течение 60 с. Содержание цинка в жидкой фазе зависело от температуры (содержание цинка повышалось с увеличением температуры). При этом в структуре паяного шва образовывались соответственно фазы  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$  или  $\beta$ . Время пайки должно было быть возможно короче, чтобы предотвратить рост зерна паяемого материала и проникновение припоя по границам основного материала. Наилучшей температурой формирования шва была температура 880 °С. Отмечено, что при контактном твердогазовом плавлении припоя обеспечивается более низкая температура пайки, чем при пайке готовыми припоями того же состава, и более высокое качество паяных соединений.

## 2. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ

В паяных изделиях применяют коррозионно-стойкие стали: ферритные, легированные хромом; аустенитные и аустенитно-ферритные, легированные хромом и никелем; мартенситные и аустенитно-мартенситные, легированные ферритообразующими элементами — алюминием, титаном, молибденом и т. п.

На поверхности этих сталей образуются оксиды, химически более стойкие из-за растворенного в них хрома [16]. При нагреве в вакууме на поверхности обнаружены только оксиды типа шпинели ( $\text{FeO} \cdot \text{Me}_2\text{O}_3$ ), тогда как при нагреве на воздухе выявляются, как правило, два вида оксидов  $\text{Me}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO} \cdot \text{Me}_2\text{O}_3$ . Оксиды  $\text{Me}_2\text{O}_3$ , появляющиеся при более высоких температурах, обогащены хромом, а на поверхности сталей, особенно богатых хро-

мом, образуется оксид хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Поэтому при низкотемпературной пайке таких сталей необходимо применять более активные флюсы. При пайке легированными припоями в этом случае непригодны обычные канифольно-спиртовые флюсы, активированные  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , а также хлоридные флюсы  $\text{ZnCl}_2$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , их смеси и растворы. В качестве флюса пригоден раствор ортофосфорной кислоты плотностью 1,6—1,7 г/см<sup>3</sup>.

Ортофосфорная кислота вызывает сильную коррозию стали; для ослабления коррозионного действия она обычно растворяется в смеси спирта (этиленгликоля, этилового) с защитными составляющими флюсов, в частности с канифолью. Рекомендован следующий состав флюса (ЛМ1): 100 мл ортофосфорной кислоты, 300—500 мл винного спирта или этиленгликоля и 20—100 г канифоли. Оптимальный состав флюса: 100 мл ортофосфорной кислоты, 400 мл спирта или этиленгликоля и 30 г канифоли. Такой флюс слабокоррозионный и применим при пайке в интервале температур 280—320 °С; при температуре 350 °С и выше флюс улетучивается, а спирт воспламеняется. При нагреве ортофосфорной кислоты до температуры 200—300 °С она превращается в пиротрифосфорную кислоту  $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ . В температурном интервале образования пиротрифосфорной кислоты флюс наиболее активен.

После пайки с флюсом ЛМ1, содержащим ортофосфорную кислоту, промывка паяного соединения в щелочи необязательна; достаточно удалить флюс протиркой. Ввиду возможного улетучивания составляющих флюса нагрев при пайке проводят паяльником или погружением в жидкий припой. При пайке с перегревом в газовом пламени и в печи прочность паяного шва может оказаться пониженной (табл. 46).

При низкотемпературной пайке коррозионно-стойких сталей 12Х18Н10Т флюсы в порядке возрастания активности можно расположить в ряд ЛМ1; 38Н; 25.

Припой ПОС 61, ПОС 40 и олово плохо затекают в зазор при пайке стали 12Х19Н9Т с флюсами ЛК2, НИСО, КЭ, а олово также и с флюсами: водным раствором  $\text{ZnCl}_2$ , ЛМ1.

Применение флюса ЛМ1 и флюса с 40 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  остальное при пайке оловянно-свинцовыми припоями приводит, кроме

Т а б л и ц а 46. Механические свойства соединений из стали 12Х18Н9Т, паянных паяльником с флюсом ЛМ1

| Припой   | $\sigma_{\text{ср}}$ нахлесточных соединений, МПа | $\sigma$ , стыковых соединений, МПа |                        |
|----------|---|-------------------------------------|------------------------|
|          |   | без перегрева                       | с перегревом на 100 °С |
| Олово О2 | 30,9  | —                                   | —                      |
| ПОС 30   | 28,4  | —                                   | —                      |
| ПОС 40   | 29,4  | 39,2                                | 25,5                   |
| ПОС 61   | —   | 59,8                                | 40,2                   |

того, к образованию значительной пористости в капиллярном участке шва. Припой ПСр 2,5 при пайке с флюсом ЛМ1 совсем не растекается и не затекает в зазор на образцах из стали 12Х18Н10Т. При пайке стали 10 кадмиевыми припоями ПСр 3Кд, ПСрК5ЦН с флюсами ЛМ1, 40 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и флюсом № 3 обнаружено весьма слабое затекание их в зазоры и значительная пористость в шве.

Наиболее активны и удобны при пайке коррозионно-стойкой стали припоем ПОС 61 флюс Ф25, а при пайке стали 10— флюсы Ф10 и «Прима 2». Флюсы Ф10 и Ф25— реактивного действия; при их контакте со сталью на ее поверхности высаживаются олово и кадмий, которые образуют легкоплавкий подслоя, облегчающий растекание припоя. Остатки этих флюсов необходимо после пайки тщательно смывать.

Коррозионно-стойкие стали различных типов паяют припоями на основе серебра, меди, никеля с флюсами, содержащими буру, борный ангидрид, или с флюсами, содержащими фториды металлов или смесь буры, борного ангидрида с фторборатами. При пайке при температуре 600—800 °С наиболее широкое применение получили флюсы ПВ209, ПВ284 и 18В. При температуре выше 800 °С обычно паяют с флюсами ПВ200 и ПВ201.

При пайке в пламени горелок деталей из коррозионно-стойкой стали флюсы ПВ200 и ПВ201 необходимо наносить на паяемую поверхность в виде пасты, замешанной на воде, до начала ее нагрева, а во время нагрева и пайки продолжать обильное флюсование; флюс ПВ209 наносят при пайке; предварительное нанесение флюса ПВ209 на детали из коррозионно-стойких сталей приводит к «прикипанию» флюса, что затрудняет смывку его остатков после пайки. Остатки флюса ПВ200 после пайки необходимо удалять в том случае, если изделие изготовлено из стали 09Х15Н8Ю.

Все эти флюсы в пламени горелок из-за взаимодействия с газами быстро теряют активность; время их контакта с пламенем горелок ограничивают 4—5 мин. Детали предварительно подогревают до температуры 400—450 °С.

Пайку в печах стальных изделий с флюсом ведут только при возможности удаления со стали окалины и при наличии припусков на обработку резанием. При печной пайке в контейнере с аргоном с потоком последнего может быть занесен воздух. Поэтому паемые изделия экранируют стальными экранами типа крышек или колпаков. При пайке в вакууме, во избежание окисления стальных деталей при охлаждении, откачку продолжают до температуры 150—200 °С.

Дозирование флюса облегчает процесс удаления его продуктов после пайки. Остатки флюсов ПВ209 и ПВ284 вызывают коррозию; они рыхлые и легко растворяются в воде в течение нескольких минут. Их удаляют промывкой в проточной холодной воде мягкой металлической щеткой. Флюсы ПВ200 и ПВ201 образуют после пайки твердую стекловидную корку, растворимую в 10 %

ном растворе кислого сернокислого натрия или калия (при 20 °С в течение 1—1,5 ч или при 40—45 °С в течение 15—20 мин; при 70—80 °С в течение 10 мин с последующей промывкой в воде и сушкой). Возможно удаление остатков флюсов также путем кипячения в водном хромпиковом растворе (0,3—0,5 г/л) в течение 5—6 ч или кипячения в ванне для оксидирования стальных изделий в растворе, содержащем 500—600 г/л NaOH, 200—250 г/л NaNO<sub>3</sub>, при температуре 140 °С в течение 1—2 ч или погружения в 10 %-ный раствор серной кислоты и хромовой кислоты (200 г/л) при температуре 20 °С в течение 10—15 мин.

Для пайки коррозионно-стойких сталей применяют серебряные припои, медь и медные припои: латунь, нейзильбер, медь с марганцем и никелем (главным образом самофлюсующиеся припои ВПр-2, ВПр-4), припои медь — никель — кремний (ВПр-1), (ПЖ45), палладиевые припои и припои с золотом.

Температура смачивания припоями стали 12Х18Н10Т при нагреве в печи в течение 15 мин, изотермической выдержке зависит и от способа удаления оксидной пленки (табл. 47).

Т а б л и ц а 47. Температура смачивания стали 12Х18Н10Т, °С, в различных условиях печной пайки

| Припой       | Вакуум<br>( $p = (2,66 \div 6,65) \cdot 10^{-2}$ Па) | Вакуум<br>( $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па) +<br>пары Li | Среда<br>BF <sub>3</sub> | Никелевое<br>покрытие |
|--------------|--|---|--------------------------|-----------------------|
| Sn           | 748  | 368   | 700                      | 668                   |
| Pb           | 500  | 223   | —                        | —                     |
| ПСр 2        | 215  | 780   | —                        | 780                   |
| Cu           | 1183   | —   | 1183                     | —                     |
| Cu — 10 % Ni | 1150   | —   | —                        | —                     |

При пайке соединений с вертикально расположенными швами припои, богатые серебром, вследствие большой жидкотекучести стекают к нижним участкам швов; в этом случае целесообразна пайка композиционными припоями. Серебряные припои весьма слабо растворяют коррозионно-стойкие стали в процессе пайки, не проникают по границам зерен и не образуют прослоек хрупких интерметаллидов.

По данным С. Х. Систера и других исследователей, соединения из хромистых ферритных сталей, паянные серебряными припоями, не содержащими никеля, склонны к щелевой коррозии во влажном воздухе или в потоке воды. Щелевая коррозия не возникает при пайке серебряными припоями, содержащими 2—2,5 Ni.

Наиболее пригодны для пайки хромистых ферритных сталей припои следующих составов, %: 1) 40 Ag, 30 Cu, 28 Zn, 2 Ni; температура растекания 783 °С; 2) 40 Ag, 30 Cu, 25 Zn, 5 Ni; температура растекания 850 °С; 3) 50 Ag, 15,5 Cu, 16 Cd, 15,5 Zn, 3 Ni; температура растекания 690 °С.

Серебряные припои непригодны для пайки ядерных энергетических установок из-за легкой повреждаемости паяных соеди-

нений и повышенной облучаемости персонала атомных электростанций радиоактивными изотопами серебра и цинка. Наилучшими припоями в этом случае являются припой на основе золота и палладия, а также припой системы Fe—Mn—Cr—Ni—Cu. Для предотвращения химической эрозии стали в припоях этой системы на ее поверхность перед пайкой наносят порошок никеля. Паянные таким образом соединения, по данным А. В. Орлова, надежно эксплуатируются в коррозионно-активных теплоносителях в течение  $(10—100)10^3$  ч.

При пайке нестабилизированных коррозионно-стойких аустенитных сталей следует учитывать их возможную склонность к интеркристаллитной коррозии после нагрева в интервале температур 500—750 °С; поэтому припой с температурой пайки в этом интервале малоприспособен для таких сталей. Серебряные припои с температурой растекания 620—750 °С применяют для пайки сталей, содержащих малое количество углерода или стабилизированных карбидообразующими элементами (Ti, Zr), устраняющими склонность их к интеркристаллитной коррозии после нагрева.

Пайка серебряными припоями сталей с содержанием 13 % Cr (ферритных) не снижает коррозионной стойкости паяемого металла, так как эти стали склонны к интеркристаллитной коррозии только после закалки от температуры выше 900 °С. Заполнение зазора припоем ПСр 40 и образование паяного шва происходит быстро, но для прочного сцепления шва с основным металлом необходим контакт стали с жидким припоем в течение не менее 2 мин.

Медные припои используют для пайки коррозионно-стойких сталей в интервале температур 950—1150 °С. Медь в качестве припоя применяют при пайке сложных изделий, металл которых при сборке подвергался значительной нагартовке, а припой перед пайкой был уложен в зазор. В этом случае при применении серебряных припоев и латуней с температурой пайки ниже 1000 °С существует опасность хрупкого разрушения паяемого металла в контакте с жидким припоем. Применение меди и припоев с температурой пайки выше 1100 °С вызывает отжиг стали и устраняет внутренние растягивающие напряжения в ней раньше, чем расплавится припой, что предотвращает растрескивание основного металла.

До недавнего времени наиболее распространенными медными припоями для пайки коррозионно-стойких сталей были латуни. Латунь хорошо растекается по стали, хорошо затекает в капиллярные зазоры и образует достаточно прочные паяные швы. Однако латуни, как и серебряные припои, обладают существенными недостатками: в жидком состоянии они проникают в сталь по границам зерен и способствуют хрупкому разрушению нагартованных сталей. Самопроизвольное разрушение отожженных аустенитных сталей в контакте с жидкой латунью Л63 наступает при

индукционной пайке или при пайке в газовом пламени, т. е. когда из-за быстрого и неравномерного нагрева и малой теплопроводности стали в ней могут создаваться большие местные растягивающие напряжения.

Образование трещин в отожженных сталях при контакте с жидкой латунью практически устраняется при пайке в печах или соляных ваннах, где обеспечивается достаточно равномерный нагрев паемых деталей. При пайке в пламени газовой горелки или в индукционных установках следует максимально ограничивать продолжительность контакта стали с жидкой латунью, не допускать возникновения растягивающих напряжений в паемых деталях и повторной перепайки.

Наиболее технологичны при пайке коррозионно-стойких сталей самофлюсующие медно-марганцево-никелевые припои ВПр-2 и ВПр-4, легированные небольшим количеством лития или лития и бора, хорошо затекающие в капиллярные зазоры при нагреве в среде проточного аргона. При пайке самофлюсующим припоем ВПр-2 в печах в среде проточного аргона или в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-1} / 1,33$  Па) деталей из коррозионно-стойких сталей 12Х18Н9Т, 09Х15Н8Ю, 08Х17Н5М3 и других образуются плотные швы с плавными галтельными участками светлого цвета. Поверхность галтельных участков швов, выполненных припоем ВПр-4, более темного цвета. Эрозионное воздействие этих припоев на сталь 12Х18Н9Т весьма слабое. С повышением температуры пайки площадь основного металла, облуженная припоями ВПр-2 и ВПр-4, рядом с галтельными участками увеличивается.

Скорость химической эрозии стали 12Х18Н9Т в припое ВПр-2 (как наименее активного в этом отношении припоя среди известных самофлюсующих припоев ПМ17, ПМ17А, ВПр-13, ВПр-4 и ВПр-2) существенно зависит от температуры и при ее повышении растет. В процессе выдержки при постоянной температуре скорость развития химической эрозии по мере насыщения припоя компонентами паемого сплава уменьшается. Насыщение жидкого припоя в галтельных участках шва, имеющего больший объем, требует более длительной выдержки, чем в капиллярных участках шва, имеющих меньший объем жидкого припоя.

Легирование припоя ВПр-2 порошком никеля при композиционной пайке снижает степень химической эрозии стали 12Х18Н9Т, заметно повышает прочность паяного шва и не ухудшает коррозионной стойкости паяных соединений.

Технологический процесс композиционной пайки соединений типа трубка — трубная доска (рис. 54) состоит из следующих операций: подготовки поверхности, сборки, нанесения порошка на горизонтальную деталь, укладки дозированной порции припоя между трубками над трубной доской и нагрева по заданному термическому режиму. Использование композиционной пайки предотвращает образование непропаев, скопления припоя у зазора, интенсивной химической эрозии в галтельных участках шва. До-

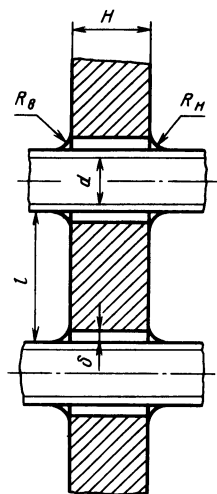


Рис. 54. Паяное соединение типа «трубная доска»

пустимый температурный перепад по трубной доске при пайке соединений такого типа  $\approx 25\text{—}30^\circ\text{C}$  при  $\tau \approx 1$  мин.

В качестве наполнителя при композиционной пайке сталей может быть использован порошок никеля, а при пайке латуни со сталью — медный порошок. Дисперсность порошков в пределах  $30\text{—}50$  мкм. При необходимости полного растворения порошка наполнителя в процессе пайки его количество не должно превышать  $20\%$ .

Детали из стали 12Х18Н9Т паяют припоями ВПр2 и ВПр-4 при индукционном нагреве на воздухе с небольшой подфлюсовкой, например, флюсом ПВ200. Соединения, паянные припоями ВПр-2 и ВПр-4, могут работать кратковременно примерно при температуре до  $500^\circ\text{C}$ .

Припои системы  $\text{Cu—Ni—Si}$ , например ВПр-1, ПЖ45, имеющие температуру растекания выше  $1100^\circ\text{C}$ , как и медь, применяют для пайки деталей из нагартованных (например, при сборке) коррозионно-стойких сталей, а также для пайки конструкций, в материале которых в результате теплового цикла пайки могут возникнуть внутренние растягивающие напряжения.

Припой ВПр-1 способствует повышению стойкости против химической эрозии стали 12Х18Н9Т при пайке в печи с флюсом ПВ201 в интервале температур  $1200 \pm 50^\circ\text{C}$ . Для формирования хороших галтельных участков швов с обратной стороны телескопических соединений применяют поддув холодного аргона внутрь паемых труб. Соединения, паянные припоями ВПр-1 и ПЖ45, теплостойки до температуры  $\sim 700^\circ\text{C}$ .

Замена сварки пайкой при изготовлении трубопроводов из стали 12Х18Н9Т позволяет повысить их сопротивление усталости.

Пайка в печи сталей высокотемпературными припоями с нагревом на воздухе возможна с применением солевых флюсов 209, 200, 201, 18В, буры.

Стали перлитного класса паяют припоями, позволяющими после пайки проводить соответствующую термообработку, обеспечивающую сохранение механических свойств паемого материала. Например, образцы из стали 12Х1МФ, нагретые по ТРП предварительно до  $1065, 1120, 1175^\circ\text{C}$  в течение 5 мин и охлажденные до  $150^\circ\text{C}$  со скоростью  $90^\circ\text{C/ч}$  в водороде, а затем на воздухе после термообработки по режиму: нагрев до  $999^\circ\text{C}$  в течение 30 мин, охлаждение в аргоне; выдержка при  $840^\circ\text{C}$  в течение 30 мин с последующей закалкой в соли; отпуск на воздухе при  $580^\circ\text{C}$  в течение 2 ч, не обнаруживали влияния процесса пайки на свойства паемого материала. Перед пайкой образцы очищают

**Т а б л и ц а 48. Припой, применяемые для пайки хромомолибденованадиевых сталей**

| Припой     | Состав припоя, %                       | Температура, °С |       | Вид припоя |
|------------|--|-----------------|-------|------------|
|            |  | ликви-<br>дуса  | пайки |            |
| Ag—Cu—Zn   | 50 Ag; 15,5 Cu; 15,5 Zn;<br>16 C; 3 Ni | 685             | 960   | Проволока  |
| Ag—Mn—Li   | 84,8 Ag; 15 Mn; 0,2 Li                 | 970             | 1035  | Фольга     |
| Ni—Cr—Si—B | 83,5 Ni; 6 Cr; 5 Si; 3 B;<br>2,5 Fe    | 1000            | 1065  | Порошок    |
| Mn—Ni—Co   | 67,5 Mn; 16 Ni; 16 Co; 0,5 B           | 1025            | 1120  | »          |
| Ni—Cr—Si   | 70 Ni; 20 Cr; 9 Si; 1 Fe               | 1080            | 1175  | »          |

погружением на 5—10 мин в 50 %-ный раствор гидрохлорной кислоты при температуре 20 °С. При пайке используют припой системы Ag—Cu—Li, обладающий высокой пластичностью; припой системы Ag—Mn с хорошей смачивающей способностью; припой системы Mn—Ni—Co, обеспечивающий высокую пластичность швов, и припой Ni—Cr—Si—B, обладающий высокой прочностью и жаростойкостью. Состав припоев, применяемых при пайке этой стали, приведен в табл. 48.

Припой в виде фольги закладывают в зазор; в виде проволоки крепят к месту акриловым цементом или прихватывают точечной сваркой; порошок припоя применяют в виде суспензии с акриловой смолой. Количество припоя зависит от вида его нанесения: порошкообразный припой используют в четырехкратном объеме по сравнению с объемом капиллярного зазора, проволоку лишь в двухкратном объеме. После травления шлифов паяных соединений было обнаружено, что сталь в состоянии поставки имеет ферритно-перлитную структуру, в термообработанном по термическому режиму пайки — закалочную мартенситную структуру. Повышение температуры пайки не привело к значительному снижению прочности и пластичности стали. Самая высокая пластичность паяных швов обнаружена в соединениях, выполненных припоями Mn—Ni—Co, Ag—Cu—Zn и Ag—Mn—Li (табл. 49).

С увеличением зазора пластичность швов снижается.

Коррозионно-стойкие и жаропрочные материалы, содержащие хром, оксиды которого трудно восстанавливаются, паяют в сухом чистом водороде или диссоциированном аммиаке с точкой росы от —55 до —70 °С.

Поверхности контейнеров, приспособлений и деталей при пайке в водороде, вакууме и других средах должны быть предварительно очищены от оксидов. Температура восстановления оксидов при нагреве в защитной атмосфере должна быть близкой к температуре плавления припоя, но не ниже. На поверхности сталей,

**Таблица 49. Относительное удлинение в зависимости от ширины зазора в паяных швах из стали 12Х1МФ после пайки и термообработки**

| Ширина зазора, мм | Удлинение, %, при использовании припоев системы |          |            |          |          |
|-------------------|---|----------|------------|----------|----------|
|                   | Ag—Cu—Zn  | Ag—Mn—Li | Ni—Cr—Si—B | Mn—Ni—Co | Ni—Cr—Si |
| 0,05              | 8,1/18  | 6/15,8   | 5,7/9,5    | 8,3/18,9 | 7/18,2   |
| 0,15              | 7,8/18  | 6,4/16,6 | 5,4/8,5    | 7,2/15,4 | 6,9/13,1 |
| 0,25              | 5,4/9,6   | 6,9/14,8 | 4,8/6,8    | 6,1/12,5 | 6,9/13,2 |

Примечание. В числителе приведены показатели при базе измерений 50 мм, в знаменателе — 12 мм.

содержащих никель, хром, кремний, бор, температура восстановления оксидов в сухом водороде 900—990 °С, а при пайке медью — 1020 °С.

Низкая точка росы выходящего из контейнера газа является показателем того, что оксиды на поверхности детали восстановлены.

Пайка в невысоком вакууме с разрежением  $1,33 \cdot 10^{-1}$ — $1,33$  Па требует предварительного электролитического покрытия стали никелем и медью. Пайка коррозионно-стойких сталей в активных газовых средах (смесь аргона с фтористым водородом или фтористым бором) возможна только при тщательной их сушке, особенно если температура пайки ниже 1000 °С. В смеси аргона с фтористым водородом паяют, например, стали, содержащие более 18 % Сг или легированные несколькими процентами алюминия и титана.

Коррозионно-стойкие стали в сухом аргоне и невысоком вакууме паяют главным образом самофлюсующими припоями на основе серебра или меди, легированными литием или литием и бором. Однако стали, содержащие  $\geq 18$  % Сг и легированные алюминием, кремнием, титаном, плохо смачиваются самофлюсующим припоем ПСр 72ЛМН по поверхности, свободно обтекаемой струей аргона. Растекание припоя ПСр 72ЛМН по таким сталям происходит только в экранированных от потока аргона полостях изделия. При пайке таких сталей может быть использован припой ПСр 72ЛМН, активированный небольшими добавками титана (0,12 %) или циркония ( $\sim 1$  %) [12].

Введение в серебряный припой ПСр 72ЛМН (легированный для самофлюсуемости литием или литием и бором) титана или циркония активирует его растекание по стали 12Х18Н9Т в среде проточного чистого аргона [12]. Для этого достаточно ввести в него 0,12 % Ti или 1 % Zr. Температура начала плавления и растекания припоя по стали повышается от 880 до 960 °С при введении 0,12 % Ti и до 1040—1080 °С при введении 1 % Zr.

Добавка циркония в самофлюсующий припой ПСр 72ЛМН при пайке в печи способствует повышению прочности соединения при испытании на срез по сравнению с прочностью соединения, паянного припоем ПСр 72ЛМН (табл. 50). Прочность шва при срезе

Т а б л и ц а 50. Сопротивление срезу соединений из стали 12Х18Н9Т, паянных в среде проточного аргона

| Припой                | Ширина<br>нахлестки,<br>мм | Площадь<br>спая,<br>мм <sup>2</sup> | Сопротивле-<br>ние срезу,<br>МПа | Способ<br>нагрева               |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ПСр 72ЛМН             | 2,6                        | 31,2                                | 330—370                          | В печи                          |
| ПСр 72ЛМН (0,12 % Ti) | 2,9                        | 36,0                                | 310—401                          |                                 |
| ПСр 72ЛМН (1 % Zr)    | 2,9                        | 36,3                                | 418—520                          |                                 |
| ПСр 72ЛМН             | 3,0                        | 36,0                                | 161—220                          | Электросо-<br>противле-<br>нием |
| ПСр 72ЛМН (0,12 % Ti) | 2,6—3                      | 31,2—36                             | 165—216                          |                                 |
| ПСр 72ЛМН (1 % Zr)    | 3,0                        | 26,0                                | 215—235                          |                                 |

соединений из стали 12Х18Н9Т, паянных в печи припоем ПСр 72ЛМН, активированных 1 % Zr, на 30—40 % выше, чем при пайке припоем ПСр 72ЛМН. При пайке электросопротивлением в среде проточного аргона применение активированного цирконием или титаном припоя ПСр 72ЛМН приводит также к относительному повышению прочности паяного шва.

В патентах и других публикациях широко подтверждено активирующее и упрочняющее действие титана и циркония при пайке коррозионно-стойких сталей, а также меди и ее сплавов между собой. Учитывая особенно высокую химическую активность титана и циркония по отношению к меди, можно полагать, что такое упрочнение обусловлено образованием в пластичной матрице припоя или по его границам зерен первичных кристаллов химических соединений меди с титаном или цирконием. При введении 1 % Zr упрочнение паяного шва намного выше, чем при легировании припоя меньшим количеством титана (0,12 % Ti). Можно полагать, что до некоторого критического количества этих элементов, пока первичные кристаллы не образуют сплошного хрупкого каркаса, пластичность шва заметно не снижается и упрочнение паяного шва может происходить без существенного снижения его пластичности.

В табл. 51 представлены средние (из пяти образцов) данные о временном сопротивлении разрыву стыковых соединений из коррозионно-стойких сталей, паянных серебряными припоями.

Припой системы Ag—Cd—Cu—Zn и ее подсистем пригодны для паяных соединений, работающих до температуры 200 °С. Повышение температуры работы их до 300 и 400 °С достигается применением сплавов на основе системы Ag—Cu—Zn, дополнительно легированных марганцем и никелем. Среди этих припоев выделяется двойной однофазный сплав, содержащий 85 % Ag и 15 % Mn, тогда как все остальные припои многофазны, включают эвтектическую структуру.

Нахлесточное соединение из отожженной аустенитной стали, паянное припоем системы Ni—Cr—Si—B—C в среде водорода с точкой росы —68 °С, при испытании на усталость при темпера-

Т а б л и ц а 51. Прочность стыковых соединений коррозионно-стойких сталей

| Состав припоя, % |    |    |        |        | $\sigma_b$ , МПа, при температуре, °С |     |     |     |     |
|------------------|----|----|--------|--------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Ag               | Cu | Zn | Cd, Ni | Mn, P  | 20                                    | 100 | 200 | 300 | 400 |
| 40               | 19 | 21 | 20 Cd  | —      | 450                                   | 420 | 380 | 200 | 60  |
| 30               | 28 | 21 | 21 Cd  | —      | 450                                   | 400 | 300 | 160 | 30  |
| 20               | 40 | 25 | 15 Cd  | —      | 420                                   | 400 | 300 | 120 | 20  |
| 44               | 30 | 26 | —      | —      | 500                                   | 440 | 440 | 300 | 100 |
| 25               | 41 | 34 | —      | —      | 500                                   | 500 | 440 | 300 | 120 |
| 49               | 16 | 23 | 4,5 Ni | 7,5 Mn | 600                                   | 600 | 600 | 400 | 120 |
| 27               | 38 | 20 | 5,5 Ni | 9,5 Mn | 580                                   | 580 | 560 | 380 | 200 |
| 15               | 80 | —  | —      | 5 P    | 600                                   | 500 | 300 | 160 | 50  |
| 85               | —  | —  | —      | 15 Mn  | 360                                   | 340 | 320 | 300 | 180 |

туре 20 °С на базе  $5 \cdot 10^7$  циклов оказалось равнопрочным с паяемой сталью. Пределы выносливости стали и паяного соединения при температуре 592 °С соответственно равны 212,6 и 186,1 МПа (при ширине нахлестки, равной трем толщинам паяемого листа).

Для сталей нашла применение контактно-реактивная пайка с прослойками или порошками компонентов припоя — меди, марганца и никеля. Прослойки этих компонентов наносят термовакuumным напылением на участки стальных деталей, подлежащие пайке. Смесь порошков с флюсом укладывают в зазор. Смесь порошков марганца и никеля (10—20 % Ni), смешанная с бурой в количестве 20—50 % массы припоя, может быть применена для пайки среднеуглеродистой стали с композиционным абразивным материалом, состоящим из медной матрицы с вкраплениями алмазной крошки.

После контактно-реактивной пайки электросопротивлением на трехфазной установке с графитовыми нагревателями по режиму  $U=6$  В,  $I=400$  А, в течение  $\tau=1$  мин стыковое соединение имеет  $\sigma_b=205 \div 304$  МПа. Паяный шов содержит медь, попадающую в него из паяемой медной детали. При большем содержании в смеси порошка никеля температура пайки оказывается слишком высокой, а при большем содержании марганца происходит охрупчивание паяного шва. Дисперсность порошков  $\sim 80$  мкм.

Соединение соприкасающихся деталей из коррозионно-стойкой стали и меди может быть успешно осуществлено с использованием контактно-реактивной пайки. Например, детали из стали 12Х18Н9Т покрывают гальваническим методом слоем серебра, которое в месте контакта с медью при нагреве  $\geq 779$  °С образует эвтектику, выполняющую роль припоя. Процесс может быть осуществлен без флюса в невысоком вакууме ( $p=1,33 \cdot 10 \div 1,33$  Па) вследствие высокой смачивающей способности образующейся эвтектики Ag—Cu. Характерно, что при пайке тех же материалов и в тех же условиях готовым припоем эвтектического состава ПСр 72 удовлетворительное качество паяных соединений получить не удастся. Для этого требуется вакуум ( $p=1,33 \cdot 10^{-1} \div 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па).

Если при контактно-реактивной пайке изделий из соприкасающихся деталей происходит стекание образующейся жидкой эвтектики, необходима замена общего нагрева изделия нагревом участков, на которых перетекание припоя не развивается вследствие равновесия между силой тяжести и капиллярными силами, зависящими от ширины зазора [29].

Экспериментально подтверждена возможность контактной твердогазовой пайки ферритных и аустенитных сталей в парах марганца при температурах ниже температуры их автономного плавления и несколько выше температуры плавления наиболее легкоплавкого твердого раствора. Пайка сталей 20 и 12Х18Н9Т в парах марганца возможна в вакууме ( $p = 4,85 \cdot 10^{-2}$  Па) с предварительно уложенными у зазора проволокой или порошком меди, или смесью порошков меди и никеля и обеспечивает хорошую коррозионную стойкость паяных соединений во всех климатических условиях.

Пайка коррозионно-стойких сталей и высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов в вакууме со степенью разрежения  $1,55 \cdot 10^{-2}$  Па требует применения диффузионных вакуумных насосов и применения припоев, не содержащих компонентов с высокой упругостью испарения.

Как показали исследования С. Якиро и других, низкое содержание примесей в атмосфере вакуумной печи, характерное для вакуума ( $p = 1,55 \cdot 10^{-2}$  Па), может быть достигнуто и при низком вакууме ( $p = 1,55 \cdot 10^{-2}$  Па), создаваемом с помощью механических насосов при условии непрерывной подачи в вакуумную камеру печи очень чистого аргона. Такой способ пайки обеспечивает возможность применения припоев с высокой упругостью испарения, позволяет заменить более дорогостоящие диффузионные насосы более дешевыми — механическими.

Существенным технологическим параметром при такой разновидности вакуумной пайки в печи является скорость подачи высокочистого аргона в печь. Заполнение капиллярного зазора припоем Ni—15 Cr—3,5 В при нахлесточном типе соединения деталей из хромомолибденотитановой стали в низком вакууме при скорости подачи аргона 90 м/мин такое же, как и при пайке в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па).

Снижение парциального давления кислорода в инертной защитной атмосфере или в вакууме и снижение температуры смачивания припоем возможно также в результате поглощения его остатков парами элементов с высокой упругостью испарения (Mn, Li, P, Zn, Bi, Cd). Это позволяет снижать степень разрежения вакуума при температуре смачивания паяемого материала жидким припоем. Особенно эффективно действие таких паров, если при этом возможно контактное твердогазовое плавление паяемого металла в контакте с парами через несплошности в оксидной пленке. При этом существенно, что дозирование паров определяется оптимальностью навески испаряющегося металла.

При этом способе пайки существенно оптимальное количество испаряющегося металла для выбранного режима пайки и режима откачки. Это количество также зависит от скорости испарения металла.

После пайки изделие вместе с контейнером охлаждают до температуры 50—60 °С.

Наибольшее влияние на прочность паянного соединения порошком меди или меди и никеля (5 %) в парах марганца оказывают температура и время выдержки при пайке: с их увеличением повышается сопротивление срезу паяных соединений. Дисперсность порошка меди и никеля в пределах 70—210 мкм на прочность паяных соединений существенно не влияет. Однако с уменьшением дисперсности до 70 мкм и выше прочность паяного соединения несколько увеличивается. Оптимальный режим пайки стали порошком меди в парах марганца:  $t_{\text{п}} = 1000 \div 1200$  °С;  $\tau = 35 \div 45$  мин.

Стали, легированные хромом, окисляются при нагреве в вакууме с образованием шпинели  $\text{Fe} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ , которая располагается во внутреннем, плотном защитном слое, выше которого находится пористый незащищающий сталь оксид, состоящий в основном из  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В сталях, содержащих кроме хрома никель, шпинель состоит из сложного соединения  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  начинает заметно испаряться только при температуре выше 1000 °С. Коррозионная стойкость обнаружена у соединений, паянных припоями ПОС 61 и ПОС 40 с флюсом 38Н. Соединения, выполненные с флюсом ЛМ1, имели вполне удовлетворительную коррозионную стойкость: потеря прочности ( $\tau_{\text{ср}}$ ) за шесть месяцев составляла не более 5—10 %.

В полупромышленной атмосфере соединения, выполненные припоями ПОС 61 и ПОС 40 с обоими флюсами, обнаружили повышенную склонность к коррозии, особенно соединения, паянные припоем ПОС 40 с флюсом 38Н.

Соединения из коррозионно-стойких сталей паяли в вакууме ( $p = 6,65 \cdot 10^{-2}$  Па) палладиевыми припоями (табл. 52) в виде ленты толщиной 0,1; 0,2; 0,3 мм встык в приспособлении при ширине зазора 0,08—0,18 мм. Размеры паяных образцов  $5 \times 10 \times 30$  мм.

Т а б л и ц а 52. Составы и режимы пайки палладиевыми припоями коррозионно-стойких сталей

| Припой | Состав припоя, % |       |       | Режим пайки * |
|--------|------------------|-------|-------|---------------|
|        | Pd               | Cu    | Ag    |               |
| В Pd-2 | 10,04            | 31,10 | 58,86 | 900/10        |
| В Pd-5 | 19,84            | 28    | 52,16 | 880/10        |
| В Pd-7 | 4,96             | —     | 95,04 | 1005/10       |

\* Числитель — температура пайки, °С; знаменатель — время пайки, мин.

После пайки образцы подвергали обработке резанием. Наилучшим смачиванием обладают припои В Pd-7 и В Pd-5. Включений прослоек химических соединений в шве не обнаружено. При температуре 400 °С максимальную прочность имеют соединения, паянные припоем В Pd-5, а при 600—800 °С соединения, паянные припоем В Pd-7.

Часть паяных стальных образцов подвергали коррозионным испытаниям в течение шести месяцев в различных условиях: в камере морского тумана, в тропической камере и в промышленной атмосфере.

Наиболее высокой коррозионной стойкостью в камере морского тумана, тропической камере и промышленной атмосфере обладают паяные соединения из стали 12Х18Н10Т, выполненные припоями ВПр-3, Г40ХН и Г70 (пайка в вакууме) и припоем ВПр-4 (пайка в аргоне). Сопротивление срезу таких соединений в указанных условиях испытаний осталось неизменным, и следов коррозии не обнаружено.

### 3. ЧУГУН

Сварка чугуна вызывает значительные трудности, в частности, при устранении дефектов на механически обработанных поверхностях из-за значительных его структурных и объемных изменений при нагреве выше точки Ас<sub>1</sub>. Высокотемпературная пайка и пайко-сварка являются процессами, позволяющими в определенных условиях избежать развития таких явлений и обеспечить равнопрочность соединений. Паяются главным образом серый и ковкий чугуны. Белый чугун не паяют из-за его хрупкости и плохой обрабатываемости.

Для пайки и пайко-сварки чугуна характерны следующие трудности, мешающие получению качественного паяного соединения:

1) возникновение в нем структурных и объемных изменений в условиях локального газопламенного нагрева;

2) плохая смачиваемость чугуна, обусловленная присутствием в нем включений свободного графита.

**Влияние термического цикла пайки на структурные и объемные изменения серого чугуна.** Исследования влияния термического цикла пайки, имитирующие газопламенный нагрев, на структурные превращения и объемные изменения в чугуне СЧ 18, проведенные на универсальном дилатометре УВД со скоростью нагрева 15 °С/мин с последующим охлаждением образцов на воздухе со скоростью 10 °С/с, показали, что в интервале температур 750—960 °С при указанных режимах в чугуне образуются закалочные структуры и происходят необратимые объемные изменения («рост» чугуна). Все это приводит к возникновению значительных внутренних напряжений и деформаций, а иногда и трещин. При нагреве серого чугуна до 750 °С фазовые превращения в нем отсутствуют, а объемные изменения весьма незначительны.

Предотвращение нежелательных структурных и объемных изменений в сером чугуна СЧ18 оказалось возможным при достаточно больших скоростях его нагрева, обеспечивающих существенное запаздывание развития полиморфных превращений  $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$  и превращения  $\text{Fe}_3\text{C}$  в графит. При этом значительно расширяется температурная область фазовых превращений чугуна и появляется возможность его пайки при температурах выше точки  $A_{c1}$  [3].

Известно, что при температуре выше  $A_{c1}$  существует определенный подготовительный период  $\tau$  до начала превращения перлита в аустенит:  $\tau = \tau_0 e^{-Q/(RT)}$ . Энергия активации  $Q$  полиморфного превращения в железоуглеродистых сплавах линейно возрастает с увеличением концентрации в них углерода. Так, для стали 40 энергия активации  $Q = 521,56$  Дж/моль, а для чугуна  $Q = 4806$  Дж/моль и  $\tau_0$  соответственно имеет значение 0,0522 с и 0,07364 с.

Результаты расчета тепловых эффектов фазовых превращений в сером чугуна СЧ18 приведены ниже (С. В. Лашко, А. П. Перегудин).

|                                  |     |     |     |     |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Скорость нагрева, °С/с . . . . . | 108 | 117 | 250 | 400 |
| Температура, °С:                 |     |     |     |     |
| начала превращения . . . . .     | 730 | 730 | 730 | 730 |
| конца превращения . . . . .      | 914 | 920 | 965 | 990 |

Таким образом, экспериментально подтверждено, что температурный интервал протекания фазовых превращений в чугуна выше температуры  $A_{c1}$  и тем шире, чем больше скорость нагрева. Показано, что при индукционном нагреве ( $f = 67$  кГц) чугунных труб диаметром 40—100 мм и толщиной стенки 5—13 мм со скоростью 200—250 °С/с при температуре пайки 950 °С с последующим охлаждением на воздухе заметных изменений твердости и образования закалочных структур и трещин не происходит. При уменьшении частоты генератора максимальная толщина стенки паяемой детали возрастает.

Таким образом, необходимо применение припоев с температурой пайки не выше 750 °С или припоев с температурой пайки до 950 °С, но при условии достаточно быстрого нагрева со скоростью 200—250 °С/с, например, индукционного нагрева. При пайко-сварке возможно применение припоев с температурой плавления выше  $A_{c1}$  при условии смачивания ими паяемого материала при подогреве его до 750 °С.

**Возможности преодоления плохой смачиваемости жидкими припоями серого чугуна.** Наиболее простой способ улучшения смачивания чугуна жидкими припоями — удаление с его поверхности включений графита, непрочно связанного с металлической основой чугуна — абразивная обработка. Удалить графит можно также путем окисления и связывания его в летучий оксид углерода. Окисление графита проводят щелочной перекисью, вводи-

мой в смеси с железным порошком, или борной кислотой, флюсом, содержащим буру вместе с оксидом меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , или смесью, состоящей из 17 % медного порошка, 58 % железного порошка, 24 % безводной буры, 1 % безводной соды. Обработка поверхности нагретого серого чугуна хлоратом калия также способствует окислению графита. Нагрев поверхности чугуна горелкой (с окислительным пламенем) до красного каления вызывает улетучивание графита в виде оксида углерода. Обработка проволоочной щеткой очищает поверхность паяемых деталей от образующихся оксидов. При такой подготовке поверхности в качестве флюсов применяют буру или борсодержащие стекла, а в качестве припоя — латуни с содержанием 50 или 63 %  $\text{Cu}$ . При этом на зачищенные паяемые поверхности чугуна накладывают слой пастообразного флюса. Детали нагревают в печи или горелкой. После нагрева детали до приобретения ею вишневого цвета ( $800^\circ\text{C}$ ) на поверхность вводят добавочно флюс и нагревают деталь до температуры пайки, после чего вводят припой путем трения прутка припоя о края детали у зазора или в расплавленном виде.

Соединение чугунных деталей или их ремонт иногда проводят пайко-сваркой, когда место соединения разделяется так же, как перед сваркой, например, в виде Y-образного зазора.

При использовании высокоактивных флюсов отпадает необходимость в предварительном удалении с паяемой поверхности включений графита (табл. 53).

Для капиллярной пайки соединений из серого чугуна СЧ18 или этого же чугуна со сталью 40 нашли применение и другие высокоактивные сварочные флюсы — АНШТ-2 и МАФ-1. Температура пайки и некоторые свойства паяных соединений приведены в табл. 54.

Т а б л и ц а 53. Активные флюсы для пайко-сварки чугуна

| Флюс           |  | Припой       | Временное сопротивление, МПа | Цвет паяного шва                       |
|----------------|--|--------------|------------------------------|--|
| Марка          | Состав, %  |              |                              |  |
| ФПСН-2 *       | 45 $\text{H}_3\text{BO}_3$ ;<br>22,5 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;<br>22,5 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ;<br>10 солевого сплава | ЛОМНА        | 274—333,4                    | Мало отличается от цвета чугуна        |
| ЦМТУ-05-112-68 | 72,5 $\text{NaCl}$ ;<br>27,5 $\text{NaF}$  | ЛОМНА **     | 274—333,4                    | То же                                  |
| ФПСН-1         | 50 $\text{H}_3\text{BO}_3$ ;<br>25 $\text{LiCO}_3$ ;<br>25 $\text{Na}_2\text{CO}_3$                                      | ЛОК—59—1—0,3 | 235,3                        | Существенно отличается от цвета чугуна |

\* Флюс получен растворением всех составляющих компонентов в горячей воде с последующим выпариванием.

\*\* Температура смачивания чугуна припоем  $700\text{—}750^\circ\text{C}$ .

Т а б л и ц а 54. Влияние температуры пайки на коэффициенты прочности  $K$  и пористости  $K_n$  паяных соединений из серого чугуна СЧ18

| Припой     | Параметр | Флюс   |       |        |        |       |
|------------|----------|--------|-------|--------|--------|-------|
|            |          | АН-ШТ2 | МАФ-1 | ФПСР-2 | ПВ 209 | Бура  |
| Л63        | $t_n$    | 950    | 970   | 980    | 980    | 990   |
|            | $K$      | 1      | 0,874 | 0,542  | 0,763  | 1,000 |
|            | $K_n$    | 0,1    | 0,277 | 0,562  | 0,537  | 0,138 |
| ЛОМНА      | $t_n$    | 940    | 960   | 980    | 950    | 950   |
|            | $K$      | 0,549  | 1     | 0,532  | 1,000  | 0,886 |
|            | $K_n$    | 0,472  | 0,146 | 0,532  | 0,115  | 0,228 |
| ЛОК59—1—03 | $t_n$    | 960    | 990   | 970    | 980    | 970   |
|            | $K$      | 1      | 0,546 | 0,746  | 0,874  | 0,717 |
|            | $K_n$    | 0,153  | 0,503 | 0,384  | 0,219  | 0,342 |
| ЛК62—05    | $t_n$    | 960    | 1000  | 970    | 980    | 980   |
|            | $K$      | 0,537  | 1     | 0,369  | 0,564  | 0,775 |
|            | $K_n$    | 0,463  | 0,130 | 0,655  | 0,518  | 0,360 |

П р и м е ч а н и е. Ширина зазора при пайке 0,3 мм, выдержка при температуре пайки 2 мин. Все данные средние для четырех образцов, коэффициент прочности  $K = \sigma_n c / \sigma_n$ .

Как видно из приведенных данных (табл. 54), в условиях печного нагрева при капиллярной пайке минимальная температура процесса зависит не только от температуры плавления припоя, но и от марки флюса. Наименьшая температура пайки, а также наибольший коэффициент прочности и минимальная пористость достигается при пайке серого чугуна припоем ЛОМНА с флюсом ПВ209.

Наименьший перегрев припоев требуется при использовании флюса АН-ШТ2 (ТУ 21 УССР 645—72). Этот флюс представляет собой аморфный синтетический шлак, разработанный первоначально для термообработки углеродистых сталей. Он расплавляется в интервале температур 450—700 °С, наиболее активен при 900—950 °С и может работать при температуре до 1150 °С.

Данные табл. 55 показывают, что условиям равнопрочности

Т а б л и ц а 55. Предел прочности при изгибе паяных в печи образцов из чугуна СЧ18 и стали 30

| Припой      | Флюс     | Температура пайки стали (чугуна), °С | Предел прочности при изгибе стали (чугуна), МПа |
|-------------|----------|--------------------------------------|---|
| Л63         | АН-ШТ2 * | 950 (950)                            | 360 (600)                                       |
| ЛОМНА       | МАФ-1 *  | 960 (930)                            | 360 (350)                                       |
| ЛОМНА       | ПВ209    | 950 (960)                            | 360 (471)                                       |
| ЛОК59-1-0,3 | АН-ШТ2 * | 960 (980)                            | 360 (406)                                       |

\* Сварочные флюсы.

паяемых соединений и высокой их плотности удовлетворяют следующие сочетания припоя, флюса и паяемого материала.

Отмечено небольшое повышение твердости металла околошовной зоны.

При пайке стали 30 и чугуна СЧ 18 с флюсом АН-ШТ2 происходит одновременное их смачивание жидким припоем. Предел прочности при изгибе разнородного соединения не ниже предела прочности чугуна.

С использованием сочетаний припоя и флюса, указанных в табл. 55, получены хорошие результаты и при пайке с индукционным нагревом.

По данным работы [51], успешно использована вакуумная пайка чугуна. Этот способ соединения является эффективным при изготовлении чугунных изделий, литье которых из-за сложности конструкции невозможно, а также при соединении чугунных и стальных деталей.

## Глава 10

### ПАЙКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Пайка никеля и его сплавов имеет много сходного с пайкой сплавов на железной основе. Различие определяется особенностями основы сплавов. На поверхности чистого никеля при всех температурах нагрева в окислительной среде образуется только оксид NiO. При наличии в никеле железа и марганца может образоваться оксид (Ni, Mn, Fe)O на основе NiO.

Легирование никеля хромом (нихромом), алюминием, титаном вызывает образование оксидов трех структурных типов: 1)  $Me_2O_3$  (изоморфных  $Cr_2O_3$ ), где Me — Fe, Cr, Mn, Ni, Al; 2)  $MeTiO_3$  (изоморфных  $NiTiO_3$ ), где Me — Fe, Ni; 3) шпинели типа NiO· $Me_2O_3$ . Структуры  $Me_2O_3$  и  $MeTiO_3$  изоморфны.

При низких температурах (до  $\sim 500^\circ\text{C}$ ) на поверхности сплавов на основе нихрома образуется оксид NiO; при более высокой температуре в зависимости от легирования образуется два других структурных типа (самостоятельно или совместно); внутренние слои окарины обогащены легирующими элементами. При температуре  $1200^\circ\text{C}$  и выше на поверхности легированных никелевых сплавов образуется рекристаллизованный оксид NiO, свидетельствующий о потере жаростойкости (Н. Ф. Лашко и И. А. Пониовская).

Из-за трудности удаления оксида механическим путем поверхность никелевых сплавов чаще всего подвергают травлению в специальных ваннах не более чем за 24 ч перед пайкой. Один из травильных растворов, например, имеет состав:  $1000\text{ см}^3\text{ H}_2\text{O}$ ;  $1500\text{ см}^3\text{ H}_2\text{SO}_4$  ( $1,87\text{ г/см}^3$ );  $2250\text{ см}^3\text{ HNO}_3$  ( $1,36\text{ г/см}^3$ ) и  $36\text{ г NaCl}$ . Деталь перед травлением выдерживают в горячей воде, затем погружают в травильную ванну на 5—10 с, промывают в горячей воде, нейтрализуют остатки кислот в 1 %-ном растворе аммиака и просушивают, например, в опилках.

Детали из сплава ХН77ТЮР и других высоколегированных сплавов травят в растворе, содержащем  $150\text{ см}^3\text{ NH}_3$ ,  $50\text{ г NaF}$ ,  $850\text{ см}^3\text{ H}_2\text{O}$ . Процесс травления длится 10 мин при температуре  $20^\circ\text{C}$ ; затем детали промывают в горячей воде ( $60\text{—}70^\circ\text{C}$ ) и просушивают ( $60\text{—}70^\circ\text{C}$ ). Поверхности небольших деталей перед пайкой также зачищают шлифовальной шкуркой с последующей промывкой в спирте или трихлорэтане.

Для предотвращения образования слоя оксидов на паяемом металле в процессе пайки детали нагревают в восстановительных средах, вакууме или с применением солевых флюсов.

Большинство никелевых сплавов предназначены для работы при высоких температурах, поэтому пайка их легкоплавкими припоями применяется редко. В этом случае пригодны оловянно-свинцовые припои, содержащие 50 и 60 % Sn и флюсы 38Н и другие, используемые для пайки коррозионно-стойких сталей. Детали из никелевых сплавов, работающие при температуре до 350—500 °С, паяют серебряными припоями. В этом случае для пайки сплавов нимоник 75 и нимоник 80 (соответствующих сплавам ХН78Т и ХН77ТЮ) рекомендуются припои следующих составов (%): 1) 60 Ag, 15 Cu, 25 Zn ( $t_{пл}=674 \div 677$  °С); 2) 66,7 Ag, 23,3 Cu, 10 Zn, ( $t_{пл}=705 \div 723$  °С); 3) 61 Ag, 28,5 Cu, 10,5 Zn ( $t_{пл}=720 \div 746$  °С); 4) 85 Ag и 15 Mn ( $t_{пл}=970 \div 980$  °С) [34]. При более высокой температуре могут работать детали, паянные серебряными припоями системы Ag—Pd—Mn, например, припоем, содержащим 75 % Ag, 20 % Pd, 5 % Mn ( $t_{п}=1120$  °С). При повышенных требованиях к коррозионной стойкости паяных соединений используют припои с содержанием  $\geq 50$  % Ag.

При пайке никеля медью паяемый металл значительно растворяется в припое, и поэтому необходимы строгая дозировка припоя, более близкое расположение его к зазору или укладка в зазор и пайка без перегрева.

При взаимодействии никеля с серой в процессе нагрева по границам его зерен образуется легкоплавкая эвтектика, вызывающая охрупчивание металла. Поэтому содержание серы в защитных и восстановительных газах при пайке никеля и его сплавов не должно превышать 0,40 мг/л; остатки масел, красок, смазочных материалов и других веществ, содержащих серу, тщательно удаляют с поверхности деталей перед пайкой. Подобное же действие на никель и его сплавы оказывают свинец, висмут, мышьяк и некоторые другие легкоплавкие металлы.

Никелевые сплавы типа нихром и монель склонны к охрупчиванию в контакте с жидкими припоями, особенно содержащими серебро, кадмий, цинк. Для предотвращения хрупкого разрушения под напряжением детали из этих сплавов паяют в отожженном состоянии и при отсутствии внутренних и внешних растягивающих напряжений. Нагрев под пайку осуществляют в электропечах, индукционным способом, в солевых ваннах, в пламени газовых горелок и т. п.

Возросла роль пайки в создании конструкций из высокожаропрочных никелевых сплавов. Сварка плавлением деталей из таких сплавов весьма усложняется в связи с большой склонностью последних к образованию кристаллизационных трещин, а также к образованию трещин в процессе нагрева после сварки в интервале температур 700—800 °С (из-за больших остаточных напряжений, образующихся при охлаждении после сварки).

Таблица 56. Припой на никелевой основе (США)

| Припой        | Состав припоя, % |           |      |       |       |      | Температура<br>плавления,<br>°C |
|---------------|------------------|-----------|------|-------|-------|------|---------------------------------|
|               | Cr               | B         | Si   | C     | P     | Fe   |                                 |
| B Ni-1        | 13—15            | 2,75—4    | 3—5  | 0,6   | —     | 4—5  | 1180                            |
| B Ni-2        | 6—8              | 2,75—3,5  | 4—5  | —     | —     | 2—4  | 1060                            |
| B Ni-3        | —                | 2,75—3,5  | 4—5  | 0,006 | —     | 1,5  | 1070                            |
| B Ni-4        | —                | 1—2,2     | 3—4  | 0,06  | —     | 1,5  | 1090                            |
| B Ni-5        | 18—20            | 9,75—10,5 | 0,15 | 0,15  | 10    | —    | 990                             |
| B Ni-6        | —                | —         | —    | 0,15  | 10—12 | —    | 940                             |
| B Ni-7        | 11—15            | —         | —    | —     | 9—11  | —    | 950                             |
| Никробрейз 1  | 4,5—6,5          | 3,0       | —    | 0,15  | —     | 3    | 1050                            |
| Никробрейз 2  | 13,5             | 3,5       | 4,5  | —     | —     | 4,45 | 1180                            |
| Эндевранс 52  | —                | 2,9       | 4,5  | —     | —     | —    | 1070                            |
| Никробрейз 10 | —                | —         | —    | 0,15  | 11    | —    | 980                             |
| Никробрейз WG | 17,5             | 3,0       | 3,5  | 0,15  | —     | 3,5  | 1150                            |
| Эндевранс 50  | —                | 1,9       | 3,5  | —     | —     | —    | 1080                            |
| Эндевранс 56  | 16               | 3,5       | 4,5  | —     | —     | 4    | 1150                            |
| Эндевранс 53  | 7,0              | 2,9       | 4,5  | —     | —     | 3,0  | 1056                            |

Применение пайки развивалось в четырех направлениях, определяемых выбором и способом образования припоев на никелевой основе с относительно невысокой температурой плавления, условиями пайки в вакууме и использованием давления.

Снижение температуры плавления никелевых припоев достигалось введением депрессантов — кремния, бора, марганца, углерода, фосфора (табл. 56).

Эти припои пригодны для пайки никелевых жаропрочных сплавов при относительно невысоких температурах; они смачивают их, растекаются и затекают в зазор. Припои, содержащие бор, вызывают, кроме того, межзеренную химическую эрозию паемого металла, которую можно уменьшить или подавить, применяя поверхностное никелирование сплавов. Такое никелирование к тому же защищает сплав от образования оксидной пленки, образующейся в связи с легированием паемых сплавов алюминием и титаном. Характеристики прочности соединений никелевых сплавов, паянных этими припоями, невысоки, так как в паяном шве образуются хрупкие соединения боридов, силицидов и карбидов.

Пайку припоями, легированными бериллием и особенно бором, необходимо проводить, тщательно соблюдая температурный и временной режим, чтобы предотвратить интенсивную химическую эрозию никелевых сплавов в жидких припоях. Процесс пайки ведут возможно быстрее и без перегрева.

Особенно интенсивной химической эрозии в борсодержащих припоях подвержены никелевые сплавы, легированные бором. Тонкостенные конструкции из никелевых сплавов паять такими припоями не рекомендуется.

Припой с кремнием слабее растворяет никелевые сплавы, чем припой с бором или бериллием; поэтому пайку ими можно вести даже с небольшим перегревом (до 40 °C). Однако при значитель-

ных выдержках (свыше 15—30 мин, особенно при температуре выше 1220 °С) может произойти заметное развитие локальной и общей химической эрозии паяемого металла, что в некоторых случаях сопровождается заметным увеличением величины зерна припоя и ухудшением его жидкотекучести.

Пайка нихрома, сплава инконель и никелевых сплавов, содержащих алюминий и титан, требует достаточно активных флюсов. Для этого пригодны флюсы 200, 201. Однако при применении боридных флюсов такого типа существует опасность (особенно при печном нагреве) эрозионного поражения поверхности паяемого металла из-за образования легкоплавкой боридной эвтектики Ni—В. Поэтому пайку никеля и его сплавов типа нихром при температуре 1000—1250 °С в печах иногда проводят в атмосфере сухого водорода с точкой росы — 40 ÷ —70 °С. Сплавы, легированные алюминием и титаном, паяют в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-1}$  Па) в смесях нейтральных газов с газовыми флюсами BF<sub>3</sub> или NH<sub>4</sub>Cl. При использовании более низкого вакуума ( $p = 1 \div 6,65$ )  $10^{-2}$  Па паяемую поверхность предварительно покрывают электролитическим никелем, медью или наносят на нее тонкий слой солевых флюсов.

При диффузионной пайке жаропрочных никелевых сплавов в вакууме, инертной или восстановительной атмосфере для предотвращения роста зерен (вторичной рекристаллизации) в зазор закладывают припой в виде фольги, содержащий 77 % Ni, 13 % Cr, 10 % P с температурой плавления 890 °С, покрытой порошком состава (%): 84 Ni, 12 Cr, 4 Mo. Нагрев при пайке происходит при 1050 °С в течение 60 мин при давлении 5 МПа. Жидкая фаза расплавленного сплава Ni—Cr—P проникает между частицами порошка и диффундирует одновременно в паяемый материал. Иногда припой системы Ni—В—Cr изготавливают без бора в виде ленты фольги, а затем его насыщают бором до требуемого содержания. При контактно-реактивной диффузионной пайке содержание бора в шве понижается в результате его диффузии в основной материал. Возможна контактно-реактивная диффузионная пайка никелевых сплавов после насыщения бором их поверхности [39].

Диффузионная пайка припоями на основе никеля (В Ni-2, В Ni-5 и В Pd-36) сопровождается интенсивной рекристаллизацией сплава AlSi-316 при температуре выше 1050 °С. В инконеле скорость диффузии бора выше, чем в сплаве AlSi-316. Скорость диффузии бора во всех случаях возрастает с повышением температуры.

Контактно-реактивная пайка жаропрочных никелевых сплавов возможна также путем прокладки между ними фольги ниобия, титана, ванадия с последующим нагревом до температуры плавления эвтектики в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па), активных газах или с флюсом. Пайка производится при приложении давления на соединяемые детали.

Для пайки никеля и его сплавов в качестве припоев пригодна также медь.

Характерно, что применение медных припоев и нанесение медных покрытий на холоднотянутые отожженные листы сплавов типа инконель приводит к ухудшению процесса смачивания, растекания и затекания в зазор. Медные припои легко окисляются, в связи с этим они нашли весьма ограниченное применение для пайки никелевых сплавов. Причем медные припои не должны содержать фосфора, так как в паяном соединении могут образоваться прослойки хрупких фосфидов никеля ( $\text{Ni}_3\text{P}$ ).

Никелевые сплавы в контакте с жидким серебром или серебряными припоями легко охрупчиваются и разрушаются под действием растягивающих напряжений.

Припои на основе алюминия, магния, титана, цинка образуют на никелевых сплавах хрупкие швы и поэтому не применяются.

Припои системы  $\text{Ni—Mn—Cr}$  почти не вызывают химической эрозии никелевых сплавов при пайке. Однако при сильных перегревах и длительном контакте жидкого припоя с паяемым металлом может развиваться заметная химическая эрозия последнего. Никелевые сплавы меньше всего поражаются эрозией при пайке палладиевыми припоями систем  $\text{Pd—Ni}$  и  $\text{Pd—Ni—Cr}$  с температурой плавления до  $1250^\circ\text{C}$ ; образующиеся паяные швы жаростойки до  $500\text{—}800^\circ\text{C}$ .

Пайка жаропрочных никелевых сплавов палладиевыми припоями может быть осуществлена в вакууме или в аргоне, активированном фтористым бором ( $\text{BF}_3$ ) или фтористым водородом ( $\text{HF}$ ). Ширина зазоров при пайке с флюсами  $0,005\text{—}0,12$  мм, а при пайке в защитных и восстановительных средах примерно  $0,015$  мм. Припои  $\text{Ni—Mn—Cr}$  обычно применяют при пайке в смесях  $\text{Ag} + \text{BF}_3$  или  $\text{Ag} + \text{HF}$ ; пайка в вакууме припоями, содержащими значительные количества марганца, может сопровождаться интенсивным испарением последнего, что способствует повышению коррозионной стойкости паяных соединений.

Нанесение на паяемый металл никелевого покрытия, а также введение в зазор никелевой фольги или никелевого порошка способствуют лучшему затеканию припоев при пайке никелевых сплавов типа инконель X состава (%): 73 Ni; 15,51 Cr; 7 Fe; 0,04 C; 0,8 Al; 2,5 Ti; 0,3 Si; 0,85 Nb + Ta (табл. 57).

Длительная гомогенизация образцов из сплава ХН77ТЮР, паянных припоями  $\text{Ni—B—Cr}$ ,  $\text{Ni—Si—Cr}$ , способствует резкому снижению их долговечности; подобное действие гомогенизирующего отжига наблюдается и в соединениях, паянных припоями  $\text{Ni—B}$  и  $\text{Ni—Be}$ , что, возможно, обусловлено межзеренным проникновением бора и бериллия в основной металл. Соединения из сплава ХН77ТЮР, паянные припоями типа  $\text{Ni—Cr—Mn}$ , могут работать в условиях нагрева до температуры  $850^\circ\text{C}$ , а паянные припоями на основе систем  $\text{Ni—Si—Cr}$  до температуры  $1000^\circ\text{C}$ .

К основным особенностям способа активированной прессовой

Т а б л и ц а 57. Механические свойства паяных соединений из никелевого сплава инконель X \*

| Припой     | Температура<br>испытания,<br>°С | Предел вы-<br>носливости<br>( $\tau = 100$ ч),<br>МПа | Временное<br>сопротивле-<br>ние при 20 °С,<br>МПа | Температу-<br>ра пайки,<br>°С |
|------------|---------------------------------|---|---|-------------------------------|
| Ni—Cr—B    | 649                             | 185,2   | —   | 1120                          |
| Ni—Cr—B    | 816                             | 44,1  | 282,2   | —                             |
| Pd—40 % Ni | 649                             | 123,5   | —   | —                             |
| Pd—40 % Ni | 816                             | 20,6  | —   | —                             |
| Ni—P       | —                               | —   | 91,1  | 982                           |
| Ag—Pd—Mn   | —                               | —   | 217,6   | 1232                          |

\* Перед пайкой в вакууме на поверхности сплава инконель X нанесен слой никеля толщиной 12,5 мкм; цикл пайки 1—15 ч; выдержка при температуре пайки 5—10 мин, охлаждение до 120 °С в течение 1,5—2 ч.

пайки жаропрочных сплавов относятся введение жидкого припоя в зазор или образование его путем контактно-реактивного плавления с последующим частичным или полным удалением жидкой фазы из зазора в результате приложения давления и дальнейшим соединением металлов по способу диффузионной пайки. Преимущество такого способа пайки связаны с активированием поверхностного слоя соединяемых сплавов при взаимодействии их с жидким припоем в результате диспергации и удаления оксидных пленок с жидкой фазой при выдавливании ее из зазора под действием приложенного извне давления. При этом облегчается возможность сцепления соединяемых металлов через очень тонкий слой жидкой фазы, при наличии которого проявляется механизм контактного упрочнения или непосредственного схватывания соединяемых поверхностей.

Такой способ соединения особенно эффективен, например, для высокотемпературных никелевых или кобальтовых жаропрочных сплавов, которые обычно паяют хрупкими припоями, легированными неметаллическими депрессантами, такими, как кремний, бор, и малопластичным металлическим марганцем. Способ, по данным Дж. С. Хоппина, применен впервые для соединения деталей авиационных газовых турбин, в частности, лопаток из жаропрочных никелевых сплавов системы нимоник в связи с необходимостью устранения склонности металла входных кромок лопаток к образованию межзеренных трещин в результате термической усталости. Этот участок лопаток изготавливают из монокристалла, который присоединяют к остальной части лопатки путем пайки по вышеуказанному способу. В качестве припоя-активатора паяемой поверхности для сплава Rene-80 рекомендован припой состава (%): 0,18 С, 1 В, 18 Сг, Ni — остальное.

Большое значение при таком способе пайки придается очень малому давлению на соединяемые детали (0,07—1,27 МПа) в связи с высокой склонностью этого припоя к затеканию по границам

зерен паяемого жаропрочного сплава. Малое давление должно обеспечивать только контакт паяемых металлов с дозой жидкого припоя по активированной поверхности.

Для высокотемпературной пайки сплавов инконель системы Ni—Cr—Fe наиболее пригодны никелевые припои. Содержание в сплавах типа инконель элементов, образующих весьма стойкие оксидные пленки, таких, как алюминий и титан, от 0,5 % и выше (в сумме) заметно ухудшает смачивающую способность их припоями. В этом случае поверхность паяемого металла должна быть подготовлена перед пайкой шлифованием и травлением, при которых хорошо удаляется слой оксидной пленки и обеспечивается шероховатость поверхности, улучшающая растекаемость припоя. Нанесение никелевого покрытия на такие сплавы также улучшает смачивание их жидкими никелевыми припоями.

## Глава 11

### ПАЙКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Титан — химический элемент IV группы периодической системы — относится к переходным металлам, отличается сравнительно небольшой плотностью ( $4,5 \text{ г/см}^3$ ), малым температурным коэффициентом линейного расширения и коррозионной стойкостью в морской воде, агрессивных средах и различных климатических условиях. В зависимости от легирования и термообработки временное сопротивление титановых сплавов изменяется от 490 до 1372 МПа. Титан может работать в широком интервале температур от  $-253$  до  $500^\circ\text{C}$ .

Паяемость титана и его сплавов определяется его высоким химическим сродством к другим элементам, в том числе к кислороду, азоту, водороду. Это обуславливает, в частности, высокую химическую и термическую стойкость его оксидов.

Титан обладает полиморфизмом. При температуре ниже  $882^\circ\text{C}$  он находится в  $\alpha$ -состоянии (гексагональная решетка), а выше — в  $\beta$ -состоянии (кубическая решетка). Это обстоятельство существенно влияет на паяемость титана, возможность удаления его оксидной пленки и диффузию депрессантов из шва в паяемый металл. Элементы, образующие твердые растворы внедрения, относятся к вредным примесям (C, N, O, H), охрупчивающим титан; находясь в растворе, они могут приводить к замедленному хрупкому разрушению сплавов. Температура перехода сплава OT4 из  $\alpha$ - в  $\beta$ -состояние соответствует  $950^\circ\text{C}$ , сплава BT3 — выше  $950^\circ\text{C}$ .

Элементы, образующие твердые растворы замещения, применяются в качестве легирующих элементов.  $\alpha$ -сплавы (BT1—00, BT1—0) имеют временное сопротивление 294—686 МПа; они хорошо паяются и сохраняют высокую пластичность при криогенных температурах (ниже  $-70^\circ\text{C}$ ). Например, сплав BT1—0 имеет временное сопротивление выше 980 МПа. Двухфазные сплавы  $\alpha + \beta$  с преобладанием при температуре  $20^\circ\text{C}$   $\alpha$ -фазы, легированные  $\beta$ -стабилизаторами в количестве до 2 % (OT4, BT4), имеют временное сопротивление 686—980 МПа; они более пластичны, хорошо паяются.

Сплавы титана с преобладанием  $\beta$ -структуры благодаря кубической решетке весьма пластичны при температуре  $20^\circ\text{C}$  и упроч-

няются при термообработке; они сильнее и глубже окисляются на воздухе, быстрее наводороживаются при травлении. Вместе с тем в сплавах с  $\beta$ -структурой процесс гомогенизации после диффузионной пайки происходит значительно медленнее, чем в сплавах с  $\alpha + \beta$ -структурной и особенно в сплавах с содержанием более 2 % стабилизаторов, что по-видимому, связано с более высоким содержанием в них легирующих элементов.

Титан относится к числу металлов-геттеров, интенсивно поглощающих азот и кислород и образующих с ними в твердом состоянии широкие области твердых растворов. В связи с большой растворимостью кислорода и азота и  $\alpha$ -стабилизирующим действием этих элементов в титане на его поверхности при нагреве на воздухе образуется малопластичный слой  $\alpha$ -твердого раствора (альфированный слой). Водород мало растворим в  $\alpha$ -титане, но образует с  $\alpha$ -сплавами гидрид титана  $Ti(OH)$ , способствующий их охрупчиванию. В  $\alpha + \beta$ -титановых сплавах водород растворим в большей степени и устраняет их эвтектоидный распад. Поэтому восстановительные газовые среды, содержащие азот и водород, применяемые при пайке сплавов на иных основах, не пригодны для пайки титана и его сплавов.

При температуре 650—700 °С титан образует стойкий оксид  $TiO_2$  (рутил), выше температуры 900 °С — нитриды с азотом воздуха. Для предотвращения насыщения титана и его сплавов кислородом и азотом при нагреве, способствующими охрупчиванию, слой оксида и хрупкий слой твердого раствора кислорода и азота в титане (альфированный слой) перед пайкой должны быть тщательно удалены с поверхности паяемых деталей механическим или химическим способом.

Образование оксидов на очищенной поверхности титана при температуре 20 °С происходит сравнительно медленно, и пайка может быть проведена в течение первых суток после травления. При нагреве титана и его сплавов под пайку оксидная пленка образуется более быстро, особенно при температурах выше 650—700 °С. Оксид титана  $TiO_2$  химически стоек и обладает низкой упругостью диссоциации. В настоящее время для пайки титана и его сплавов иногда применяют специальные реактивные флюсы.

Образование оксидной пленки и альфированного слоя на поверхности паяемого изделия при пайке могут быть предотвращены, если изделие нагревать в чистом проточном аргоне или вакууме. Хотя оксид  $TiO_2$  и не восстанавливается в вакууме с остаточным давлением более  $1,33 \cdot 10^{-3} - 1,33 \cdot 10^{-5}$  Па, относительно большая растворимость кислорода в  $\alpha$ -Ti (до 20 %) и сравнительно небольшое содержание кислорода в контейнере при пайке в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-2} - 1,33$  Па) или в проточном чистом и сухом аргоне (гелии) оказываются достаточными для предотвращения образования оксида на предварительно очищенной поверхности титана при нагреве в этих средах.

Герметизация контейнера и чистота его внутренней поверхно-

сти оказывает большое влияние на качество паяного соединения. Небольшая течь или не очищенная от оксидов внутренняя поверхность контейнера из коррозионно-стойкой стали могут быть источниками кислорода, причиной окисления поверхности паяемого изделия и ухудшения качества паяного соединения.

Титан и его сплавы паяют при температуре выше 700—860 °С, т. е. выше температуры перехода  $\alpha$ -Ti в  $\beta$ -Ti, в котором особенно высока растворимость кислорода.

От действия кислорода, появляющегося в контейнере из восстановленных оксидов стали, наиболее успешно защищают экраны из коррозионно-стойкой стали или из титана в виде крышек или негерметизированных коробок с чистой поверхностью.

Пайка титана легкоплавкими оловянными и высокоплавкими алюминиевыми припоями возможна только после предварительного лужения паяемой поверхности погружением в расплавленный припой при температурах, при которых тонкий слой пленки  $TiO_2$  может быть восстановлен вследствие растворения кислорода в титане при температуре 800—900 °С. После устранения оксидных пленок и нагрева в инертной среде смачивание титана оловом и алюминием хорошее.

Флюсы, применяемые при пайке сплавов на других основах, не пригодны для пайки титана.

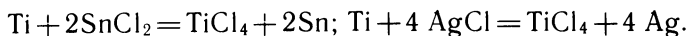
Рекомендуемые в литературе флюсы для пайки титана и его сплавов содержат главным образом хлориды и фториды металлов и рекомендованы для пайки в пламени кислородно-ацетиленовых горелок.

Титан и его сплавы лудят в жидком олове при перегреве до температуры 700—750 °С. Для этого деталь с обезжиренной и протравленной поверхностью быстро погружают в жидкое олово, чтобы поверхность титана не успела нагреться и окислиться. Перед погружением оксидную пленку быстро удаляют с поверхности жидкого олова. Такое лужение можно проводить и в среде проточного аргона. Выдержка в жидком олове технического титана должна быть не менее 15 мин. Деталь, вынутую из жидкого олова, быстро протирают чистой ветошью для удаления оксидной пленки со слоя олова. При этом на облуженной поверхности не должно быть участков, не смоченных оловом.

Необходимость перегрева олова до столь высоких температур при лужении титана и его сплавов, вероятно, обусловлена значительной скоростью диффузии кислорода из оксидов с поверхности титана вглубь при более низких температурах. Облуженную поверхность перед пайкой слегка зачищают мягкой щеткой и протирают спиртом или ацетоном.

При пайке луженой поверхности температура нагрева паяльника не должна превышать 250 °С, так как выше этой температуры возможно нарушение сплошности слоя полуды. При пайке легкоплавкими припоями применяют обычные для этого процесса флюсы.

Лужение с помощью реактивных флюсов основано на способности титана восстанавливать металлы из их расплавленных солей. Процесс идет по следующим уравнениям:



Хлорид титана  $\text{TiCl}_4$  в виде газа улетучивается с поверхности металла, разрушая при этом оксидную пленку  $\text{TiO}_2$ , а восстановленные олово и серебро покрывают чистую поверхность облуживаемого металла. Очищенную поверхность титана и его сплавов, покрытую оловом или серебром, подвергают пайке обычными способами.

При реактивно-флюсовом лужении оловом поверхность титана покрывают в печи с нейтральной атмосферой. Реакция восстановления олова происходит при температуре  $350\text{—}400^\circ\text{C}$  и сопровождается выделением белого дыма ( $\text{TiCl}_4$ ). После окончания реакции и охлаждения деталей остатки флюса должны быть немедленно и тщательно смыты в горячей воде (при температуре  $70\text{—}90^\circ\text{C}$ ), а детали просушены. Горячее лужение титана и его сплавов перед пайкой проводят с помощью реактивных флюсов или при погружении его в жидкий металл.

Перед пайкой титана с алюминием или алюминиевыми сплавами применяют предварительное алитирование титана в жидком алюминии, перегретом до температуры  $720\text{—}790^\circ\text{C}$ . Перед погружением титана в ванну поверхность жидкого алюминия раскисляют флюсами, содержащими хлористые и фтористые соли щелочных металлов (например, флюсом 34А); длительность алитирования обычно не превышает  $10\text{—}12$  мин. Пайка титана и его сплавов на воздухе легкоплавкими оловянными припоями может быть выполнена только по предварительно нанесенному покрытию из химического или гальванического никеля, меди, олова. Временное сопротивление разрыву таких соединений не превышает  $49$  МПа.

Относительно прочное сцепление «барьерных» металлических покрытий с паяемым металлом получается после термовакуумного напыления слоя металлов ( $10\text{—}20$  мкм) при разрежении  $1,33 (10^{-2}\text{—}10^{-3})$  Па на предварительно подогретую деталь.

Покрытие титановых сплавов слоем никеля может быть осуществлено также химическим способом из растворов, содержащих гипофосфит никеля; следует учитывать, что при этом покрытие представляет собой сплав  $\text{Ni} - (3\text{—}11\%) \text{P}$  и уже при невысоком нагреве ( $400\text{—}500^\circ\text{C}$ ) происходит распад сплава  $\text{Ni}-\text{P}$  с выделением фазы  $\text{Ni}_3\text{P}$ .

Для титановых сплавов, особенно легированных алюминием, ванадием и молибденом, нашла применение пайка в сухом проточном аргоне с точкой росы  $-65^\circ\text{C}$  с предварительным вакуумированием контейнера. Пайку припоями, содержащими значитель-

ные количества циркония, выполняют в вакууме с остаточным разрежением  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па.

Для нагрева титана при пайке используют вакуумные или обычные электропечи. В последнем случае требуемая атмосфера вакуума или сухого инертного газа создается в герметизированном контейнере с помещенным в него изделием. Контейнеры изготавливают из тонколистовой хромоникелевой коррозионно-стойкой стали. При нагреве под пайку контакт титана со стенками контейнера недопустим во избежание их контактного плавления с образованием эвтектики Ti—Ni. Поэтому изделие изолируют прокладками из молибдена, слюды или керамики, не восстанавливаемой титаном (методом плазменного напыления наносят на приспособление слой оксида алюминия).

При пайке титана в вакууме должен отсутствовать контакт его с углеродом, так как он имеет высокое химическое сродство с титаном. При использовании графитовых нагревателей их покрывают слоем  $Al_2O_3$ . Нагрев контейнера с помещенным в него изделием небольших размеров возможен в расплавленной солевой ванне. При пайке титана и его сплавов с локальным нагревом применяют, например, лучевой нагрев или газовое пламя и флюс.

При газопламенной пайке с флюсами рекомендуют нагревать детали только после того, как припой уложен в зазор и поверхность титана, подвергаемая нагреву, покрыта слоем флюса. Применяемые для пайки титана флюсы малоактивны, часто загрязняют паяемую поверхность; припой растекается по ней плохо и не обеспечивают стабильных механических характеристик паяных соединений. Сопротивление срезу соединений из титана и его сплавов, паянных в кислородно-ацетиленовом пламени серебрянными припоями с флюсами, составляет 39,2—225,4 МПа.

Опыты по ультразвуковой пайке титана не дали положительных результатов. Например, после ультразвукового лужения сплава ОТ4 слои припоев П200А и ПОС 61 оказались слабо связанными с основным металлом.

Высокое химическое сродство титана с другими элементами, в том числе и металлами, обуславливает его способность образовывать с большинством из них химические соединения и широкие области ограниченных твердых растворов, чаще всего с эвтектикой. Перитектики с титаном образуют только серебро (с химическим соединением TiAg) и вольфрам (без химического соединения). Неограниченные твердые растворы с титаном образуют лишь тугоплавкие металлы (Zr, V, Mo, Nb). Среди них цирконий и ванадий образуют твердые растворы с минимумом температуры плавления, а молибден и ниобий — твердые растворы с повышающейся температурой плавления сплавов при их введении.

Необходимость ограничения температуры пайки титана и его сплавов связана с большой скоростью роста его зерна и охрупчиванием в присутствии в сплаве кислорода при температурах

выше 1000—1050 °С. Поэтому в качестве основы припоев для пайки титана и его сплавов используют среднеплавкие металлы — алюминий, серебро и легкоплавкий металл — олово, образующие с титаном химические соединения или достаточно легкоплавкие эвтектики, богатые титаном, с медью, никелем, кремнием. При пайке титана и его сплавов такими припоями в шве могут образовываться прослойки химических соединений и хрупкие эвтектики, содержащие эти соединения. Вследствие этого в паяемом металле отсутствует межзеренная химическая эрозия, но возможно охрупчивание паяемого металла при пайке.

Среди интерметаллидов, образуемых титаном с другими металлами, TiNi имеет достаточно высокую пластичность ( $\delta = 15\%$ ;  $KC = 37,9 \text{ Дж/м}^2$ ;  $\sigma_b = 852,6 \text{ МПа}$ ;  $t_{пл} = 1300 \text{ °С}$ ). Однако в паяных швах при перитектической реакции в процессе охлаждения TiNi превращается в хрупкий интерметаллид  $Ti_2Ni$ . Интерметаллид TiAg, судя по его микротвердости, значительно пластичнее, чем интерметаллид  $Ti_2Cu$ .

Для пайки титана прежде всего нашли применение серебряные припои. При температуре перитектики в сплавах образуется неконгруэнтное соединение TiAg и широкая область твердых растворов. Интерметаллид TiAg относительно пластичен, но соединения из титана, паянные серебром, обладают невысоким сопротивлением срезу, в частности, из-за большой разницы температурных коэффициентов линейного расширения этой фазы и титана.

Введение в серебряный припой более 7—10 % Cu после пайки готовым припоем приводит к резкому снижению механических свойств соединения вследствие образования по границе с паяемым металлом хрупких интерметаллидов  $TiCu_3$  и  $Ti_2Cu$ . Из-за неравновесности процесса затвердевания при охлаждении паяного шва уже при содержании в серебряном припое свыше 0,3 % Cu сначала образуется прослойка интерметаллидов в медью, а затем эти неравновесные фазы растворяются в припое, а по границе шва с основным металлом образуется равновесная для этих условий прослойка TiAg.

Для пайки титановых сплавов применяют также серебряные припои, легированные палладием и галлием, следующих составов (%): 1) 20 Pd, 3—10 Ga, Ag — остальное;  $t_n = 930\text{—}960 \text{ °С}$ ; 2) 10 Pd, 90 Ag;  $t_{пл} = 985 \text{ °С}$ ,  $t_n = 1000 \text{ °С}$ ; 3) 7—15 Pd, 5—9 Ga, Ag — остальное;  $t_n = 930 \div 960 \text{ °С}$ ; 4) 3,5—6 Pd, 3,5—10 Al, Ag — остальное;  $t_n = 650 \div 790 \text{ °С}$ .

Технология пайки с этими припоями: медленный нагрев до 600 °С в вакууме ( $p = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ ), заполнение рабочей полости печи геллием, быстрый нагрев до температуры пайки, выдержка при ней 2 мин и медленное охлаждение (50 °С/мин). Получаемые при этом паяные соединения имеют высокие механические свойства, однофазны по структуре и бездефектны. Припои обладают низкой эрозийной способностью по отношению к титановым сплавам.

Другой основой припоев для капиллярной пайки титана служит алюминий. Этот металл образует с титаном двойную диаграмму состояния с химическими соединениями. Однако скорость роста интерметаллида  $TiAl_3$ , образующегося по границе с паяемым металлом при температуре пайки, невелика, что обусловлено сравнительно высокой его энергией активации, равной 154 Дж/моль.

Алюминиевые припои при капиллярной пайке титановых изделий нашли применение при изготовлении звукопоглощающих сотовых панелей (при пайке обшивки с сотоблоками). В качестве припоя применен алюминиевый сплав 3003 в виде фольги толщиной 0,2 мм. Пайку проводили в вакуумной печи при давлении  $2,0 \cdot 10^{-4}$  Па. Изделие для предотвращения стекания припоя подвергали вращению через дверцу печи. Режим пайки: нагрев до 679 °С; выдержка 3 мин с последующим охлаждением путем напуска в печь газа при температуре 66 °С. Для предотвращения заплавления перфорационных отверстий использовали стоп-пасту из  $Al_2O_3$  в виде порошка со связкой из изопрена и метакрилата. Паяные титановые панели на 30—50 % легче и имеют в 3 раза большую почность на отрыв обшивки и в 10 раз меньшую потерю акустических свойств из-за перекрытия перфорационных отверстий, чем сварные панели из никелевого сплава инконель-625 [44].

Важнейшими депрессантами титановых припоев кроме меди, никеля являются кобальт, кремний, германий, бериллий. Температура плавления наиболее легкоплавкой эвтектики титана с этими элементами соответственно 1025, 1330, 1360,  $1030 \pm 50$  °С. Эти депрессанты имеют еще одно преимущество: каждый из них образует достаточно широкую область твердых растворов с титаном и неконгруэнтные химические соединения с относительно невысокой температурой разложения (энергией активации), что является важнейшим принципом осуществления диффузионной пайки.

Высокотемпературные эвтектики титана с кремнием и германием нашли применение главным образом в качестве припоев для пайки тугоплавких металлов, в том числе с графитом. Они образуют коррозионно-стойкие паяные соединения и хорошо противостоят интенсивному ядерному излучению. Соединения из титана или ниобия, паянные титановыми припоями с кремнием, способны длительно работать при температуре выше 1200 °С.

В контакте паяемого металла  $A$  с припоем  $A-B$  или  $B$  могут образоваться прослойки только тех химических соединений, которые на диаграмме состояния  $A-B$  располагаются между паяемым металлом и припоем. Между титаном и эвтектиками  $Ti-Ni$  или  $Ti-Sn$  на соответствующих диаграммах состояния химических соединений нет. Поэтому при пайке титана припоями, содержащими никель или кремний в количествах, не больших, чем в эвтектике, по границе паяемого металла и жидкого припоя прослойки химических соединений не образуются. Однако присутствие в припое меди и кремния, вследствие чего число атомов алюминия на единицу площади паяемого металла, смоченного

припоем, уменьшается, может привести к торможению роста интерметаллида  $TiAl_3$ . Это подтверждается данными о том, что при пайке титанового сплава припоем  $Al-48\% Si-3,8\% Cu$  скорость роста интерметаллида  $TiAl_3$  при температуре  $680^\circ C$  в 3 раза меньше, чем при пайке припоем  $Al-1,2\% Mn$ ; при температуре пайки  $510^\circ C$  образуются галтельные участки, но хрупкие интерметаллидные прослойки не возникают.

Введение алюминия в серебряные припои для снижения их температуры плавления возможно лишь в ограниченных количествах; обычно это количество не превышает 5 %. Для улучшения смачивания такими припоями титана в проточном аргоне в них вводят  $\sim 0,2\% Li$ . Снижение температуры плавления серебряных припоев может быть достигнуто при введении в них олова. Олово, как и алюминий, образует с титаном тугоплавкие химические соединения. Предельное содержание олова в серебряных припоях 5 %. Такие припои имеют более низкие механические характеристики, чем припои на основе серебра, легированные алюминием.

Наибольшую прочность паяных соединений можно обеспечить при пайке припоями на той же основе, что и паяемый металл, а также на основе металлов, образующих с ним неограниченные твердые растворы [7]. Такой основой припоев при пайке титана могут быть цирконий и ванадий, образующие с титаном непрерывные твердые растворы с минимумом на диаграмме состояния.

Вследствие более высокого химического сродства циркония к кислороду, по сравнению с титаном, пайка титана и его сплавов припоями, содержащими цирконий, требует более высокого вакуума ( $p = 1,33 \cdot 10^{-4}$  Па) или сохранения вакуума ( $p = 1,33 \cdot 10^{-1}$  Па), но с предварительной очисткой пространства контейнера сухим чистым аргонном.

Титан с большинством металлов образует системы сплавов эвтектического типа. Во всех таких сплавах одна или две фазы эвтектики являются малопластичными химическими соединениями. Поэтому титановые припои, легированные такими элементами, за исключением тугоплавких металлов, с которыми титан образует непрерывные ряды твердых растворов с минимумом, малопластичны и применяются в виде порошковых паст или в виде фольги, состоящей из нескольких слоев пластичных составляющих сплавов, чередующихся с прослойкой титана и вступающих с ней в контактно-реактивное плавление в процессе пайки.

Возможна контактно-реактивная диффузионная пайка сплава BT14 с прослойкой палладия при температуре  $1160^\circ C$  с выдержкой 15 мин. Гомогенизирующий отжиг производится при  $900^\circ C$  в течение 12 ч. Капиллярная диффузионная пайка припоями  $Cu-Ti$ ,  $Ni-Ti$ ,  $Fe-Ti$  выполняется при температуре  $960^\circ C$  в течение 15 мин с гомогенизирующим отжигом при  $900^\circ C$  в течение 12 ч. Такие режимы обеспечивают равнопрочность паяных соединений с основным материалом. При этом режим пайки мало

влияет на механические свойства сплава ВТ14: временное сопротивление прочности его снижается на 2—5 %, а относительное удлинение, поперечное сжатие и ударная вязкость повышаются на 10—20 %.

По данным С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко и В. Л. Гришина, длительность диффузионной пайки эвтектиками  $Ti-Ni$  или  $Cu-Ti$  существенно зависит от толщины прослойки жидкого припоя и может изменяться; например, при температуре 980 °С от нескольких минут при микронной ее толщине до десятка часов при толщине в сотни микрометров. В связи с этим более широкое применение нашла контактно-реактивная диффузионная пайка, при которой припой с большим содержанием титана образуются при контактно-реактивном плавлении паяемого металла с тонкими (порядка десятков микрометров) прослойками депрессантов и тугоплавких металлов, наносимых предварительно термовакuumным или другим способом.

Повышенная растворимость депрессантов титановых сплавов (серебра, меди, никеля), а также примесей (кислорода, азота) имеет место только в  $\beta$ -титане. Поэтому для удаления оксидов с поверхности титана и его сплавов при пайке в безокислительной атмосфере, а также для ускорения процесса диффузии депрессантов в паяемый металл диффузионную пайку обычно выполняют при температуре выше температуры превращения  $\alpha \rightarrow \beta$ . Вместе с тем в  $\beta$ -состоянии титан и его сплавы имеют повышенную склонность к росту зерна, что в присутствии в них кислорода приводит к их охрупчиванию. Поэтому обычно длительный нагрев при диффузионной пайке ведут в температурной области 960—1000 °С.

При кратковременном нагреве при 1050—1100 °С в течение 5—10 мин зерно вырастает до значительно меньших размеров, чем при нагреве при 960—1000 °С в течение 1—10 ч. Применяемые до недавнего времени режимы диффузионной пайки титана и его сплавов отличались тем, что выдержка в процессе изотермической кристаллизации и последующего гомогенизирующего отжига происходила при одной и той же температуре.

Как было показано на примере композиционной диффузионной пайки, для ускорения процесса изотермической кристаллизации и ограничения роста зерна в сплавах ОТ4 процесс необходимо вести при температуре 1100 °С в течение 10 мин; при этом успевает произойти изотермическая кристаллизация. Гомогенизирующий отжиг достаточно проводить при температуре 960—980 °С. Это позволяет более эффективно предотвратить рост зерна паяемого металла и сократить время пайки [14].

На длительность гомогенизирующего отжига существенно влияет легирование паяемого металла. При пайке  $\alpha + \beta$ -сплавов, легированных до 2 %  $\beta$ -стабилизаторами, процесс гомогенизирующего отжига происходит примерно в 2 раза быстрее, чем для сплавов  $\alpha + \beta$ , содержащих более 2 % стабилизаторов. Гомогенизирующий отжиг, как и диффузионная пайка, возможен только

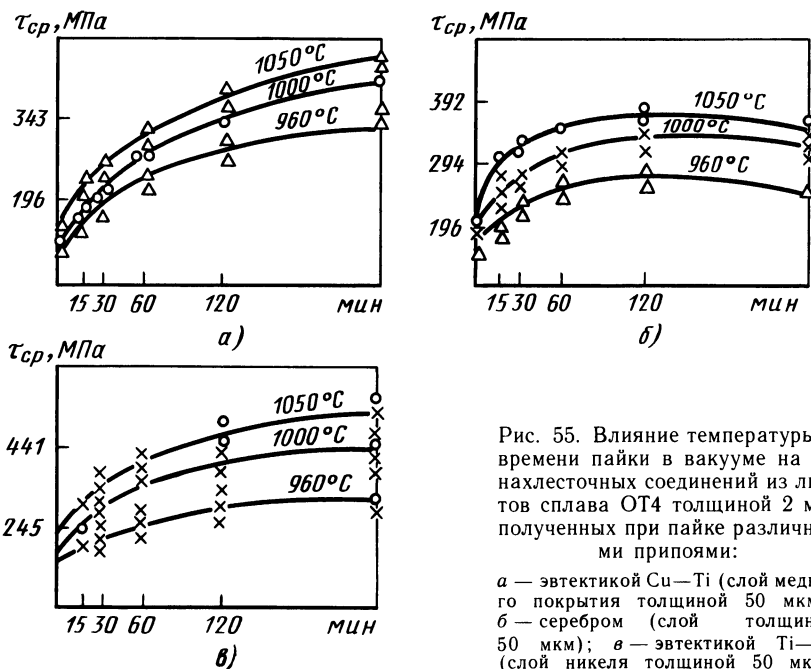


Рис. 55. Влияние температуры и времени пайки в вакууме на  $\tau_{ср}$  нахлесточных соединений из листов сплава ОТ4 толщиной 2 мм, полученных при пайке различными припоями:

а — эвтектикой Cu—Ti (слой медного покрытия толщиной 50 мкм);  
 б — серебром (слой толщиной 50 мкм);  
 в — эвтектикой Ti—Ni (слой никеля толщиной 50 мкм)

при температурах выше температуры  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения. Нагрев до температуры 1150 °C позволяет разбавить хрупкие эвтектики титаном благодаря его растворению в припое.

При диффузионной пайке титановых сплавов процессы диффузии легирующего элемента из шва в паяемый металл могут активизироваться в результате многократного их перехода из  $\alpha$ - в  $\beta$ -состояние и обратно с одновременным ускорением зарастания нестабильных при низких температурах несплошностей в литой структуре и уменьшением развития в шве диффузионной пористости.

Как видно из рис. 55, сопротивление срезу соединений из сплава ОТ4, паянных припоем Ti—Ni, ниже, чем припоем Cu—Ti (В. Л. Гришин, С. В. Лашко). Это обстоятельство связано с особенностями влияния меди и никеля на распад  $\beta$ -твердого раствора при охлаждении соединений после пайки. При охлаждении паяного соединения из титана и его ( $\alpha$ ) и ( $\alpha + \beta$ )-сплавов из  $\beta$ -области в область существования  $\alpha$ -фазы могут образоваться нестабильные хрупкие структуры, в частности  $\omega'$ -,  $\alpha'$ -фазы. Тормозят или предотвращают образование хрупких составляющих  $\omega'$ -фаз такие элементы, как гафний и цирконий.

Применение давления при диффузионной пайке позволяет получить прочные соединения при более низких температурах и меньших выдержках, чем при диффузионной пайке без давления (в прижимном приспособлении).

Диффузионная пайка соединений из сплава ОТ4 припоем ПСр 72 обеспечивает большее сопротивление срезу, чем диффузионная пайка серебром и медью порознь. Соединения, выполненные этим припоем при температуре 1150 °С в течение 10 мин в среде проточного аргона, имеют сопротивление срезу до 480,2 Па (толщина фольги припоя 50 мкм).

Диффузионная пайка титана и его сплавов припоями на основе олова или алюминия неперспективна, несмотря на большую растворимость этих элементов в титане (до 35 и 34 % соответственно) из-за тугоплавкости образующихся интерметаллидов. Обычно при таком способе пайки титана необходимы достаточно плотный прижим паяемых поверхностей и их тщательная подготовка, которая существенно удорожает процесс, а для некоторых типов конструкций трудновыполнима.

# ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

## 1. ЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

В последние годы условия разработки технологии пайки при подготовке производства существенно усложнились. Причины этого — в быстром расширении номенклатуры паяемых изделий, дальнейшем усложнении их конструктивных особенностей, повышении и расширении требований к эксплуатационным характеристикам, увеличении разнообразия используемых в паяных изделиях сплавов, а также в необходимости существенного ускорения подготовки производства и перехода к гибким производственным системам (ГПС).

Технология пайки изделий все шире базируется на успехах ряда смежных фундаментальных и технических наук — химии, физической химии (особенно такого ее раздела, как термодинамика), физики металлургии, теории прочности, металловедения, что стимулирует исследование процессов пайки и расширяет ее технологические возможности в производстве. Результаты всех этих исследований облегчают оптимизацию проектирования технологии пайки.

Кроме чисто технологического аспекта проблемы проектирования технологии пайки, необходимо учитывать аспекты технико-экономические, связанные с учетом стоимости и дефицитности применяемых материалов для пайки (припоев, флюсов, газовых сред и др.), норм их расхода, стоимости и производительности оборудования, средств автоматизации, механизации и роботизации, а также экологические аспекты, связанные с необходимостью сохранения окружающей среды в связи с токсичностью многих компонентов припоев, газовых сред, флюсов.

Проектирование технологии и технологических процессов до недавнего времени производилось только эвристическими методами. Вместе с тем быстрый рост информации в области теории, технологии и оборудования пайки, затрудняющий ее быструю переработку, приводит к использованию неполных данных и существенно зависит от эрудиции технолога. При этом многие достижения в области паяльного производства остаются неучтенными, выбранная технология — неоптимальной, а процесс разработки — длительным.

Вследствие быстрого роста объемов информации возможности

ее переработки, накопления и использования при выборе технологии пайки изделий стали превосходить возможности не только одного человека, но и достаточно широкого круга технологов, работающих над изделием. Поэтому возникла необходимость использования для этой цели памяти ЭВМ. Это тем более необходимо, что при разработке технологии в процессе подготовки производства приходится сталкиваться с множеством альтернативных решений, что без использования ЭВМ затрудняет оптимизацию технологии и технологических процессов. Эта проблема достаточно сложна. В данной книге даны принципиальные подходы к ее решению.

## **2. ГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОДНОРОДНЫХ И РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Образование паяного соединения происходит в результате развития ряда процессов: теплового воздействия пайки на паяемый металл  $M_k$ , физико-химического взаимодействия  $M_k$  с припоем  $M_p$  и вспомогательными материалами  $M_{всп}$ ; термического и химического взаимодействия  $M_k$ ,  $M_p$ ,  $M_{всп}$  с окружающей газовой средой и материалом оснастки и др. Все эти процессы влияют на свойства и качество паяных соединений и изделий. На протекание этих процессов существенно влияют также конструкция изделия и паяных соединений, масштабный фактор и масса изделий, а также особенности нагревательного оборудования и инструмента, режим и термический цикл пайки. Поэтому выбор оптимальной технологии пайки изделия весьма непрост и требует учета влияния всех этих факторов. В соответствии с этим проектирование технологии пайки изделия должно состоять из ряда этапов, на каждом из которых должен быть произведен выбор очередных факторов технологии. Такой выбор прежде всего должен базироваться на теории процессов пайки и современном производственном опыте, достижениях в области технического оснащения процессов и опыте эксплуатации паяных изделий.

Для перехода от потока информации в этих областях к управлению качеством паяных изделий и эффективностью их производства необходима информационная модель проектирования технологии пайки. Только на основе такой модели возможно управление качеством изделия. Такая модель должна отражать обоснованную последовательность этапов проектирования.

Проектирование технологии пайки изделий должно состоять из ряда этапов, на каждом из которых выбирают соответствующие факторы технологии. Последовательность выбора этапов основана на следующих требованиях.

1. Процесс пайки не должен воздействовать на свойства конструкционного материала в такой степени, чтобы он терял свои эксплуатационные свойства. Поэтому прежде всего должны быть

выполнены температурные условия пайки: тепловое воздействие процесса пайки должно быть таким, чтобы механические, физические, физико-химические свойства паяемого материала после такого воздействия оставались в требуемых интервалах.

2. Процесс формирования паяного соединения и свойства применяемого припоя и способов пайки должны обеспечивать требуемые свойства паяного соединения и изделия в целом.

3. Выбранная технология должна быть оснащена соответствующим оборудованием, оснасткой, инструментом, средствами механизации, автоматизации и роботизации.

Только при указанной последовательности этапов проектирования возможен выбор оптимальной технологии, так как каждый последующий этап проектирования базируется на данных, полученных на предыдущем или предыдущих его этапах. Так, оборудование можно выбирать только после того, как обоснованы термический режим пайки и термический цикл пайки; последние могут быть выбраны только после того, как выбран припой и (или) способ пайки по формированию паяного шва и получению припоя, выбраны способы пайки по удалению оксидной пленки, а для этого прежде всего необходимо знать допустимые температуры плавления припоя и пайки, т. е. интервалы нагрева паяемого материала, в которых он не теряет своих эксплуатационных свойств.

На этапах проектирования технологии пайки, на которых существенное влияние могут оказывать конструкция, масса и габариты изделия, необходимо учитывать возможность их влияния при заданных факторах соединений и изделия.

В основу поиска оптимальной технологии по входной информации авторами был положен декомпозиционный алгоритм, реализуемый в 15 этапов ( $Z_1—Z_{15}$ ). На каждом этапе происходит целенаправленное сужение областей допустимых решений с помощью соответствующих этапу ограничений (частных критериев  $K_1, \dots, K_{15}$ ). В процессе поиска, при переходе от одного этапа к другому, предыдущие являются отправными для последующего этапа.

Графическая модель проектирования технологии пайки базируется на условиях обеспечения качества паяных изделий, задаваемых критерием качества  $K_k$ , по которому необходимыми и достаточными условиями на этапе подготовки производства являются единство (взаимосвязь) и совместимость важнейших элементов производственной системы: конструкции  $K$ , конструкционного материала  $M_k$  и оснащенной технологии пайки  $T$  между собой и с эксплуатационными характеристиками  $\mathcal{E}$  изделия.

Высокая эффективность производства качественного изделия обеспечивается критерием эффективности  $K_z$ , по которому необходимыми и достаточными условиями для этого являются совместимость  $M_k$  и  $T$  с экономикой  $\mathcal{E}_n$ , организацией и управлением ОУ, охраной окружающей среды ООС. Все эти элементы должны быть связаны между собой прямыми и обратными связями (см. рис. 12).

Последовательность обеспечения частных совместимостей  $K$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $M_k$ ,  $T$  факторов устанавливается рядом предъявляемых требований к технологии пайки в отношении сохранения свойств  $M_k$ , образования бездефектных паяных швов и соединений, выбора способов пайки, припоя и вспомогательных материалов, конструкции паяных соединений и изделий, оптимизации свойств паяных соединений по параметрам технологического процесса пайки, по давлению, нагреву, материалу оснастки, нагревательному оборудованию (инструменту), средствам механизации и автоматизации.

На качество изделий существенно влияет технология подготовки поверхности  $M_k$ ,  $M_n$  и  $M_{всп}$  и обработки изделия после пайки, конструкционные факторы паяемого соединения и изделия.

Обнащение технологии пайки включает в себя нагревательное оборудование или инструмент, оснастку и средства механизации, автоматизации и роботизации.

На рис. 56 приведена графическая информационная модель проектирования технологии пайки изделия. На этой модели  $X_N$  — входные данные о  $M_k$ , способах пайки и их классификации, технологических и вспомогательных материалах, оборудовании, инструменте, материале оснастки, средствах механизации и автоматизации;  $K_n$  — критерии выбора данных из табл.  $T_m$ .

На этапе  $Z_1$  по данным табл.  $T_1$  о критических температурах и температурных интервалах нагрева паяемого материала  $M_k$  и по критерию  $K_1$  могут быть выбраны температурные области  $\Delta t_n$  и области допустимых скоростей его нагрева и охлаждения при пайке (рис. 57).

На этапе  $Z_2$  по данным табл.  $T_2$  о допустимых интервалах нагрева паяемого материала  $M_k$ , полученных на этапе  $Z_1$ , и по критерию  $K_2$  среди существующих припоев могут быть выбраны также  $M'_n$ , температура пайки которых попадает в допустимые интервалы  $\Delta t_n$  (рис. 58).

На этапе  $Z_3$  по данным о выбранных основах припоев  $M'_n$ , полученных на предыдущем этапе, по данным табл.  $T_3$  о физико-химической совместимости паяемого металла  $M_k$  с выбранными на этапе  $Z_2$  основами припоев и по критерию  $K_3$  могут быть выбраны основы припоев, физико-химически совместимые с паяемым материалом  $M_k$  (рис. 59).

На этапе  $Z_4$  по данным табл.  $T_4$  о пригодных для паяемого материала  $M_k$  припоях  $M''_n$ , получаемых контактными способами пайки, и по критерию  $K_4$  выбирают способы СП1', пригодные для получения выбранных на этапе  $Z_3$  припоев  $M'_n$  (рис. 60).

На этапе  $Z_5$  по данным о пригодных для пайки материалах  $M_k$  способах пайки СП1' и по критерию  $K_5$  выбирают те из них СП1'', которые пригодны для паяемого изделия с заданными при входе конструкционными факторами  $K_{\Phi}^{nc}$  и  $K_{\Phi}^{nn}$  (рис. 61).

На этапе  $Z_6$  по данным о способах пайки СП1'', способах пайки по удалению оксидной пленки СП2, приведенных в табл.  $T_5$ , критерию  $K_6$  и соответствующему алгоритму находят те способы

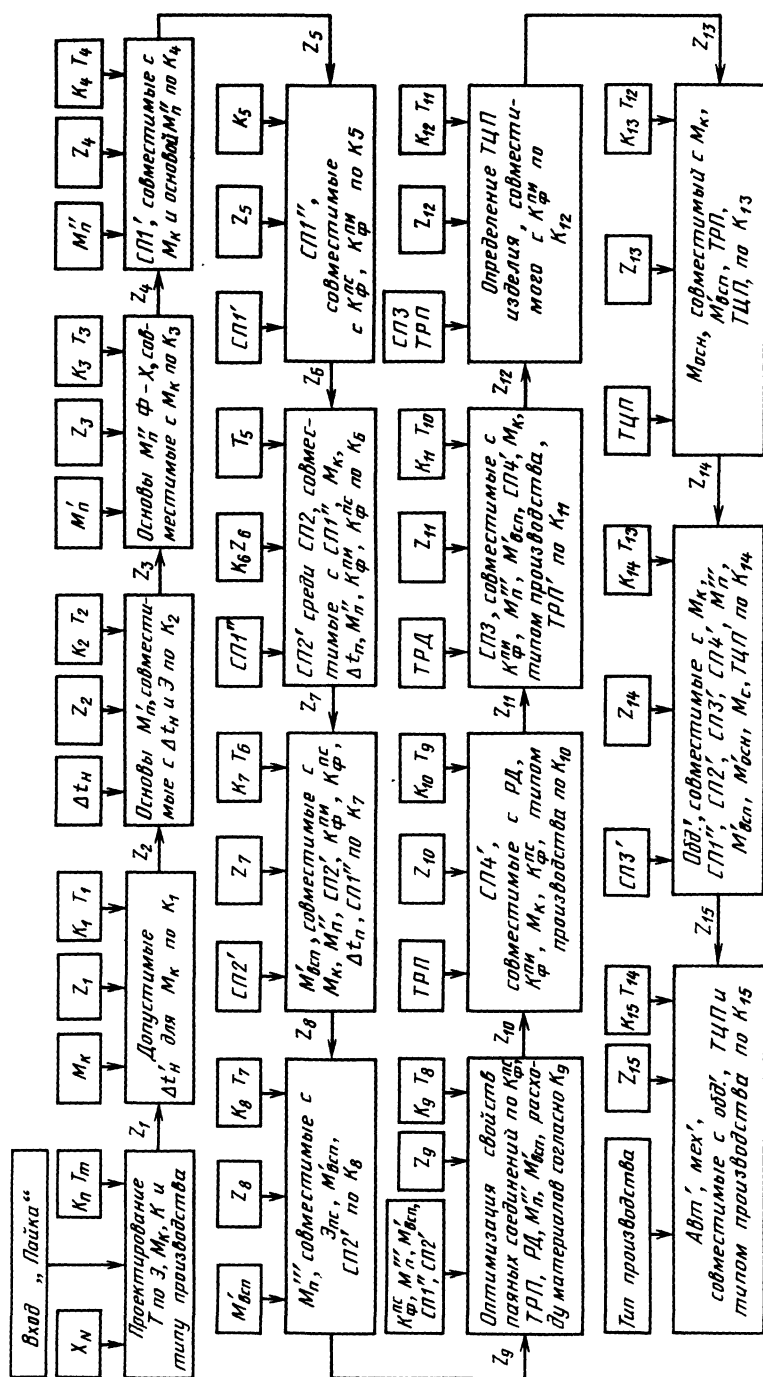


Рис. 56. Графическая информационная модель проектирования технологии пайки изделия

пайки СП2, которые совместимы с заданным паяемым материалом  $M_k$  и конструктивными факторами изделия  $K_{\Phi}^c$  и  $K_{\Phi}^n$ .

На этапе  $Z_7$  по данным о способах пайки СП2', полученных на предыдущем этапе, вспомогательных материалах и их температурных интервалах активности, приведенных в табл.  $T_6$ , по критерию  $K_7$  и соответствующему алгоритму находят вспомогательные материалы — флюсы, газовые среды и др., обеспечивающие совместимость  $M_k$ ,  $M_n$  и  $M_{всп}$  при пайке.

На этапе  $Z_8$  по полученным на этапе  $Z_7$  данным о  $M_{всп}$  для пайки, по данным о влиянии на эксплуатационные характеристики изделия

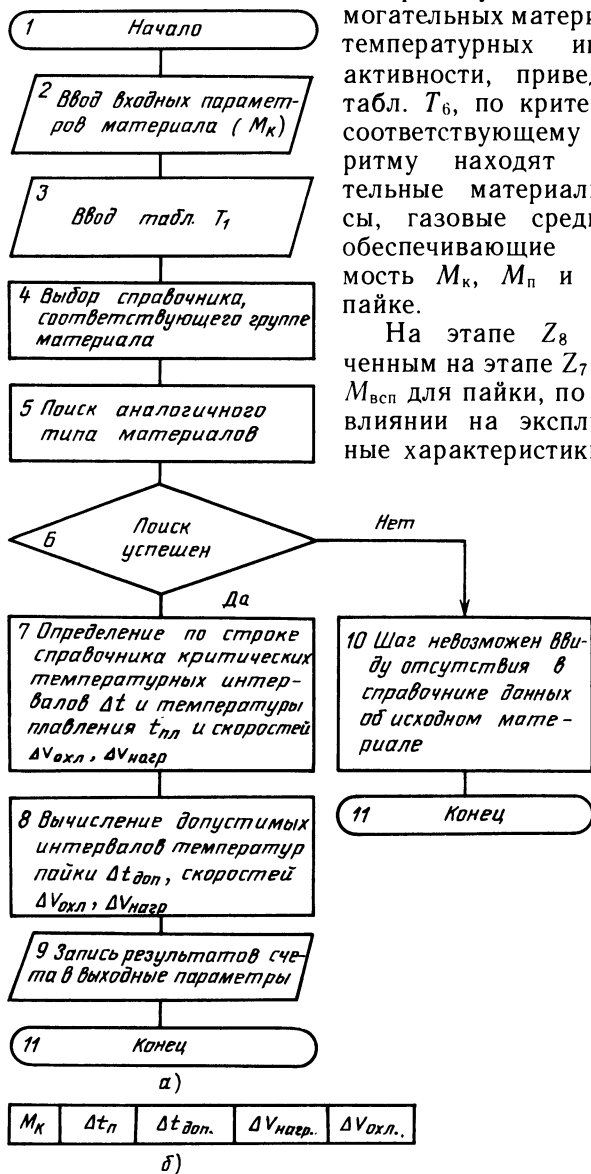


Рис. 57. Алгоритм определения температурных интервалов, в которых сохраняются свойства паяемого материала после воздействия на него нагрева при пайке:

а — решения; б — результаты счета

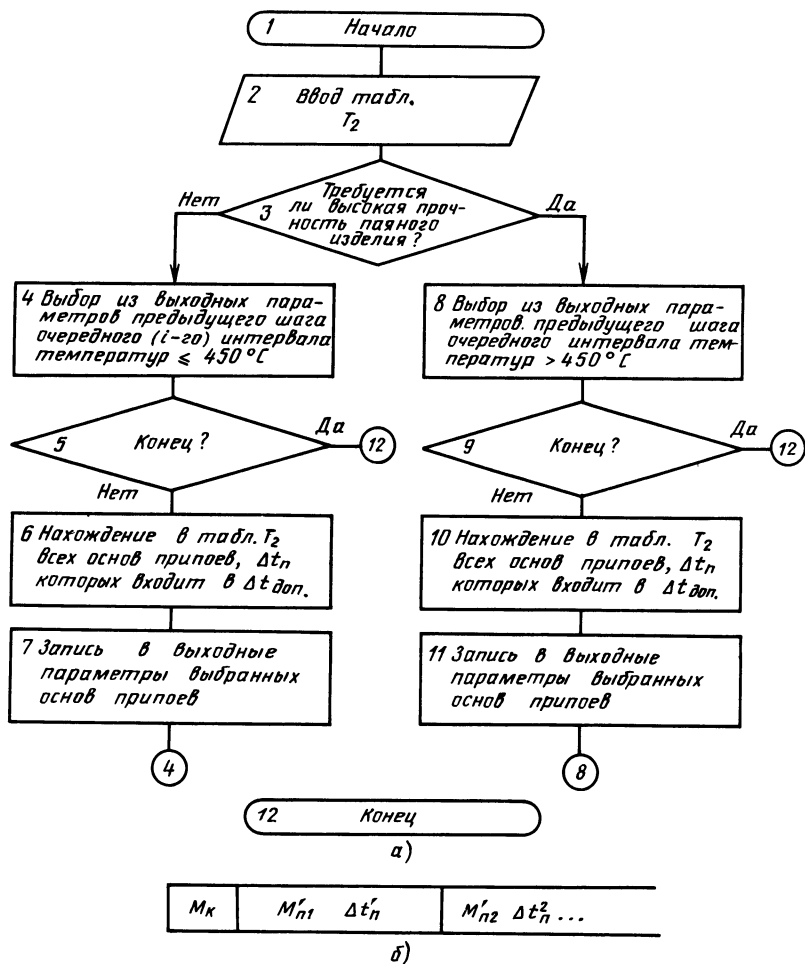


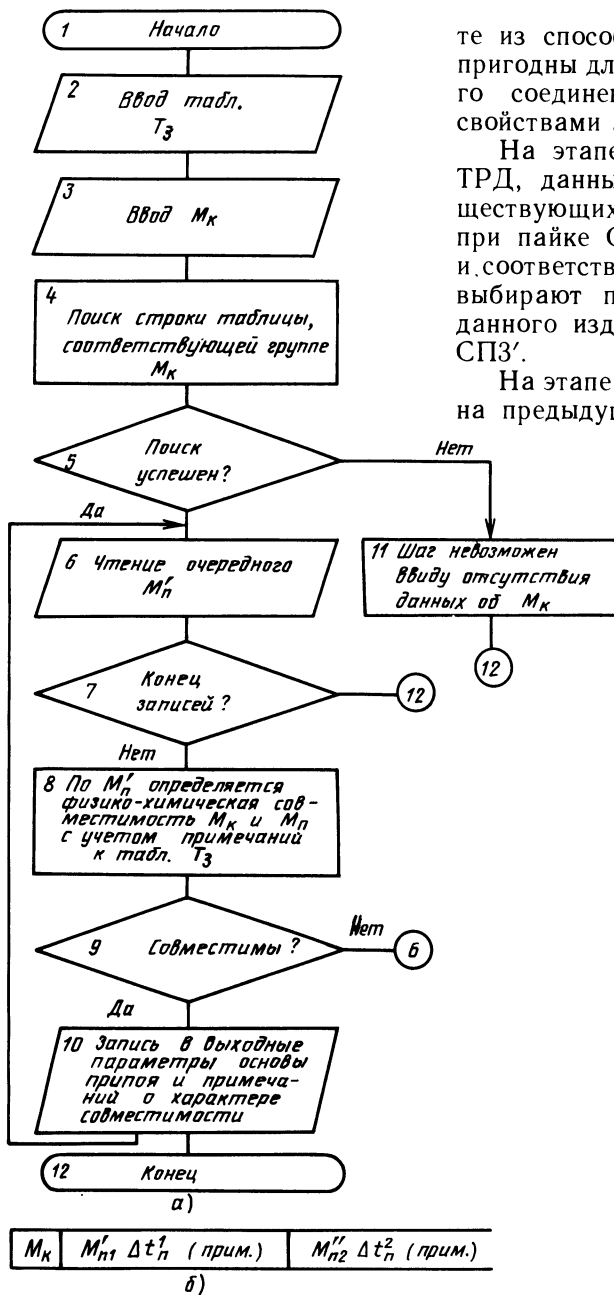
Рис. 58. Алгоритм выбора основ припоев  $M_n$  с температурой пайки в выбранных по алгоритму (см. рис. 57) температурных интервалах:

а — решение; б — выходные параметры

легирующих элементов припоев основы  $M''_n$ , по критерию  $K_8$  и соответствующему алгоритму находят окончательный состав припоев  $M'''_n$ , обеспечивающий требуемые эксплуатационные свойства припоев (паяных соединений).

На этапе  $Z_9$  проводят оптимизацию свойств паяных соединений по конструкционным факторам паяных соединений, термическому режиму пайки, термическому режиму давления, расходу припоя и вспомогательных материалов.

На этапе  $Z_{10}$  по данным об оптимальном термическом режиме пайки и способах пайки СП4 по осуществлению давления при пайке, по критерию  $K_{10}$  и соответствующему алгоритму выбирают



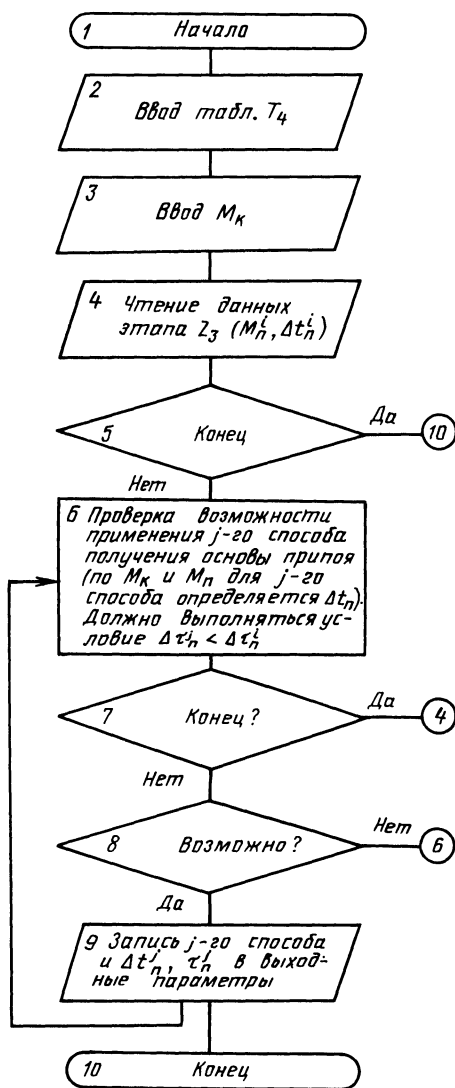
те из способов СП4', которые пригодны для получения паяного соединения с заданными свойствами Э.

На этапе  $Z_{11}$  по данным о ТРД, данным табл.  $T_{10}$  о существующих способах нагрева при пайке СПЗ, критерию  $K_{11}$  и соответствующему алгоритму выбирают пригодный для заданного изделия способ пайки СПЗ'.

На этапе  $Z_{12}$  по полученному на предыдущем этапе способу

Рис. 59. Алгоритм выбора основ припоев  $M_n$ , физико-химически совместимых с паяемым материалом:

а — решение; б — выходные параметры



а)

|       |  |                               |            |
|-------|--|-------------------------------|------------|
| $M_K$ | $M_{пг}''$ (прим.), СП1' $\Delta t_n'' \tau_n^j$ | СП1'' $\Delta t_n'' \tau_n^j$ | $M_{п2}''$ |
|-------|--|-------------------------------|------------|

б)

Рис. 60. Алгоритм выбора способа пайки СП1, пригодного для получения основы припоя:

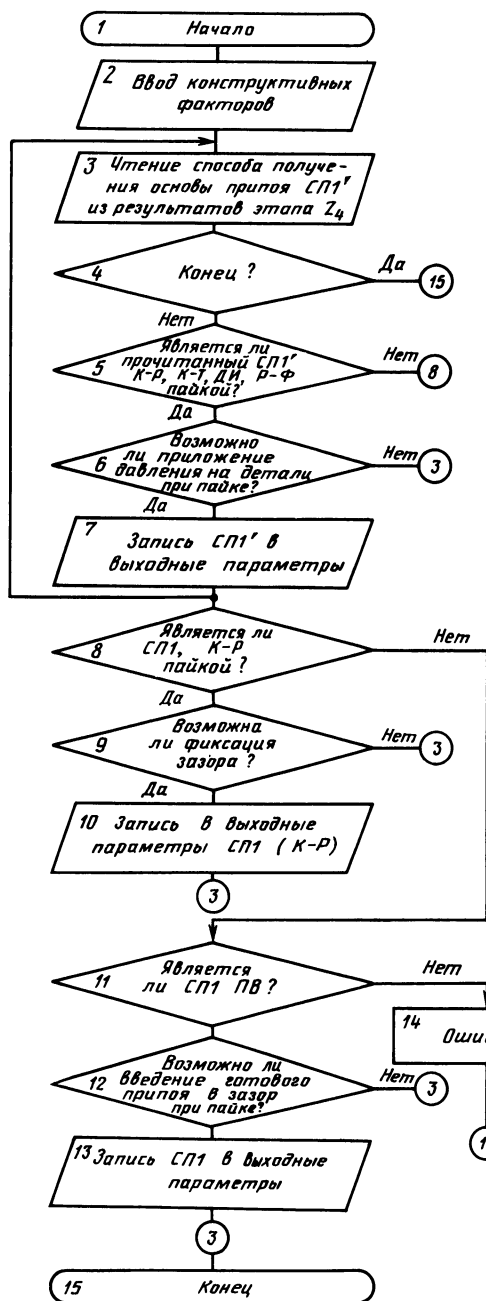
а — решение; б — выходные параметры

пайки СПЗ' с учетом конструктивных особенностей паяемого изделия  $K_{\Phi}^{пн}$  и допустимых скоростей нагрева и охлаждения  $M_K$  ( $v_n, v_{охл}$ ), найденным на этапе  $Z_1$ , по критерию  $K_{12}$  и соответствующему алгоритму находят допустимый термический цикл пайки изделия ТЦП.

На этапе  $Z_{13}$  по данным о термическом цикле пайки изделия ТЦП и данным таблицы о возможности контактного плавления  $M_K, M_{осн}$  и  $M_{п}$ , по критерию  $K_{13}$  и соответствующему алгоритму определяют состав материала оснастки для пайки.

На этапе  $Z_{14}$  по найденному на этапе  $Z_{12}$  ТЦП паяемого изделия и способу пайки СПЗ', найденному на этапе  $Z_{11}$ , а также по данным о существующем нагревательном оборудовании (табл.  $T_{13}$ ), по критерию  $K_{14}$  и соответствующему алгоритму выбирают необходимое оборудование Обд' для пайки изделия.

На этапе  $Z_{15}$  по выбранному на этапе  $Z_{14}$  нагревательному оборудованию и данным о средствах механизации, автоматизации, приведенным в табл.  $T_{14}$ , по критерию  $K_{15}$  и соответствующему алгоритму выбирают средства механизации, автоматизации, пригодные для пайки изделия при данном типе производства. Критерии выбора данных



графической модели проектирования технологии пайки описаны ниже.

**Критерий  $K_1$  (температурный).** Температурный интервал пайки должен находиться ниже температуры солидуса паяемого материала  $M_k$  и вне критических температурных интервалов пайки, скоростей нагрева и охлаждения, в которых происходит недопустимое ухудшение его структуры и свойств или распайка ранее выполненных паяных швов.

Рис. 61. Алгоритм выбора способа СП1, пригодного для получения основы припоя  $M_n$ , совместимого с  $K_{\phi}^n$  и  $K_{\phi}^c$ :

$a$  — решение;  $b$  — выходные параметры; К-Р — контактно-реактивная пайка; ДИ — диффузионная пайка; К-Т — контактно-твердогазовая пайка; Р-Ф — реактивно-флюсовая; ПВ — пайка готовым припоем с введением припоя в зазор при пайке

|       |   |                                   |         |
|-------|---|-----------------------------------|---------|
| $M_k$ | $M_n''$ (прим.), $СП1' \Delta t_n^i \epsilon_n^i$ | $СП1'' \Delta t_n'' \epsilon_n''$ | $M_n''$ |
|-------|---|-----------------------------------|---------|

б)

*Критерий  $K_2$  (выбора основы припоя).* Температура пайки припоем на выбранной основе должна находиться в интервалах, выбранных по критерию 1, а основа припоя должна обеспечивать эксплуатационные характеристики паяных соединений.

*Критерий  $K_3$  (физико-химической совместимости).* Среди основ припоев, удовлетворяющих критерию 2, для пайки пригодны те, которые физико-химически совместимы с паяемым материалом, т. е. образуют бездефектные паяные соединения.

*Критерий  $K_4$  (выбора способа пайки СП1).* Выбранный способ пайки СП1 должен обеспечивать возможность получения припоя  $M''_n$  и его реализацию при пайке изделия.

*Критерий  $K_5$  (совместимости способа СП1 с конструктивными факторами  $K^{\text{пс}}_{\text{ф}}$  и  $K^{\text{пн}}_{\text{ф}}$ ).* Выбранный способ пайки СП1 должен быть технологически совместимым с конструктивными факторами соединения ( $K^{\text{пс}}_{\text{ф}}$ ) и изделия ( $K^{\text{пн}}_{\text{ф}}$ ).

*Критерий  $K_6$  (выбора способа активирования).* Выбранный способ активирования паяемой поверхности  $M_k$  при пайке припоем  $M_n$  должен обеспечивать их физический контакт.

*Критерий  $K_7$  (выбора вспомогательного материала).* Вспомогательный материал для пайки должен быть пригоден для выполнения его функции — введения  $M_k$  и  $M_n$  в физический контакт или ограничения растекания припоя по паяемой поверхности и обеспечивать требуемую коррозионную стойкость паяных соединений в условиях производства, хранения и эксплуатации изделий.

*Критерий  $K_8$  (специального легирования основы припоя).* При условной совместимости основы припоя с паяемым материалом или необходимости обеспечения специальных свойств паяного соединения осуществляется специальное легирование припоя.

*Критерий  $K_9$  (выбора плана эксперимента при оптимизации свойств паяных соединений).* При оптимизации свойств паяных соединений по конструкционным и технологическим факторам необходимо пользоваться:

а) при числе факторов 3—4-полным факторным экспериментом;

б) при очень большом числе факторов для обеспечения минимального числа опытов — симплексным методом;

в) при количественных и качественных (смешанных) факторах — методом сложных совмещенных планов.

*Критерий  $K_{10}$  (выбора способа осуществления давления СП4 при пайке).* Способ СП4 должен обеспечивать режим давления (РД) и термический цикл давления (ТЦД), выбранный при оптимизации на этапе  $Z_9$ .

*Критерий  $K_{11}$  (выбора способа по источнику нагрева).* Способ пайки по источнику нагрева должен обеспечивать термический режим пайки соединений в соответствии с результатами его оптимизации на этапе  $Z_9$  графической модели проектирования технологии пайки.

*Критерий  $K_{12}$  (выбор термического цикла пайки изделия).* Вы-

бор термического цикла пайки изделия должен основываться на предварительном анализе конструкционных факторов паяемого изделия, теплофизических характеристиках паяемого материала, данных об оптимальных скоростях нагрева и охлаждения паяного соединения и основного материала, полученных на стандартных лабораторных образцах, и режиме пайки, выбранном на этапе  $Z_9$ .

*Критерий  $K_{13}$  (выбора материала оснастки).* Выбранный материал оснастки должен сохранять высокий предел упругости при температуре пайки и не вступать в физико-химическое взаимодействие с паяемым материалом, жидким припоем, вспомогательными материалами, компонентами и парами припоя.

*Критерий  $K_{14}$  (выбора нагревательного оборудования).* Нагревательное оборудование для пайки изделий должно быть совместимо с его конструктивными факторами ( $K_{\Phi}^{nc}$  и  $K_{\Phi}^{nn}$ ); выбранными при оптимизации режимами и циклом пайки, а также способами СП1, СП2, СП3 и СП4 и требуемой производительностью процесса.

*Критерий  $K_{15}$  (выбора средств механизации и автоматизации процесса пайки).* Средства механизации, автоматизации и роботизации процесса пайки должны воспроизводить операцию пайки в соответствии с выбранными термическим циклом, циклом давления и способами пайки.

Температурные области  $\Delta t_n$  ниже температуры плавления наиболее легкоплавкого из паяемых металлов расположены вне критических областей обоих материалов  $M'_k$  и  $M''_k$ .

Критерий  $K_3$  должен учитывать степень химического сродства  $M'_k$  и  $M''_k$  и интенсивность их массопереноса через жидкую фазу; при этом температура пайки должна находиться вне температурных интервалов недопустимой химической эрозии, роста химических прослоек, развития диффузионной пористости и охрупчивания  $M'_k$  и  $M''_k$  в контакте жидкого  $M_n$  с обоими материалами. При большой разнице коэффициентов линейного расширения необходимо избегать образования несогласованных спаев, применяя композиционные припои или высокопластичные припои, широкие зазоры. Критерий  $K_5$  должен быть дополнен требованием целесообразного расположения деталей при пайке с замкнутыми спаями: снаружи следует располагать деталь с большим коэффициентом линейного расширения. Критерий  $K_6$  должен быть дополнен требованием применимости СП2 одновременно для обоих паяемых материалов, а критерий  $K_7$  — условием, чтобы температура пайки одновременно находилась в температурном интервале активности  $M_{всп}$  для обоих паяемых материалов  $M'_k$  и  $M''_k$ . Критерии на остальных этапах дополняются аналогично с учетом свойств обоих паяемых материалов.

Для обеспечения эффективности производства паяных изделий при выборе припоев и вспомогательных материалов необходимо учитывать их стоимость и дефицитность, а также токсичность. Это

особенно важно в условиях массового и крупносерийного производства. При этом необходимо использовать заменители дорогостоящих и токсичных припоев и вспомогательных материалов, шире применять пайку в вакууме.

По мере развития теории, технологии и техники пайки и накопления опыта эксплуатации паяных изделий содержание критериев и таблиц фактического обеспечения должно пополняться, а классификация совершенствоваться.

При учете факторов, влияющих на качество паяемых изделий, в производстве и при ремонте необходимо соответственно учитывать также качество исходных материалов, условия хранения готовых изделий, соблюдение технологической дисциплины на производстве и степень износа изделий при эксплуатации (перед ремонтом).

### **3. О ПОЛНОТЕ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ**

Как видно из графической модели (см. рис. 58), для осуществления проектирования технологии пайки изделия необходима соответствующая входная информация о проектируемом изделии и информация для таблиц на каждом этапе проектирования.

Известно, что вообще понятие «информация» есть понятие такого же уровня, как и энергия или материя. Ее определяют в общем виде как сообщение, уменьшающее неопределенность в какой-либо области. Информация обладает свойствами хранения, передачи на расстояние и обработки. Целью обработки информации является снижение ее размерности для принятия решения.

К основным параметрам входной информации о проектируемом изделии и условиях производства относятся назначение изделия и его масса; марка паяемого материала и его состав, состояния и форма полуфабриката; конструкционные параметры изделия (его габаритные размеры, форма, толщина стенки и коэффициент разностенности, пространственное расположение и геометрическая форма паяных швов, их число, общая длина и площадь); конструкционные параметры паяных соединений: тип паяного соединения, форма паяемой поверхности и ее замкнутость, а также экономические требования, тип производства.

Такие конструкционные параметры, как сборочный и паяльный зазоры, задаются в определенных пределах и оптимизируются на этапе  $Z_9$  проектирования по значению требуемых характеристик соединения. То же относится к величине нахлестки, углу скоса, шероховатости паяемой поверхности.

Условный коэффициент сложности формы изделия может быть закодирован по степени сложности (простая — сложная) и по расположению изделия (в плоскости или трехмерном пространстве), например: 1) простая плоская; 2) простая простран-

венная; 3) сложная плоская; 4) сложная пространственная; 5) осесимметричная.

Важной входной информацией являются эксплуатационные характеристики изделия и следующие из них свойства соединений. К первым относятся условия работы изделия; ресурс его работы. Ко вторым — прочностные свойства соединений (кратковременная прочность, длительная прочность, вибрационная прочность, жаро- и хладостойкость, ударная вязкость и др.); физические свойства (геометричность, вакуум-плотность, электрическая проводимость и др.); химические свойства (коррозионная стойкость в различных климатических условиях и спецсредах); температура распайки.

Задаваемая информация в табличных данных и частичных критериях должна соответствовать современным научным представлениям и быть достаточно полной и достоверной. Кроме того, постоянно необходим ее систематический сбор и изучение ценности с целью пополнения существующих данных и в соответствии с возникающими новыми требованиями к паяемым изделиям. При отсутствии требуемых данных необходима постановка и проведение соответствующих исследований и внесение получаемых результатов в память ЭВМ. Организация соответствующих баз данных, содержащих эффективные информационные массивы и их рациональное размещение в памяти ЭВМ, может быть сделана на основе предложенной графической модели проектирования технологии пайки изделий [35].

Обоснование состава табличной информации по отдельным этапам проектирования было рассмотрено ранее [35, 58]. Следует отметить, что во многих случаях известные из литературы и производственного опыта данные хотя и включены в объем такой информации, но отличаются неполнотой. Например, в ряде данных о механических свойствах паяных соединений отсутствуют сведения о зазоре, нахлестке, шероховатости паяемого материала по месту пайки и особенностях его подготовки. Некоторые важные сведения о входной информации в литературе пока отсутствуют, и над их получением следует работать, учитывая, что эффективность проектирования технологии существенно зависит от полноты информации.

В настоящее время не хватает многих составляющих фактического обеспечения. Так, на первом этапе  $Z_1$  отсутствуют данные по температуре солидуса сталей, никелевых и титановых сплавов. Скудны данные по температурам вторичной рекристаллизации сталей и различных сплавов, применяемых в производстве; почти нет сведений о допустимых скоростях нагрева и охлаждения сталей и сплавов в интервалах критических температур, при которых не происходит ухудшение свойств основного материала, что особенно важно при выборе термического цикла пайки изделий.

Для этапа проектирования  $Z_2$  для многих припоев отсутствуют данные об их механических свойствах в литом состоянии.

Для этапа проектирования  $Z_3$  на с. 258 дана таблица по физико-химической совместимости паяемых материалов с основами некоторых групп припоев. Часть этих сведений получена из литературных данных: при отсутствии таковых авторы попытались прогнозировать паяемость [32—35] по двойным диаграммам состояния применительно к основам припоев и паяемых материалов, и, конечно, такой прогноз требует экспериментальной проверки, в том числе в производственных условиях.

При этом существенное значение имеют методики определения паяемости, механических свойств и других характеристик. В связи с этим важное значение приобретают соответствующие ГОСТы на проведение таких испытаний. Некоторые характеристики паяных соединений предусмотрены в форматах записи данных, разработанных во ВНИИНмаше.

На этапе  $Z_4$  необходимы конкретные данные о возможности пайки существующих сочетаний паяемый материал — припой в разнородных соединениях. Такие данные медленно накапливаются по мере проведения исследовательских и производственных испытаний и эксплуатации паяных изделий. Вместе с тем постановка соответствующих специальных исследовательских работ имела бы большое прикладное значение.

Для этапа  $Z_6$  необходимо расширение существующей информации о совместимости  $K_{\text{ф}}^{\text{пс}}$  и  $K_{\text{ф}}^{\text{пн}}$  со способами удаления оксидной пленки (СП2) при пайке различных групп материалов.

Для этапа проектирования  $Z_7$  в литературе имеются далеко не полные данные о температурных интервалах активности флюсов и их термической стойкости, а также температурных интервалах активности газовых сред по отношению к паяемым материалам и припоям.

Вопрос о легировании припоев с целью обеспечения механических свойств паяных соединений и некоторых их специальных свойств обсуждался в ряде работ и является полезной информацией; несомненно, что по мере развития пайки необходимо дополнять такую информацию конкретными данными (этап  $Z_8$ ). По мере разработки способов давления и нагрева при пайке сведения об их особенностях существенно дополняют таблицу на этапах  $Z_{10}$  и  $Z_4$ .

Совершенствование расчетов и получение экспериментальных данных по изделиям различной конструкции весьма актуальны для этапа  $Z_{12}$ .

Необходимо пополнение таблиц данных по маркам нагревательного оборудования и инструмента, технических и технологических характеристик (этап  $Z_{14}$ ), а на этапе  $Z_{15}$  — о средствах механизации и автоматизации процессов пайки.

Ручное проектирование по информационной модели в принципе возможно с использованием данных книги. При автоматизированном проектировании эти данные должны быть введены в память ЭВМ по соответствующим алгоритмам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акимов В. И., Лашко С. В.** Активированные газовые среды с сухим паром для пайки меди и латуни//Сварочное производство, 1985. № 6. С. 18—19.
2. **Витенко И. Н., Белецкая С. П., Шкляренко В. П.** Новые листовые, ленточные и фольговые припои системы  $\text{Cu-P}$ //Современные методы пайки. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. С. 46—48.
3. **Гришин В. Л., Лашко С. В.** Исследование физико-химических процессов и параметров диффузионной пайки ниобия титаном, цирконием и ванадием//Сварочное производство. 1986. № 5. С. 16.
4. **Долгов Ю. С., Сидохин Ю. Ф.** Вопросы формирования паяного шва. М.: Машиностроение, 1973. 134 с.
5. **Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А.** Конструирование и технология вакуумно-плотных паяных соединений. М.: Энергия, 1968. 156 с.
6. **Корж В. Н.** Регулирование характера горения горючей газовой смеси добавкой жидких углеводородных соединений//Автоматическая сварка. 1983. № 11. С. 65—70.
7. **Крафт В. В.** Пайка разнородных металлов с деформированием соединяемых элементов//Сварочное производство. 1980. № 10. С. 22—23.
8. **Кривошей А. В.** Инженерный расчет многокомпонентных эвтектических припоев//Современные методы пайки. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. С. 19—27.
9. **Ландау Л. Д., Лившиц Е. И.** Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 501 с.
10. **Лашко С. В.** Пайка// Итоги науки. Сер. «Сварка». М.: ВИНТИ АН СССР, 1984. Т. 16. С. 147—206.
11. **Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В.** Пайка металлов. М.: Машгиз, 1959. 441 с.
12. **Лашко Н. Ф., Лашко С. В.** Пайка металлов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1967. 366 с.
13. **Некоторые** особенности формирования паяных соединений при лучистом нагреве в условиях гравитации и невесомости/И. Е. Касил-Пилипенко, В. С. Дверняков, В. В. Пасичный и др.//Материалы и процессы космической техники. К.: Наукова думка, 1980. С. 62—68.
14. **Лашко Н. Ф., Лашко С. В.** Вопросы теории и технологии пайки. Саратов: СГУ, 1974. 246 с.
15. **Лашко Н. Ф., Лашко С. В.** Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия, 1977. 192 с.
16. **Лашко Н. Ф., Лашко С. В.** Пайка металлов. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1977. 326 с.
17. **Лашко С. В., Лашко Н. Ф.** Графическая модель проектирования технологии пайки изделия//Сварочное производство. 1984. № 3. С. 11—13.
18. **Лашко С. В., Лымарь П. И., Лашко Н. Ф.** Влияние добавок магния на свойства оловянно-свинцовых припоев//Сварочное производство. 1980. № 10. С. 27—28.
19. **Михайлюк А. С., Савинцев П. А.** Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наукова думка, 1972. 118 с.

20. **Сахно Г. А.** Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наукова думка, 1972. 123 с.
21. **Припой** с низкой упругостью пара, не содержащие драгоценных металлов/И. Н. Тугорская, С. П. Королева, Е. Т. Юшкина, Т. М. Захарова и др.//Сварочное производство. 1976. № 12. С. 39—41.
22. **Современная технология и способы пайки**//Бюллетень японского института металлов. 1982. Т. 21, № 8. С. 626—635.
23. **Справочник** по проектированию технологии пайки металлических изделий/С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко, И. Г. Нагапетян и др. М.: Металлургия, 1983. 279 с.
24. **Сторчай Е. И.** Флюсовая пайка алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1980. 123 с.
25. **Тарасов Н. М., Капустин С. С.** Применение импульсного высокочастотного электромагнитного поля для дозированного переноса капель электродного металла//Автоматическая сварка. 1982. № 8. С. 10—12.
26. **Шидов Х. Т.** Способ исследования процесса контактного плавления//Заводская лаборатория. 1978. Т. 44, № 12. С. 1504—1505.
27. **Фридман Л. Н., Шабалин В. Н., Радченко В. Г.** Влияние технологических параметров контактно-реактивной пайки на прочность соединения быстрорежущей стали с конструкционной//Сварочное производство. 1981. № 1. С. 15—16.
28. **Хайрулаев М. Р., Гусейнов А. Н., Савинцев П. А.** Исследование контактного плавления в системе медь — теллур//Физика и химия обработки материалов. 1981. № 2. С. 77—78.
29. **Чулков Е. И., Лашко С. В.** Определение параметров процесса к-р пайки и обеспечения технологичности паяемых конструкций//Сварочное производство. 1974. № 11. С. 21.
30. **Ямпольский В. М., Неровный В. И.** Упрочнение и восстановление рабочих лопаток газотурбинных двигателей дуговой пайкой в вакууме//Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана. 1981. № 363. С. 72—78.
31. **Apura Tagasu.** New brazing amorfen materials//J. Jap. Weld. Soc., 1984. V. 53. No 1. P. 712 — 713.
32. **Brownlie Russell.** Soft Soldering/Occup. Safety and Health. 1982. V. 12. No 11. P. 28—31.
33. **Cook W. F., Wight T. E., Hirschfield J. A.** Bernes brasing of aliminium with a non-corrosive fluor//Weld. Journ., 1978. V. 57. No 12. P. 23—28.
34. **Craf J., Lange H., Roschenblesk B.** Beitrag zur Praparation und Gefügeentweklung von Verbindungenaussilberloten und CrNi—Stahl//Pract. Metallogr., 1983. B. 20. No 6. P. 280—288.
35. **Franchlmone E.** La Soudura an masse developpe dans l'industria Electrog nique//Rev. Soudure, 1983. V. 39. No 3. P. 89—98.
36. **Frödrich M.** Löten von Aluminium Beider Montage von Fernmeldekabeler//Mitt. Inst. Pres-und Fernmelden, 1980. No 2. P. 18—21.
37. **Hochtemperaturlöten**, Stand und Entwicklungs-Tendenzen-Grundwarks-toffe, Rötgerectes konstruieren, verfahren, Prüfung und Anwenungs Baispiele//Schweiss. und Schneid, 1980. Bd. 32. No 8. S. 315—320.
38. **Datta a., Rabinkin A., Bose D.** Rapidly Soldidified Copper-phosrorus Brazing Foils//Weld. Journ., 1984. V. 63. No 110. P. 14—21.
39. **Dohezty P., Harroden D. R.** New forms of filler materials for diffusion brazing//Weld. Journ., 1977. V. 56. No 10. P. 37—39.
40. **Gärtner R., Müller W., Rubel W.,** Eigenschaften und Akwendung von Hartlöten auf Basis Kupfer-Phosphor//Stahlberatung, 1982. V. 9. No 3. P. 22—24.
41. **Geonre T., Naturajan R.** A new approach to the brazing of steel//Weld. Journ., 1979. V. 58. No 10. P. 39—40.
42. **Kawakatsu Ichiro.** Fundamental Technology Soft Soldering//Tech. Refrige-Pefrig. a. Air cond., 1984. V. 32. No 377. P. 23—29.
43. **Kawase H.** Hightemperature brazing of aluminium//Jap. Lightmetal Weld., 1975. V. 13. No 146. P. 65—75.
44. **Kimble Charles E.** Acoustic structures//Weld. Journ., 1980. V. 59. No 10. P. 26—30.
45. **Lane S. W., Brennans D. T.** Improved Solder Alloys Enchances Auto Radiators//Weld. Journ., 1984. V. 63. No 10. P. 41—45.

46. **Loten** in der Dampfphase//Electron Prod. und Prüftechn., 1984. No 3. S. 119—120.
47. **Lötenlagen** für die 80er Jahre//Production, 1981. No 45 S. 19—20.
48. **Lungscheider E., Iversen K.** Investigations on the capillary flow of brazing filler metals BNi<sub>5</sub>//Weld. Journ., 1979. No 10. P. 5319—5324.
49. **Moore B., Gaines G.** Use of nitrogen-metanol atmosphere in furnace brazing//Metal progress, 1981. V. 120. No 6. P. 28—29.
50. **Nitrogen** furnace atmosphere particulary favorable in commercial brazing of stainless steel tubing.//Ind. Heat, 1982. V. 49. No 8. P. 46—47.
51. **Peereboom R.** Vakuumlöten von Gusseisen//Gusseisen, 1985, Bd. 68. No 6. S. 144—150.
52. **Rationaler** mit Lötpasten//Betriebs Sarv., 1973. No 1. S. 34—35.
53. **Six B.** Informationüber die taggerechte Lötung von Kupferrehren// HLK, 1983. No 4. S. 268.
54. **Sweatman K. W.** Advances in soft soldering technology//Metals Australas, 1982. V. 14. No 8. P. 5—8.
55. **Timmins P. F.** The design and development of cadmium-free alloys for torch brazing//Can. Welder and Fabr., 1981. V. 72. No 11. P. 8—10.
56. **Walton A.** Developments in soldering technology//Electron. Prod., (Gr. Brit.), 1982. V. 11. No 8. P. 14—15.
57. **Witherall C. E., Ramos T.** Laser brazing//Weld. Journ., 1980. V. 59. No 10. S. 267—277.
58. **Whitman W., Nelson T. A., Solomon J.** Furnace brazing with nitrogen atmospheres//Weld. Journ., 1980. V. 59. No 10. P. 21—25.
59. **Yeh J. T. C.** Mechanical properties of in-based eutectic alloy colders used in Josephson packaging//Cryogenics, 1984. V. 24. No 5. P. 261—265.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Адгезия 46  
Адсорбция 46  
Алгоритмы технологии пайки 359—363  
Алюминий 260

### Б

Борирование 193

### В

Ванны электронагревательные 40  
Включения флюсовые 238  
Влияние температуры пайки на прочность и пористость соединений 334, 352

### Г

Газовые среды. См. *среды газовые*  
Горелки 42

### Д

Давление при пайке 75  
Дефекты соединений 237  
Дозирование флюса 171  
Дождевание 31

### И

Излучение 197  
Интервал активности температурный 23

### К

Киркендала пористость 309  
— эффект 73  
Когезия 46  
Конвекция 197  
Контейнеры 181—183, 202, 230  
Корольки припоя 238

372

Коэффициент сложности формы изделия 366, 367  
Критерий выбора данных 362—365  
— качества 45, 356  
— эффективности 356

### Л

Лак защитный 292  
Лужение абразивное 174, 175, 177, 270  
— титана 346

### М

Материалы вспомогательные 21—23  
Модель проектирования технологии пайки 355

### Н

Непропаи 240  
Нернста уравнение 166  
Неспаи 240

### О

Обезжиривание 30, 287, 293  
Окувание 30  
Очистка гидropескоструйная 29  
— жидкостно-абразивная 29  
— металлическим песком 30  
— механическая 29, 331  
— ручная 29  
— химическая 311

### П

Пайка 7  
— абразивная 174  
— абразивно-кавитационная 177  
— алюминия и его сплавов во флюсовых ваннах 206, 278  
— — — — готовым припоем 273  
— — — — твердого газа вакуумная в парах металлов 281  
— бесфлюсовая 269, 279, 283, 285, 296  
— бронзы (алюминиевой, бериллиевой,

оловянной, хромистой) 293, 294  
 — в активных (восстановительных) газовых средах 185  
 — — вакууме 179  
 — — газовых средах 177  
 — — инертных газах 184  
 — — парах активных металлов 182  
 — — печах 275  
 — высокотемпературная 11, 272, 279, 296, 297, 316  
 — диффузионная 70—75  
 — капиллярная 10, 333  
 — компрессионная 76  
 — контактно-реактивная 52, 328, 339, 350  
 — — дозирование количества жидкой фазы 64  
 — — пластичность швов 61  
 — — расположение материалов 62  
 — — режимы 57  
 — контактно-реактивная прессовая 286  
 — некапиллярная 10  
 — низкотемпературная 11, 207, 225, 270  
 — — алюминия 263, 267, 268  
 — — по покрытиям 270  
 — никелевых сплавов 339  
 — погружением в расплавленные соли и флюсы 203, 213  
 — под давлением 75—88  
 — реактивно-флюсовая 65  
 — титановых сплавов 346, 350  
 Паяемость 242  
 Паяльник 43, 199, 200  
 Параметры входной информации 366  
 Пассивирование поверхности 31  
 Перегрев металлов 26, 306  
 Пережог в металлах 26  
 Переход фазовый первого рода 8  
 — — второго рода 8  
 — — бездиффузионный 8  
 — — диффузионный 8  
 Плавление контактно-реактивное: особенности 54, 59  
 режимы 57  
 Полигонизация 25  
 Пористость диффузионная 78  
 — паяных швов 306  
 Поры усадочные 237  
 Припой:  
 — алюминиевые 15, 102, 261, 349  
 — ванадиевые 15  
 — виды 10, 12  
 — галлиевые 79  
 — готовые 13, 46, 79  
 — классификация 13  
 — для пайки коррозионно-стойких сталей 321—325, 330  
 — — титана 348—350  
 — низкотемпературной пайки алюми-

ния и его сплавов 99, 266  
 железные 15  
 золотые 15, 130, 131  
 кадмиевые 15, 95, 96  
 кобальтовые 15  
 композиционные 68, 69  
 контактно-реактивные 10, 14  
 контактные твердогазовые 10, 15  
 классификация по величине температурного интервала их плавления 15  
 — — способности к самофлюсованию 16  
 — — способу изготовления 16  
 — — — кольца 17  
 — — — лента 16  
 — — — лист 16, 17  
 — — — пасты 18, 80  
 — — — пластины 17  
 — — — порошки 17, 18  
 — — — проволока 16  
 — — — сетка 17  
 — — — фольга 16, 17, 19  
 латунные, содержащие кремний 123  
 магниевые 15, 288  
 медные 15, 116, 118, 120, 126, 127  
 молибденовые 15  
 никелевые 15, 338  
 ниобиевые 15  
 образующиеся при пайке 14  
 оловянно-свинцовые 15, 84, 209  
 оловянные 15, 84  
 платиновые 15  
 реактивно-флюсовые 10, 15  
 с висмутом 81  
 — индием 82  
 палладием 133—135, 330  
 свинцовые 92, 93  
 серебряные 16, 104, 105, 107, 116, 348  
 титановые 15  
 цинковые 15, 97  
 циркониевые 15

Промывка 32  
 Процесс технологический 9  
 — — пайки 9  
 Прочность стыковых соединений 328

## Р

Раковина 238  
 Растворы для травления 311  
 Растрескивание медных сплавов 301  
 Рекристаллизация первичная 25  
 — собирательная 26

## С

Свойства соединений из никелевых сплавов 341

— — стали и железа 314, 317, 319, 326, 327

Смачивание 242, 244, 302

Смеси экзотермические для нагрева при пайке 213

Совместимость конструкционных материалов с основой припоев 258, 259

Соединения деталей в угол и втавр 35

— — внахлестку, встык и вскос 33

— — соприкасающихся 36

Сопrotивление срезу соединений из алюминиевых сплавов:

паянных в парах металлов 283

после контактно-реактивной пайки в вакууме 286

— — — — стали 12Х18Н9Т 327

Способы пайки 9

Среды газовые 21, 23, 188, 194

Стойкость оксидов 138

Стоп-материалы 23

Сушка 32

## Т

Температура распайки 23

— рекристаллизации 25

— смачивания 321

Теплопроводность 197

Теплота образования сплавов 138

Титан 343, 344

Травление никелевых сплавов 336

— сталей 312

— ультразвуковое 31

— химическое 31

Трещины кристаллизационные 238

— релаксационные 240

## У

Установка индукционная 41, 42

— лазерная 224

Установки электротермические:

ванны 40

— с внешним обогревом 40

— — внутренним обогревом 40, 41

печи сопротивления 37, 38

— — непрерывного действия (карусельные, конвейерные, толкательные) 38, 39

— — периодического действия (камерные, колпаковые, шахтные) 38

## Ф

Факторы конструкционные 33

— технические 45

— технологии пайки 355

— технологические 44

Фика закон 71, 72

Флюсы 21, 22

— активность 21, 167, 287

— для высокотемпературной пайки 22

— — — — алюминия и его сплавов 163, 165, 274

— — — — меди, ее сплавов и сталей 154, 157, 158

— — — — низкотемпературной пайки 22

— — — — алюминия и его сплавов 151

— — — — меди, ее сплавов и сталей 141, 148, 149

— — пайко-сварки чугуна 333

— дозирование и нанесение 171

— защитного действия 22

— канифольные 142

— консервирующие 292, 293

— растворо-химического действия 22

— химического действия 22

— электрохимического действия 22

## Х

Хрупкость водородная 301

## Э

Эвтектика 53

Электроды 217, 218

Электролиты 215

Электроды 37, 181

Энергия активации 7

Эрозия химическая локальная 239

— — межзеренная и межблочная 239

— — общая 239

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |            |
|---|------------|
| Предисловие . . . . .   | 3          |
| Введение . . . . .  | 5          |
| <b>Глава 1. Основные понятия . . . . .</b>  | <b>7</b>   |
| 1. Пайка, ее физико-химические особенности, технология и технологический процесс . . . . .      | 7          |
| 2. Технологическая классификация способов пайки . . . . .                                       | 10         |
| 3. Технологические и вспомогательные материалы при пайке . . . . .                              | 12         |
| 4. Температурные и временные характеристики технологии пайки изделия . . . . .                  | 23         |
| 5. Операции технологического процесса пайки изделия . . . . .                                   | 28         |
| 6. Конструкционные факторы паяемых соединений и изделий . . . . .                               | 33         |
| 7. Технологическое оснащение пайки . . . . .  | 37         |
| 8. Качество паяных изделий и эффективность их производства . . . . .                            | 43         |
| <b>Глава 2. Способы пайки по формированию паяного шва . . . . .</b>                             | <b>46</b>  |
| 1. Пайка готовым припоем . . . . .  | 46         |
| 2. Контактно-реактивная пайка . . . . .   | 52         |
| 3. Реактивно-флюсовая пайка . . . . .   | 65         |
| 4. Композиционная пайка . . . . .   | 68         |
| 5. Диффузионная пайка . . . . .   | 70         |
| 6. Пайка под давлением . . . . .  | 75         |
| <b>Глава 3. Готовые припои для пайки . . . . .</b>  | <b>79</b>  |
| 1. Особолегкоплавкие и легкоплавкие припои . . . . .  | 79         |
| 2. Средне- и высокоплавкие припои . . . . .   | 102        |
| <b>Глава 4. Способы пайки по удалению оксидной пленки . . . . .</b>                             | <b>137</b> |
| 1. Флюсовая пайка . . . . .   | 140        |
| 2. Бесфлюсовая пайка . . . . .  | 173        |
| <b>Глава 5. Способы пайки по источнику нагрева . . . . .</b>                                    | <b>197</b> |
| 1. Пайка паяльником . . . . .   | 199        |
| 2. Пайка нагревательными штампами, блоками и нагревательными матами . . . . .                   | 201        |
| 3. Пайка погружением . . . . .  | 202        |
| 4. Пайка с нагревом газовым теплоносителем . . . . .  | 211        |
| 5. Экзотермическая пайка . . . . .  | 212        |
| 6. Электролитная пайка . . . . .  | 213        |
| 7. Пайка электросопротивлением . . . . .  | 216        |
| 8. Конденсационная пайка . . . . .  | 219        |
| 9. Пайка световым лучом . . . . .   | 221        |
| 10. Пайка инфракрасными лучами . . . . .  | 222        |
| 11. Пайка электронным лучом . . . . .   | 223        |
| 12. Пайка лазером . . . . .   | 223        |
| 13. Газопламенная пайка . . . . .   | 226        |
| 14. Пайка в печах . . . . .   | 228        |
| 15. Индукционная пайка . . . . .  | 232        |
| 16. Дуговая пайка . . . . .   | 235        |
| <b>Глава 6. Физико-химическая совместимость паяемого материала и припоя при пайке . . . . .</b> | <b>237</b> |
| 1. Дефекты паяных соединений и их образование . . . . .   | 237        |
| 2. Смачивание паяемого металла припоем и растекание по нему . . . . .                           | 242        |
| 3. Затекание припоя в зазор . . . . .   | 245        |
|   | 375        |

|  |            |
|--|------------|
| 4. Химическая эрозия паяемого материала при пайке . . . . .  | 250        |
| 5. Рост прослоек химических соединений в паяных швах . . . . .   | 252        |
| 6. Охрупчивание паяемого металла в контакте с жидким припоем . . . . .   | 254        |
| 7. Температура распайки . . . . .  | 255        |
| 8. Физико-химическая совместимость паяемого металла с припоем . . . . .  | 257        |
| <b>Глава 7. Пайка легких металлов и сплавов . . . . .</b>  | <b>260</b> |
| 1. Алюминий и его сплавы . . . . .   | 260        |
| 2. Магний и его сплавы . . . . .   | 287        |
| <b>Глава 8. Пайка меди и ее сплавов . . . . .</b>  | <b>291</b> |
| <b>Глава 9. Пайка сталей и чугуна . . . . .</b>  | <b>311</b> |
| 1. Конструкционные стали . . . . .   | 311        |
| 2. Коррозионно-стойкие стали . . . . .   | 318        |
| 3. Чугун . . . . .   | 331        |
| <b>Глава 10. Пайка никеля и его сплавов . . . . .</b>  | <b>336</b> |
| <b>Глава 11. Пайка титана и его сплавов . . . . .</b>  | <b>343</b> |
| <b>Глава 12. Основы проектирования технологии пайки металлических изделий . . . . .</b>                        | <b>354</b> |
| 1. Значение проектирования технологии пайки изделий при подготовке производства . . . . .                      | 354        |
| 2. Графическая модель проектирования технологии пайки изделий из однородных и разнородных материалов . . . . . | 355        |
| 3. О полноте информации при проектировании технологии пайки . . . . .  | 366        |
| Список литературы . . . . .  | 369        |
| Предметный указатель . . . . .   | 372        |

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

**Софья Васильевна ЛАШКО,  
Николай Федорович ЛАШКО**

## **ПАЙКА МЕТАЛЛОВ**

Редактор *Н. Г. Сальникова*

Художественный редактор *И. К. Капралова*

Технические редакторы *Е. П. Смирнова* и *Л. П. Гордеева*

Корректоры *Т. В. Багдасарян, И. М. Борейша, Л. Л. Георгиевская*

ИБ № 5454

Сдано в набор 27.06.87. Подписано в печать 15.06.88. Т-05267. Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная № 1. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,5.  
Усл. кр.-отт. 23,5. Уч.-изд. л. 27,45. Тираж 33 000 экз. Заказ 637. Цена 1 р. 80 к.  
Заказ 585.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва,  
Стромынский пер., 4

Диапозитивы изготовлены в Ленинградской типографии № 2 головном предприятии  
ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»  
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам  
издательств, полиграфии и книжной торговли 198052, г. Ленинград, Л-52, Измай-  
ловский проспект, 29

Отпечатано с диапозитивов в Ленинградской типографии № 6 ордена Трудового Красного  
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой  
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10

