

**РУКОВОДСТВО  
ПО ПАЙКЕ  
МЕТАЛЛОВ**

ОБОРОНГИЗ 1960

# BRAZING MANUAL

Prepared by  
Committee on Brazing and Soldering  
AMERICAN WELDING SOCIETY



REINHOLD PUBLISHING CORPORATION  
NEW YORK  
CHAPMAN & HALL, LTD., LONDON  
1955

# РУКОВОДСТВО ПО ПАЙКЕ МЕТАЛЛОВ

(ПОДГОТОВЛЕНО КОМИТЕТОМ ПАЙКИ  
АМЕРИКАНСКОГО ОБЩЕСТВА СВАРЩИКОВ)

Перевод с английского *А. Т. Лысенко*

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ  
канд. техн. наук *С. Н. ЛОЦМАНОВА*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ОБОРОНГИЗ

---

Москва 1960

---

---

В предлагаемом руководстве отражен опыт промышленности Соединенных Штатов Америки в области пайки металлов.

В книге описана технология пайки различных металлов и сплавов, приведены данные о различных припоях, паяльных флюсах и контролируемых атмосферах (средах), указаны области их применения, а также способы очистки и сборки деталей, соединяемых пайкой. Освещены вопросы конструирования соединений под пайку, методы контроля паяных соединений и правила техники безопасности.

Книга представляет значительный интерес для технологов и конструкторов, а также может быть полезна для студентов высших технических учебных заведений.

---

---

Редактор **О. Н. Буракова**

---

Зав. редакцией инж. *С. Д. Красильников*

Состав Комитета пайки Американского общества сварщиков

А. Н. Кюглер, Председатель . . . . .	Air Reduction Sales Co.
Р. М. Вилсон, Вицепредседатель . . . . .	The International Nickel Co., Inc.
С. А. Гринберг, Секретарь . . . . .	American Welding Society
Л. Е. Абботт . . . . .	Bell Telephone Laboratories, Inc.
Дж. Х. Адамс . . . . .	Stanley G. Flagg and Company Inc.
Р. Е. Боллентин . . . . .	Westinghouse Electric Corp.
Дж. О. Барлон . . . . .	Collins Radio Co.
О. Т. Барнетт . . . . .	Armour Research Foundation of Illinois Institute of Technology
Д. М. Борсина . . . . .	Lead Industries Association
Военно-морское министерство . . . . .	Navy Department
Дж. Г. Крайст . . . . .	Westinghouse Electric Corp.
Р. М. Эванс . . . . .	Battelle Memorial Institute
Б. А. Хэкитт (Дж. Г. Лэндриган, Заместитель) . . . . .	United Wire and Supply Co.
Л. Х. Хаугорн . . . . .	Revere Copper and Brass Incorporated
С. Л. Хиберт . . . . .	Consolidated Vultee Aircraft
Г. О. Хогланд . . . . .	Aluminum Co. of America
Ф. В. Хасси . . . . .	Francford Arsenal
(Дж. К. Макдауэлл, Заместитель) . . . . .	Rock Island Arsenal

Дж. Императи . . . . .	American Brass Co.
Х. В. Инскип . . . . .	Linde Air Products Co.
С. Е. Джонсон . . . . .	Scaife Co.
П. Клейн . . . . .	The Dow Chemical Co.
Р. М. Макинтош (Р. Дж. Некервис, Заместитель) . . . . .	Tin Research Institute, Inc.
Р. О. Макинтош . . . . .	Westinghouse Electric Corp.
Р. Л. Пизли . . . . .	Wall Colmonoy Corp.
М. А. Пугаз . . . . .	General Electric Co.
А. М. Сетапен (С. Х. Чэтфилд, Заместитель) . . . . .	Handy and Harman
В. Дж. Ван Наттен . . . . .	General Electric Co.
Дж. Дж. Врилэнд . . . . .	Chase Brass and Copper Co.
В. Дж. Вагниц (А. С. Кросс, Заместитель) . . . . .	American Platinum Works
Р. Д. Вассерман (В. Кривол, Заместитель) . . . . .	Eutectic Welding Alloys Corp.
К. М. Вейгерт . . . . .	Goldsmith Bros. Smelting and Refining Co.
Дж. Р. Вирт . . . . .	General Motors Corp.

---

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Пайка металлов широко применяется в таких технически развитых странах, как Советский Союз, Соединенные Штаты Америки, Англия, Чехословакия, Германия и др.

Как один из наиболее прогрессивных способов соединения металлов, пайка находит применение в настоящее время почти во всех областях техники. Вследствие высокой прочности и эксплуатационной надежности паяных соединений пайка успешно применяется при изготовлении таких ответственных изделий, как пустотелые лопасти воздушных винтов самолетов, охлаждаемые лопадки газовых турбин, сотовые конструкции из нержавеющей стали, теплообменники для атомных реакторов и др.

Однако в технической литературе технология пайки металлов освещена пока еще недостаточно полно. Поэтому предлагаемое читателям Руководство по пайке металлов, составленное специалистами по пайке, несомненно представит практический интерес для инженерно-технического персонала заводов, ОКБ и научных работников, использующих в своей практической работе пайку металлов, а также для студентов соответствующих специальностей.

В книге подробно описаны процессы пайки высокопрочными припоями и обобщен производственный опыт применения пайки во многих отраслях техники Соединенных Штатов Америки. Рассмотрены различные способы пайки и применяющееся оборудование; специфические свойства паяемых металлов и сплавов; припои, паяльные флюсы и атмосферы (среды), в которых производится пайка; методы конструирования соединений деталей и подготовки деталей к пайке; технологические процессы пайки и контроль качества паяных соединений. Описаны особенности процессов пайки таких распространенных металлов и их сплавов, как алюминий, медь, магний, никель, конструкционные и нержавеющей стали, чугун и жаропрочные сплавы. Приведены краткие рекомендации по пайке драгоценных, тугоплавких и некоторых редких металлов. В конце книги приведены основные правила техники безопасности при пайке металлов.

По своему содержанию и изложению материала книга доступна широкому кругу читателей и содержит конкретные полезные рекомендации для производственников, что выгодно отличает ее от уже

известной переводной литературы, посвященной вопросам пайки металлов.

Наряду с положительными качествами книга не лишена и недостатков. К недостаткам следует отнести, например, то, что в главе о флюсах не указаны составы описываемых флюсов, что снижает ценность этой главы. Затронутые вопросы рассмотрены в отдельных главах недостаточно полно. В частности, при описании особенностей пайки алюминия и его сплавов рекомендуется применять лишь припой с температурой плавления выше  $570^{\circ}$ , в то время как известны припои с меньшей температурой плавления, например, в Советском Союзе уже давно применяются достаточно коррозионностойкие алюминиевые припои с температурой плавления  $525^{\circ}$ .

*С. Н. Лоцманов*



---

## ВВЕДЕНИЕ

Общепринятое понимание основной терминологии в любой области знаний является необходимым условием для ясности изложения мысли и выражения и для творческого обсуждения построения нового термина. В применении терминов сварка, пайка твердыми припоями и пайка мягкими припоями всегда существовала некоторая путаница. Чтобы внести некоторую ясность в смысл этих терминов, Американское общество сварщиков (AWS — American Welding Society) принимает слово *сварка* как общий термин для обозначения процесса соединения металлов при помощи нагрева. Такое определение позволяет рассматривать дуговую сварку и пайку твердыми припоями как части процесса сварки в его общем смысле. Следует помнить, что слово *сварка* с прилагательными или приставкой, например дуговая, газовая, атомно-водородная и др., уже теряет свое общее значение, а означает один из процессов или группу процессов сварки.

Процессы сварки можно классифицировать различными способами. Правильная классификация облегчает понимание сущности процессов и способствует успешному проведению сварки.

В основной схеме сварочных процессов Американского общества сварщиков указаны только те процессы сварки, которые имеют промышленное значение. В «Справочник сварщика» (издание третье) включены стандартные сварочные термины и приведены их определения и пояснения, что очень способствовало уточнению сварочной терминологии.

В настоящем Руководстве рассмотрены только процессы пайки твердыми припоями. Американское общество сварщиков определяет пайку твердыми припоями как «группу сварочных процессов, при которых соединение осуществляется путем нагрева деталей до температуры выше 427° и путем применения припоя из цветного металла с более низкой температурой плавления, чем температура плавления соединяемых металлов. В процессе пайки припой заполняет узкие зазоры между соединяемыми поверхностями под действием сил капиллярного притяжения». Технология процесса пайки характеризуется тремя особенностями: 1) сращивание или соединение собранного узла из двух или более деталей в одно целое, осуществляемое путем нагрева всего узла или соответствующего участка подлежащих пайке деталей до температуры 427° или выше; 2) при-

менение припоя из цветных металлов с точкой плавления ниже, чем у основного металла; 3) обязательное смачивание припоем всей подлежащей пайке поверхности основного металла. Последний фактор является основной особенностью процесса пайки, отличающей его от других сварочных процессов.

Чтобы получить хорошее соединение при пайке любым из различных способов, описанных в настоящем Руководстве, должны быть выполнены следующие операции:

1. *Предварительная очистка.* Соединяемые поверхности должны быть чистыми, чтобы обеспечить хорошее качество пайки.

2. *Флюсование.* Флюс или защитная атмосфера должны предохранять соединяемые поверхности от окисления, или растворять, или восстанавливать любые образовавшиеся на них окислы.

3. *Фиксирование.* Правильное положение соединяемых деталей относительно друг друга, которое не должно изменяться ни во время процесса нагрева, ни во время охлаждения спаянного соединения. При этом можно применять или не применять различные приспособления в зависимости от конструкции соединяемых деталей, относительного зазора между ними и способа пайки.

4. *Нагрев.* Необходимо выбирать такой процесс пайки, который обеспечит надлежащую температуру пайки, распределение тепла, скорость нагрева и охлаждения в зависимости от свойств основного металла, а также требований, предъявляемых к окончательно изготовленному изделию.

5. *Обработка после пайки.* В случае применения защитной атмосферы или флюсов, не дающих твердых остатков, очистки паяных швов после пайки не требуется. Если применяются флюсы, вызывающие коррозию, то их необходимо тщательно удалять.

В настоящем Руководстве главное внимание уделено практической стороне вопроса, теоретический же анализ процессов пайки отсутствует. Комитет надеется, что предлагаемое Руководство сможет стать основой для освоения процессов пайки в промышленности.

В Руководстве приведено описание промышленных способов соединения пайкой только металла с металлом. Особенности процессов пайки в ювелирной технике, а также пайки неметаллических материалов не рассматриваются.

---

---

## ГЛАВА I

### СПОСОБЫ ПАЙКИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

#### СПОСОБЫ ПАЙКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Основная схема сварочных процессов (фиг. 1) включает в себя восемь дополнительных способов соединения, называемых пайкой:

- 1) пайка горелкой,
- 2) пайка независимой угольной дугой,
- 3) пайка в печи,
- 4) индукционная пайка,
- 5) пайка сопротивлением,
- 6) пайка погружением,
- 7) пайка нагретым блоком,
- 8) пайка путем заливки припоя.

При любом из указанных способов пайки в качестве припоя применяется сплав из цветных металлов с температурой плавления выше  $425^{\circ}$ , но ниже, чем температура плавления основного металла. В процессе пайки расплавленный припой проникает в соединение под действием сил капиллярного притяжения.

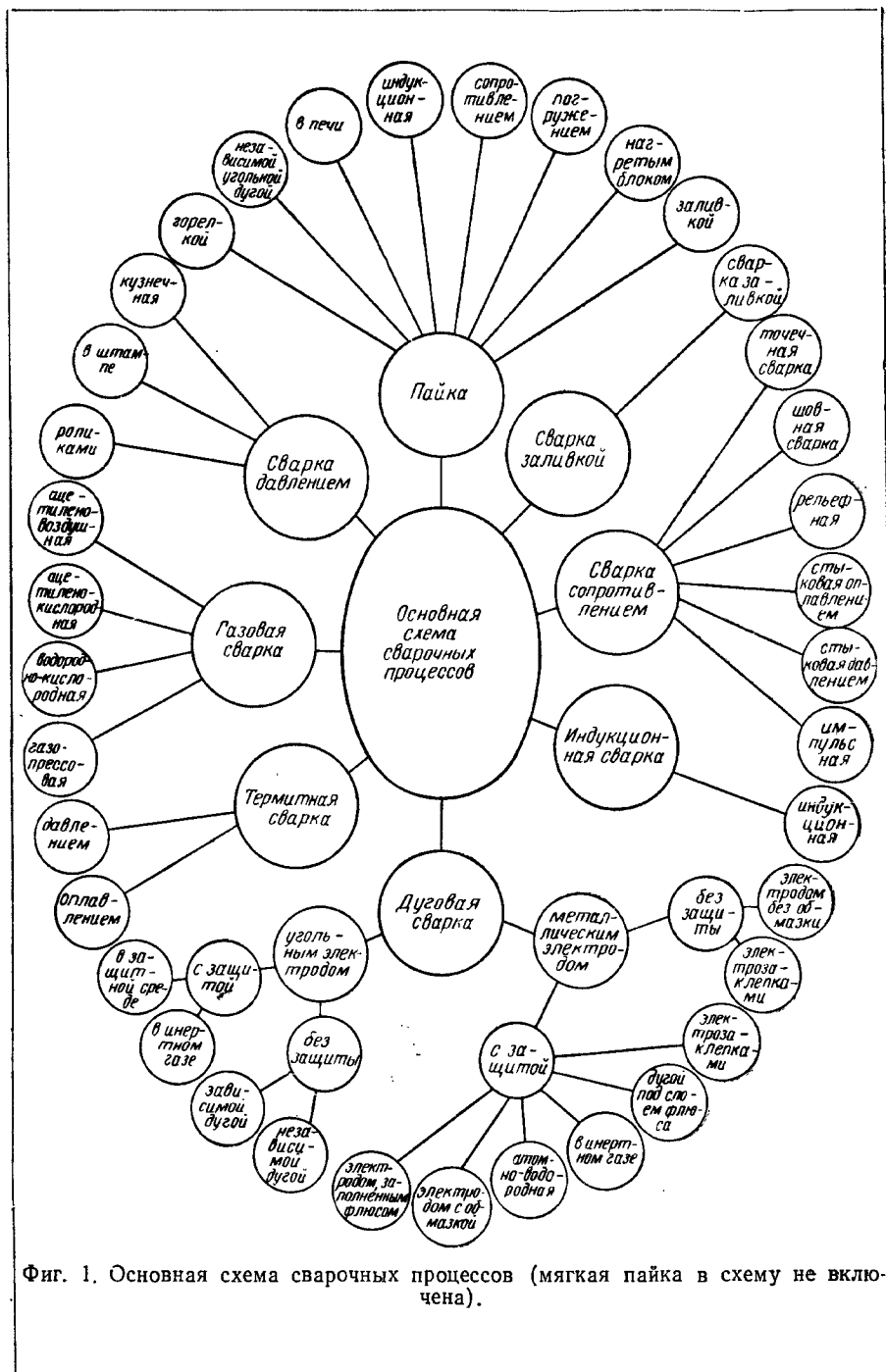
В гл. 3 рассмотрены характеристики обычно применяемых припоев и процессы пайки различных металлов.

#### Пайка горелкой

Как показывает само название, пайка осуществляется при помощи нагрева соединяемых деталей и припоя газовой горелкой или паяльной лампой. В зависимости от температуры и количества необходимого тепла горючие газы (ацетилен, пропан, городской газ и др.) могут гореть в смеси с воздухом, со сжатым воздухом или кислородом.

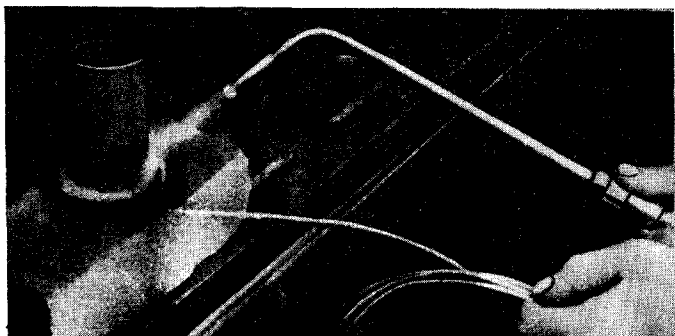
Припой можно наносить на соединяемые детали перед пайкой в форме кольца, шайбы, полоски, а также в виде порошка или присаживать в процессе пайки путем ручной подачи прутка или проволоки. В любом случае надлежащая очистка деталей и флюсование являются существенными.

Для ручной пайки применяется горелка с однопламенным или многопламенным наконечником (фиг. 2). Ручная пайка горелкой обычно применяется при соединении деталей различной массы.



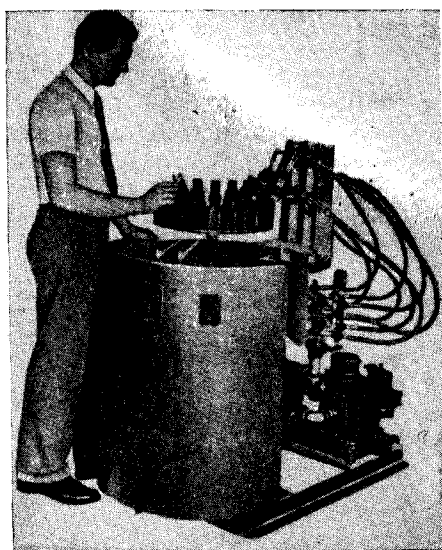
Фиг. 1. Основная схема сварочных процессов (мягкая пайка в схему не включена).

Механизированная пайка горелкой может иметь место в том случае, когда по условиям производства требуется применение нескольких горелок, оборудованных однопламенными или многопла-

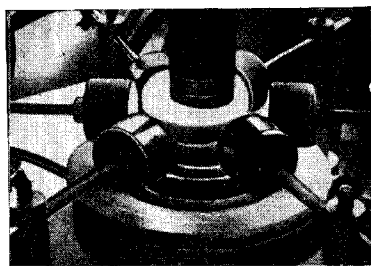


Фиг. 2. Ручная пайка горелкой с многопламенным наконечником.

менными наконечниками (фиг. 3). Механизм паяльных машин устроен таким образом, что можно передвигать или паяемую



Фиг. 3. Машинная пайка многопламенными наконечниками.

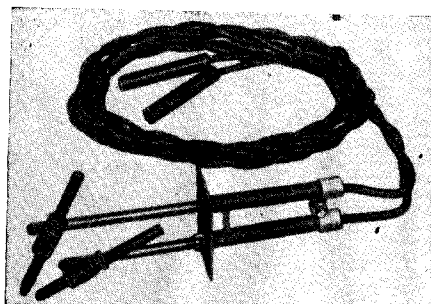


Фиг. 4. Горелка из огнеупорной керамики, работающая на смеси городского газа с воздухом.

деталь или горелку, или ту и другую одновременно. В случае использования смеси городского газа с воздухом применяется горелка из огнеупорной керамики (фиг. 4).

## Пайка независимой угольной дугой

Этот способ пайки не нашел широкого применения, но обеспечивает очень быстрый нагрев. Приспособление для пайки состоит из



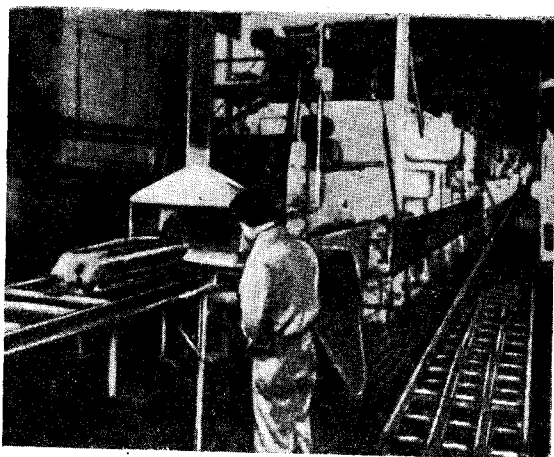
Фиг. 5. Держатель для ручной пайки независимой угольной дугой.

держателя с двумя угольными или графитовыми электродами, между концами которых горит дуга (фиг. 5). Интенсивный нагрев, осуществляемый дугой, требует быстрого перемещения пламени, чтобы предотвратить перегрев материала при пайке. Вследствие этого машинная пайка независимой угольной дугой обычно не применяется. Электрическая энергия, необходимая для поддержания дуги, подается от сварочного генератора, работающего на постоянном токе, или от сварочного трансформатора, работающего на переменном токе. Припой

обычно подается с внешней стороны соединения.

## Пайка в печи

Пайка в печи особенно широко применяется в тех случаях, когда соединяемые детали можно собрать совместно с припоем, помещаемым непосредственно в соединение или около него. Этот способ



Фиг. 6. Пайка в конвейерной печи.

пайки является высокопроизводительным. Припой применяется в виде проволоки, фольги, металлических опилок, порошка, пас-

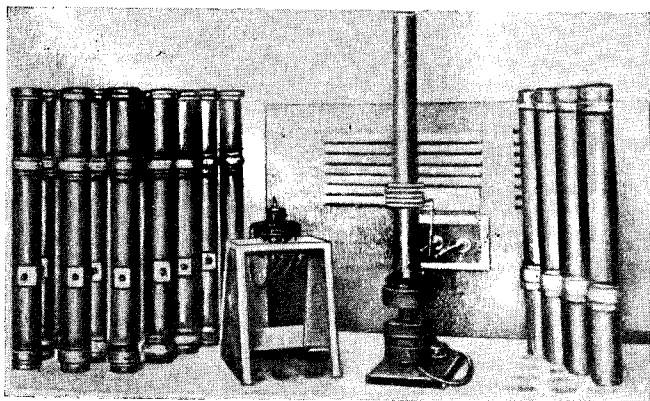
ты и т. д. При печной пайке флюсы обычно применяются, за исключением тех случаев, когда их функцию выполняет специально вводимая в печь атмосфера.

Печи, применяемые для пайки, состоят из камеры нагрева и камеры охлаждения и должны иметь автоматическое регулирование времени выдержки и температуры. Нагрев печи осуществляется электрическим током, газом или нефтью. Паяемые детали загружаются в печь поштучно, партиями или непрерывно по конвейеру (фиг. 6).

Для пайки применяются четыре типа печей: муфельные, конвейерные, ретортные и колпаковые.

### Индукционная пайка

При этом способе пайки необходимое тепло получается от электрического тока, индуктирующегося непосредственно в подлежащих пайке деталях, отсюда и название индукционная пайка. При индукционной пайке соединяемые детали располагают около или внутри специальных индукторов (токовозбуждающие катушки) и не включают в электрическую цепь (фиг. 7).

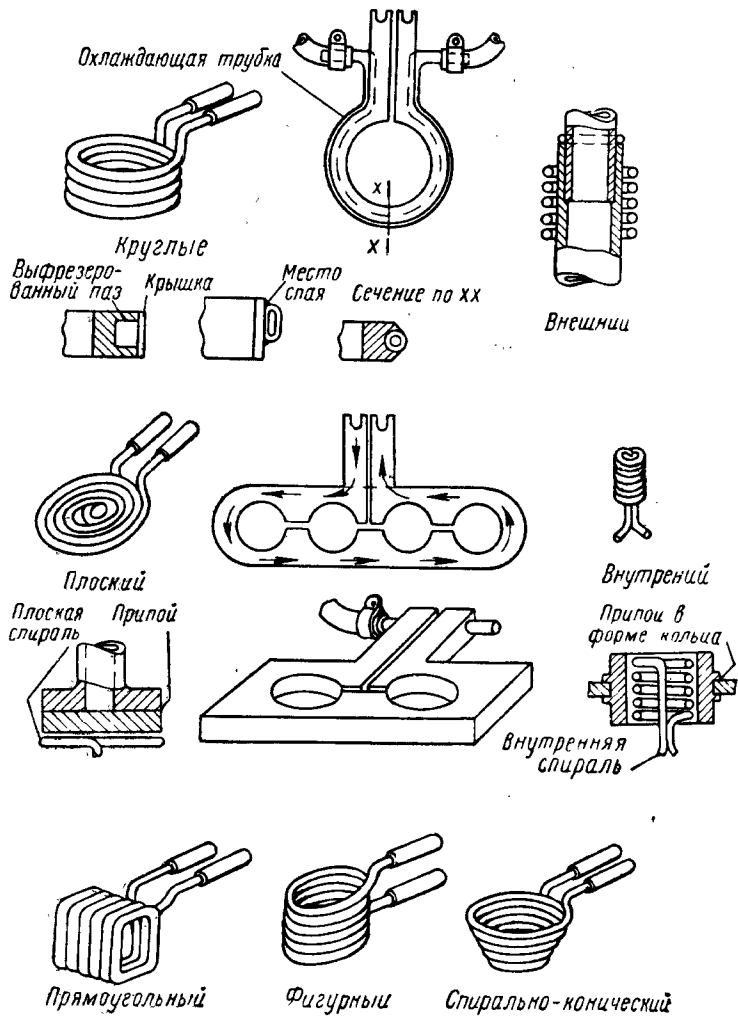


Фиг. 7. Установка для индукционной пайки.

Припой обычно укладывается у места соединения перед пайкой. Хорошо сконструированное соединение и правильно выполненный индуктор обеспечивают одновременный нагрев всех соединяемых деталей до необходимой температуры. Типичные виды индукторов показаны на фиг. 8.

Флюсы для пайки обычно применяются, за исключением тех случаев, когда их функцию выполняет специально подаваемая к месту пайки атмосфера.

Для получения тока высокой частоты обычно применяются три источника: машинный генератор, резонатор и ламповый генератор.



Фиг. 8. Типичные индукторы для пайки.



## Пайка сопротивлением

Тепло для пайки этим способом получается за счет сопротивления протеканию электрического тока через электроды и подлежащее пайке соединение. Детали, составляющие соединение, в этом случае являются частью электрической цепи.

Припой в любой удобной форме предварительно укладывается у соединения или присаживается вручную с внешней стороны соединения в процессе пайки. Необходимо учитывать, что при применении флюса электропроводность соединения уменьшается (большинство флюсов, когда высыхают, становятся изоляторами). Если используется специальная атмосфера, выполняющая функцию флюса, то флюс не применяется.

При этом способе пайки соединяемые детали помещают между двумя электродами, сдавливают надлежащим образом и пропускают через них ток. Давление с электродов не снимается до тех пор, пока расплавленный припой в соединении не затвердевает. В некоторых случаях оба электрода могут быть расположены на одной и той же стороне соединения, если с другой стороны предусмотрена соответствующая поддержка детали, обеспечивающая создание необходимого давления для пайки.

Обычное приспособление для пайки сопротивлением состоит из клещей или зажимов с электродами, закрепленными на конце каждой рукоятки клещей (фиг. 9). Рукоятки являются проводниками тока и присоединены проводами к трансформатору. Для пайки можно применять как переменный, так и постоянный ток, но в последнем случае пайка стоит значительно дороже. Для устранения перегрева деталей клещи желательнее охлаждать водой. Пайку сопротивлением можно выполнять также и на сварочных машинах.

Электроды могут быть из графита, угля, тугоплавких металлов или медных сплавов, в соответствии с необходимой электропроводностью.

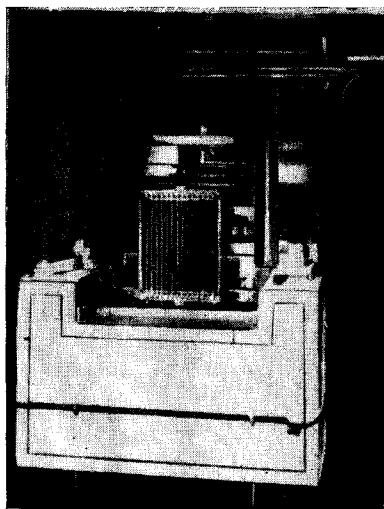
## Пайка погружением

Известны два способа пайки погружением: пайка погружением в расплавленную соляную ванну и пайка погружением в расплавленный припой.

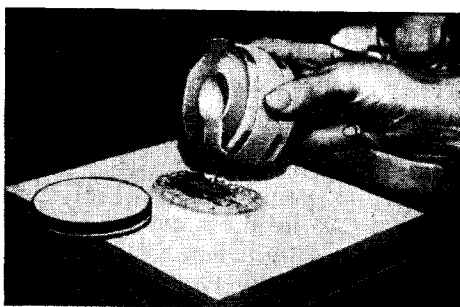


Фиг. 9. Пайка сопротивлением при помощи клещей.

При пайке погружением в соляную ванну припой в требуемой форме заранее помещают в месте соединения и затем собранный узел погружают в ванну. При этом ванна обеспечивает необходимый нагрев паяемых деталей и обычно защищает их от окисления; в противном случае следует применять флюс. Обычная соляная ванна представляет собой металлический контейнер. Обогрев ванны осуществляется: 1) с внешней стороны через стенки; 2) при помощи элементов электросопротивления, помещаемых непо-



Фиг. 10. Соляная ванна для пайки погружением.



Фиг. 11. Пайка выводов катушки погружением в расплавленный припой.

средственно в ванне; 3) за счет выделения тепла ( $I^2R$ ) при пропускании тока через расплавленную соль в самой ванне (фиг. 10).

При пайке погружением в расплавленный припой соединяемые детали очищают, покрывают флюсом, если необходимо, и погружают в расплавленный припой, на поверхности которого также должен поддерживаться расплавленный флюс (фиг. 11).

Этот способ пайки широко применяется для пайки таких небольших деталей, как электрические провода или узкие полосы металла. При вынимании из ванны концы спаянных проводов или деталей должны быть крепко прижаты друг к другу до тех пор, пока припой полностью не затвердеет.

### Пайка нагретым блоком

При этом способе пайки нагрев соединяемых деталей производится теплом, исходящим от предварительно нагретых массивных металлических блоков (отсюда и название способа). Этого тепла

достаточно для того, чтобы нагреть соединяемые детали до температуры пайки и обеспечить растекание припоя, который наносят на детали перед пайкой.

### **Пайка путем заливки припоя**

Этот способ пайки осуществляется путем заливки расплавленного припоя в соединение, предпочтительно с одной стороны. Этот способ уступает другим способам пайки, более экономичным и эффективным.

### **Специальные способы пайки**

В отдельных отраслях промышленности, например в производстве электронных трубок, описанные выше способы пайки применяются с определенными специальными усовершенствованиями (см. гл. 9). Иллюстрацией этого может служить вакуумная пайка. Применяемые усовершенствования в каждом случае определяются специальными требованиями, которые диктуются особенностями паяемых деталей, и потому не могут быть полностью раскрыты в основных сведениях, приведенных в настоящей книге. Специальные способы пайки таких деталей рассмотрены в других главах книги.

### **ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ**

Технологические режимы обычно записываются в технологической карте, позволяющей установить все условия и последовательность процессов, в результате которых получается единообразная паяная продукция, отвечающая требованиям конструкции. Такая запись дает возможность конструктору довести свой замысел до производства и способствует его правильному осуществлению. Технологическую карту можно использовать и для контроля, например, при помощи этой карты контролер может определить, какой припой и какой основной металл должны применяться и применяются ли они в процессе производства. По окончании работы технологическую карту можно хранить в папке и использовать в дальнейшем, если будут производиться подобные работы.

Ниже приведены для иллюстрации предлагаемая форма технологической карты и заполненная карта. При некоторых работах заполнение отдельных пунктов не требуется. Тогда эти пункты просто пропускаются. Необходимые же пункты должны быть заполнены настолько подробно, чтобы обеспечить достижение желаемых результатов. Образец карты с заполненными пунктами может служить руководством для правильного и полного ее заполнения.

Приводим объяснение по заполнению каждого пункта предлагаемой формы технологической карты.

Соединение \_\_\_\_\_

(Дать эскиз с указанием формы и толщины соединяемых деталей; указать зазор для шва и место укладки припоя в соединении; сварку и способ фиксации деталей)

Основной металл(ы) \_\_\_\_\_

(Указать номер спецификации или другие обозначения)

Очистка перед пайкой \_\_\_\_\_

(Указать очиститель: проволочная щетка, наждак или состав очистителя. Указать также технологию и режимы очистки: время, температура, промывка и пр. Если применяется, то указать процесс покрытия)

Припой \_\_\_\_\_

(Указать номер по спецификации или другие обозначения, а также количество и форму)

Флюс или атмосфера \_\_\_\_\_

(Указать номер по спецификации AWS или другие обозначения и способ применения)

Процесс пайки \_\_\_\_\_

(Указать способ пайки и его режимы, такие как температура пайки, температура предварительного нагрева, если это требуется; размер наконечника и применяемый газ при пайке горелкой; сила тока и давление на электродах при пайке сопротивлением; частота тока и тип индуктора для индукционной пайки и пр.)

Очистка после пайки \_\_\_\_\_

(Указать способ очистки и промывки)

Термообработка после пайки \_\_\_\_\_

(Указать термообработку, не совпадающую с режимом пайки; указать скорость нагрева, температуру, скорость охлаждения и пр.)

Требования, предъявляемые при контроле \_\_\_\_\_

(Указать требования, предъявляемые к испытаниям: количество образцов, вид и режимы испытания, как-то: давление при испытании на герметичность, размер и характер допускаемых дефектов при рентгенографии, размер валика шва и пр.)

Замечания \* \_\_\_\_\_

(Здесь указываются особые меры предосторожности, технология и другая относящаяся к пайке информация, не учитываемая в карте)

Предлагаемая форма технологической карты.

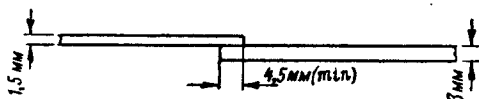
\* Содержание этого пункта записывается на обратной стороне карты.

(Только для иллюстрации)

Процесс пайки № А

Соединение 102

(Дать эскиз с указанием формы и толщины соединяемых деталей; указать зазор для шва и место укладки припоя в соединении; сборку и способ фиксации деталей)



Основной металл (ы) Сверху — раскисленная медь,

(Указать номер спецификации или другие обозначения)

снизу — сталь 1020.

Очистка перед пайкой. Травление в растворе А—19 мин., сушка, полное удаление окалины наждачной шкуркой 000.

(Указать очиститель: проволочная щетка, наждак или состав очистителя. Указать также технологию и режимы очистки: время, температура, промывка и пр. Если применяется, то указать процесс покрытия)

Припой BAg-1

(Указать номер по спецификации или другие обозначения, а также количество и форму)

Флюс или атмосфера Флюс 3 AWS

(Указать номер по спецификации AWS или другие обозначения и способ применения)

Процесс пайки Пайка кислородно-ацетиленовым пламенем без предварительного подогрева. Наконечник № 4. Давление кислорода 2,8 ат, ацетилена 2,8 ат. Пламя сосредотачивать на медных деталях

(Указать способ пайки и его режимы, такие как температура пайки, температура предварительного нагрева, если это требуется; размер наконечника и применяемый газ при пайке горелкой; сила тока и давление на электродах при пайке сопротивлением; частота тока и тип индуктора для индукционной пайки и пр.)

Очистка после пайки Паяное соединение охладить до 480°, затем погрузить в холодную воду. Щеткой удалить полностью все остатки флюса, что очень существенно.

(Указать способ очистки и промывки)

Термообработка после пайки Не производится

(Указать термообработку, не совпадающую с режимом пайки: указать скорость нагрева, температуру, скорость охлаждения и пр.)

Требования, предъявляемые при контроле Визуально проверить каждое соединение, чтобы установить наличие полного пропая с образованием валика на каждой стороне. Испытанию с разрушением подвергать одно соединение из 100. Соединение должно разрушаться по меди при напряжении не менее чем 20 кг/мм<sup>2</sup>.

(Указать требования, предъявляемые к испытаниям; количество образцов для проверки, вид и режимы испытания, как-то: давление при испытании на герметичность, размер и характер допускаемых дефектов при рентгенографии, размер валика шва и пр.)

Замечания \* \_\_\_\_\_

(Здесь указываются особые меры предосторожности, технология и другая относящаяся к пайке информация, не учитываемая в карте)

Заполненная технологическая карта.

\* Содержание этого пункта записывается на обратной стороне карты.

*Эскиз.* На эскизе следует указывать форму и размеры деталей соединения, включая и допуски, если это необходимо. На эскизе может быть показана или только плоскость соединения или же полностью весь паяемый узел.

*Основной металл.* Для основных металлов применять стандартные американские спецификации: ASTM, AISI, SAE \*. Если материал не подходит к стандартной спецификации, то следует указывать его химический состав, марку или другие отличительные данные. При сочетании разнородных металлов нужно указывать состав или спецификацию для каждого из них.

Специальные условия обработки основного металла (термообработка, отделка и пр.) также необходимо указывать.

*Очистка перед пайкой.* Подробно указать процесс очистки. Отметить, если это важно, время между очисткой и пайкой, а также любые специальные требования для устранения загрязнения очищенных деталей. Промежуточное покрытие указывается только в том случае, если оно применяется для облегчения процесса пайки.

*Припой.* Предпочтительно применять нумерную классификацию припоев согласно стандартам на припои (AWS, A58, ASTM, B260). Здесь же указать количество и форму припоя и как его применять, т. е. размещать ли предварительно на деталях или присаживать вручную во время пайки и пр. Если необходимо, то согласоваться с эскизом.

*Флюс или атмосфера.* В дополнение к указанию вида указать способ применения и другие специальные требования, как, например, степень осушки атмосферы. Если применяются и флюс и атмосфера, то необходимо дать характеристики и того и другого.

*Процесс пайки.* Сначала нужно указать способ пайки, т. е. горелкой, в печи, индукционный, погружением и пр. Затем надо подробно описать методы контроля процесса. Сюда должны входить тип и размер наконечника горелки для пайки, тип печей в случае применения пайки в печи и пр. Подробно указать, следует ли производить нагрев определенного участка и нагрева каких участков следует избегать.

*Очистка после пайки.* После пайки необходимо удалить все остатки флюса, особенно в тех случаях, когда применялись флюсы, вызывающие коррозию на таких металлах, как алюминий и магний. Удаление флюса может иметь значение также и для окончательной отделки паяной детали.

*Термообработка после пайки.* Если термообработка выполняется одновременно с процессом пайки, то необходимые данные указываются в пункте «Процесс пайки». Другие же виды термообработки указываются в настоящем пункте.

---

\* ASTM (American Society for Testing Materials — Американское общество по испытанию материалов).

AISI (American Institute of Steel and Iron — Американский институт черной металлургии).

SAE (Society of Automotive Engineers — Общество инженеров по автомобилестроению). (Прим. ред.).

*Требования, предъявляемые при контроле.* Указать вид испытания и дать подробное описание процесса испытания и результатов. Определить также количество образцов для испытания и степень дефектности, при которой допускается исправление или браковка.

Заполненная форма технологической карты приведена в качестве примера, и указанный в карте процесс на практике не применяется.

---

## ГЛАВА 2

### СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ МЕТАЛЛОВ

#### Металлургические особенности

Все металлы и сплавы можно паять, если применять надлежащий способ пайки. Некоторые металлы и сплавы имеют свои металлургические особенности, требующие применения специальных процессов для получения паяных соединений удовлетворительного качества.

Ниже вкратце описаны некоторые металлургические явления, наблюдающиеся в процессе пайки.

**Водородная хрупкость.** Водород имеет способность очень быстро диффундировать в кристаллическую решетку многих металлов вследствие того, что его атомы малы. При повышении температуры скорость диффузии возрастает. При диффузии водорода в металл, который не полностью раскислен (содержит кислород), может происходить восстановление окислов, если температура достаточно высока. Конечным продуктом этой реакции являются металлическая губка и водяной пар.

Так как размер молекул паров воды слишком велик, то диффузия их в поверхность металла, подобно диффузии водорода, произойти не может. Вследствие этого внутри металла развивается давление, которое для вязкой медной сердцевины составляет  $63 \text{ кг/мм}^2$ . Это чрезвычайно высокое давление буквально разрывает металл с образованием большого количества маленьких трещин или раковин, главным образом по границам зерен, что приводит к резкому снижению прочностных характеристик металла.

Электролитическая вязкая медь, серебро и палладий при наличии в них кислорода подвергаются водородному охрупчиванию, если их нагревать в присутствии водорода. Следовательно, чтобы спаять вязкую медь без охрупчивания, атмосфера, в которой происходит нагрев, не должна содержать водорода. Поэтому для деталей, выполняемых пайкой, хорошо применять раскисленную или бескислородную медь. Бескислородная медь может окисляться и подвергаться водородному охрупчиванию в том случае, когда применяется неправильный режим нагрева. Практически медь, обладающую водородной хрупкостью, невозможно восстановить до нормального состояния.

Стали также подвергаются водородному охрупчиванию, но другим путем. Водород диффундирует в сталь так же, как и в медь, но он имеет тенденцию скапливаться в небольших пустотах, которые образуются вокруг неметаллических включений и по границам зерен. При этом не образуются водяные пары, как в меди, но иногда развивается высокое давление, так как водород диффундирует в форме атомов, которые при взаимодействии в металле превращаются в молекулы, имеющие меньшую подвижность и создающие по мере накопления определенное давление.

Сталь, подвергшаяся водородному охрупчиванию, имеет низкую вязкость. Однако механические свойства такой стали и содержащих железо сплавов можно восстановить, если заставить водород диффундировать наружу при длительном нагреве стали в печи только до температур 80—100° или, если хранить сталь долгое время до восстановления вязкости.

К счастью, большинство других металлов и сплавов, окислы которых можно восстановить при помощи водорода, содержат в себе избыток раскисляющих элементов и не подвергаются водородному охрупчиванию.

**Выделение карбидов.** Некоторые нержавеющие стали и другие сплавы, содержащие хром и углерод, способны образовывать и выделять карбиды при нагреве до температуры 480—700°. Выделение карбидов происходит вследствие того, что углерод реагирует предпочтительно с хромом с образованием карбидов, которые обычно отлагаются по границам зерен. Образование карбидов приводит к уменьшению в сплаве количества хрома, поэтому материал, непосредственно примыкающий к частицам карбида, имеет значительно худшую коррозионную стойкость, чем первоначальный сплав. В соответствующих коррозионных средах механические свойства такого сплава могут понижаться с образованием малого или заметного очага коррозии.

Выделившиеся карбиды могут снова раствориться в сплаве при нагреве до 1000—1130° и последующем быстром охлаждении. Однако эта термообработка не является пригодной для паяных узлов.

Другой стабилизирующей термообработкой, при которой невыделившиеся хромовые образования разгоняются (диспергируются) по всему объему, является нагрев до 870° в течение 2 час., затем охлаждение в печи до 540° и последующее охлаждение на воздухе.

При быстром процессе пайки в нержавеющих сталях нормального типа выделяется очень незначительное количество карбидов. В тех случаях, когда быстрый нагрев невозможен, а паяные соединения из нержавеющей стали должны работать в условиях коррозии, следует применять одну из стабильных сталей, таких, как 347 или 321\*.

**Растрескивание под напряжением.** Многие высокопрочные материалы, например нержавеющая сталь, никелевые

\* Аналогичны стали 1X18H9T. (Прим. ред.).



и медноникелевые сплавы, имеют тенденцию растрескиваться во время пайки, если они находятся в напряженном состоянии и в контакте с жидким припоем. Материалы с высокой температурой отжига, и в особенности те, которые подвергаются старению, также имеют указанную тенденцию к растрескиванию под нагрузкой. Растрескивание возникает почти мгновенно в процессе пайки и трещина хорошо видна до тех пор, пока расплавленный припой не войдет в нее и полностью не заполнит ее\*.

Этот процесс можно рассматривать как коррозионное растрескивание под напряжением, если расплавленный припой считать коррозионной средой. Сталь, находящаяся в напряженном состоянии и помещенная в каустический раствор, или находящаяся под напряжением латунь, помещенная в раствор аммиака, могут служить примером коррозионного растрескивания. Напряжения, вызывающие растрескивание, могут возникать при неправильном охлаждении деталей после термообработки до пайки, или при механическом или термическом нагружении деталей в процессе пайки.

Причину возникшего растрескивания под напряжением можно обычно установить путем критического анализа процесса пайки. Принимают все меры к устранению источника, вызывающего напряжения в детали во время пайки.

Растрескивание под напряжением можно устранить:

а) применением для пайки отожженного материала вместо закаленного;

б) отжигом механически обработанных деталей перед пайкой;

в) удалением источников, вызывающих внутренние напряжения в паяемом изделии, таких как неправильная сборка деталей, приспособления, которые оказывают давление на детали, или незакрепленные висящие детали (см. гл. 8);

г) переконструированием соединения или деталей (см. гл. 6);

д) нагревом с меньшей скоростью. Массивные детали нужно нагревать настолько быстро, чтобы термические напряжения в них не возникали;

е) нагревом собранных и профлюсованных деталей горелкой до достаточно высокой температуры для снижения имеющихся напряжений с последующим охлаждением деталей до температуры пайки и присаживанием припоя вручную;

ж) выбором припоев, не вызывающих хрупкие разрушения металлов в процессе пайки (см. гл. 3).

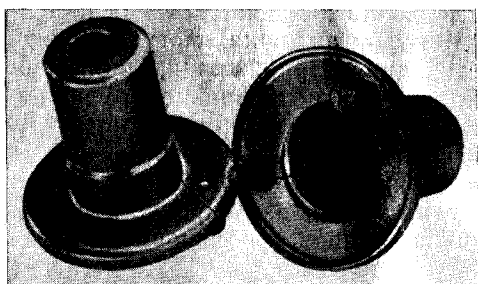
На фиг. 12 показаны трещины на фланце, изготовленном глубокой вытяжкой из К монеля, возникшие при припайивании к нему серебряным припоем ВAg штырей из меди. Трещины хорошо видны, так как их контуры имеют цвет серебряного припоя. Трещины распространяются от паяного шва в основной металл.

---

\* В ряде случаев эти трещины визуальнo обнаружить не удастся и тогда они могут привести к разрушению паяной детали в процессе эксплуатации. (Прим. ред.).

**Сернистая хрупкость.** Никель и другие сплавы, в состав которых входит большое количество никеля, при нагреве в присутствии серы или компонентов с содержанием серы становятся хрупкими. Это вызывается образованием легкоплавкого сульфида никеля, который располагается преимущественно по границам зерен и, будучи хрупким, растрескивается под действием приложенных нагрузок. Материал, обладающий сернистой хрупкостью, непригоден для применения и восстановлению не поддается.

Добавка хрома к никелю и медноникелевым сплавам уменьшает их склонность к охрупчиванию. При пайке особенно важно, чтобы



Фиг. 12. Трещины от напряжений в деталях из К монеля, возникшие в процессе пайки.

сплавы, в которых основным элементом является никель, были бы перед нагревом очищены от веществ, содержащих серу, таких, как нефть, смазка, краска, меловые пометки и охлаждающие жидкости. Нагрев никелевых и медноникелевых сплавов нужно производить в атмосфере, свободной от сернистых примесей.

**Фосфористая хрупкость.** Фосфор образует со многими элементами хрупкие компоненты, называемые фосфидами.

Припой с содержанием фосфора нельзя применять для пайки железа и сплавов на основе никеля или для сплавов, содержащих более 5% любого из этих элементов.

**Давление и испарения.** Особое внимание следует уделять выбору припоев для пайки деталей, работающих в вакууме. Это условие в особенности относится к электронным трубкам большого размера, к ускорителям частиц материи и вакуумным печам. Во всех этих и аналогичных установках высокий вакуум или обеспечивает их надлежащую работу, или требуется предварительно до создания необходимой газовой атмосферы.

Любые элементы, которые при любой температуре процесса выделяют нежелательные газы или пары, портят вакуум и рано или поздно выводят установку из строя.

В табл. 1 указаны температура плавления и давление испарения при различных температурах некоторых элементов, входящих в состав припоя и основного металла. Для пайки вакуумных трубок цинк и кадмий в качестве элементов припоя применять нельзя.

**Устойчивость окислов металлов.** Окислы, образованные на поверхности большинства металлов и сплавов, легко удаляются при применении соответствующего флюса или восстанавливаются в восстановительной атмосфере. Окислы хрома, алюминия, титана, кремния, магния, марганца и бериллия удаляются

Таблица 1

## Температура плавления и давление испарения некоторых металлов

Металл	Химический символ	Температура плавления в °С	Давление испарения (в мм рт. ст.) при температуре в °С			
			20	500	1000	2000
Алюминий	Al	658	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	150
Кадмий	Cd	321	~10 <sup>-8</sup>	20	2500	Очень высокое
Ниобий	Nb	2500	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-5</sup>
Медь	Cu	1083	<10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-4</sup>	15
Золото	Au	1062,4	<10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	40
Железо	Fe	1535	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup>	10
Свинец	Pb	327	<10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup>	2	1000
Магний	Mg	651	<10 <sup>-8</sup>	8×10 <sup>-2</sup>	400	Очень высокое
Молибден	Mo	2620	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-4</sup>
Никель	Ni	1455	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-7</sup>	3
Фосфор	P	44	~10 <sup>-7</sup>	10 000	Очень высокое	Очень высокое
Платина	Pt	1773,5	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-2</sup>
Родий	Rh	1966	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-3</sup>
Серебро	Ag	960,5	<10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-1</sup>	1000
Тантал	Ta	2996	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>
Олово	Sn	232	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	4×10 <sup>-4</sup>	80
Вольфрам	W	3370	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>	<10 <sup>-8</sup>
Цинк	Zn	419	<10 <sup>-8</sup>	1	2000	Очень высокое

труднее, поэтому сплавы с содержанием этих элементов обычно требуют специальной обработки для удаления окислов.

Окислы хрома легко удаляются флюсами с содержанием фторидов, не восстанавливаются водородом, если водородная атмосфера не очень сухая (точка росы около —60°) и восстанавливаются только при высокой температуре порядка 1090°.

Окислы алюминия, титана, кремния, магния, марганца и бериллия также удаляются специальными флюсами, но не восстанавливаются в атмосфере водорода при обычной технике пайки (см. гл. 4). Поэтому при пайке материалов, содержащих достаточное количество этих элементов, необходимо применять специальные флюсы.

Зона теплового воздействия. Нагрев, осуществляемый при пайке, оказывает влияние на свойства основного металла.

Основной металл, механические качества которого получены в результате закалки, может сделаться менее твердым и более крупнозернистым, если температура пайки выше температуры его отжига. Термически обработанные материалы после нагрева их в процессе пайки изменяют свои механические свойства. Материалы в отожженном состоянии очень незначительно изменяют свои свойства при пайке.

Зона, на которую распространяется термическое влияние при пайке, в большой степени зависит от применяемого способа нагрева. При пайке горелкой, индукционным методом или путем погружения образуется некоторая зона теплового влияния. При пайке в печи нагреву подвергается материал всей паяемой детали. В основном зона термического влияния при пайке шире и имеет менее отчетливую границу, чем при любом процессе сварки.

Термообработка после пайки. Часто желательно производить термообработку спаянного узла для улучшения механических свойств основного материала. Для черных сплавов это осуществляется путем закалки с повышенных температур с последующим отпуском при более низкой температуре. Для других сплавов, таких, как меднобериллиевый сплав, дураникель, К монель, инконель X и нержавеющей сталь 17-7PH (сталь CH-2), термообработка заключается в нагреве до средних температур с последующим регулируемым охлаждением. Когда металл подвергают пайке с последующей термообработкой, то важно, чтобы применяемый припой образовал достаточно прочное паяное соединение, которое не могло бы разрушиться при перемещении деталей для термообработки.

Сплавление и диффузия. Соединение между припоем и основным металлом в процессе пайки происходит путем сплавления или диффузии. Обычно такое сплавление является поверхностным эффектом и распространяется вглубь соединяемых поверхностей на несколько тысячных долей миллиметра. Однако в некоторых случаях сплавление и диффузия происходят на большую глубину, что требует применения специальных способов пайки.

При пайке в печи медь очень легко сплавляется с никелем, монелем и медноникелевыми сплавами. В этом случае расплавленная медь не растекается на большую площадь, так как сплавление основного металла с медью повышает температуру плавления образовавшегося сплава, что приостанавливает его растекание.

Некоторые припои, например на основе алюминия и магния, сплавляются и диффундируют полностью через тонкий алюминиевый лист, если он находится при температуре пайки дольше, чем это необходимо. При такой чрезмерной диффузии паяное соединение не будет прочным и пластичным.

Излишний жидкий припой, который растекается под действием силы тяжести по тонким элементам паяемых изделий, может образовывать раковины в таких элементах в процессе диффузии и сплавления с основным металлом.

Пайка золота при производстве ювелирных изделий производится очень быстро, чтобы припой не диффундировал в золото и не вызывал его обесцвечивания и образования пятен.

В случае чрезмерной диффузии и сплавления необходимо производить пайку за наиболее короткое время и при наиболее низкой температуре, насколько это возможно. Припой нужно применять в количестве, достаточном для заполнения соединительного зазора полностью. Излишнее количество припоя нежелательно и неэкономично.

### **Сочетание разнородных материалов**

При помощи пайки можно соединять многие разнородные материалы. Действительно, пайка является решением проблемы соединения в тех случаях, когда несовместимость материалов вследствие их металлургических особенностей является основным препятствием для соединения их сваркой.

Однако имеются и некоторые ограничения. Припой для пайки разнородных материалов должен иметь температуру плавления меньшую, чем температура плавления любого из соединяемых основных металлов и должен быть совместимым с обоими основными металлами. Это можно проиллюстрировать двумя примерами.

Алюминиевые припои применяются для соединения алюминиевых сплавов между собой, но спаять этими припоями алюминиевые сплавы с медными сплавами и получить швы удовлетворительного качества невозможно. Серебряные припои непригодны для пайки алюминиевых или магниевых сплавов между собой, а также для пайки этих сплавов с другими металлами.

### **Сопrotивление коррозии**

Коррозионная стойкость металлов представляет собой очень сложный вопрос, изложение которого не представляется возможным в настоящей книге. В случае необходимости получить данные о коррозионной стойкости металлов или о сопротивлении металлов воздействию специфических сред и атмосфер лучше обращаться к стандартному руководству по этому вопросу под названием «Справочник по коррозии» под редакцией Г. Г. Улиг, опубликованному в 1948 г.

---

## **ГЛАВА 3**

### **ПРИПОИ**

Американское общество сварщиков определяет припой как применяемый при пайке присадочный материал. К припоям относятся цветные металлы или сплавы с температурой плавления выше 425°, но ниже температуры плавления соединяемых металлов. Раньше

эти металлы называли твердыми припоями и паяльными сплавами, но затем этот термин был заменен более точным термином — *припаянный металл для пайки*. Металлы или сплавы, применяемые в качестве припоев, должны обладать следующими свойствами:

а) способностью смачивать основные металлы, подлежащие соединению;

б) надлежащей температурой плавления и хорошей растекаемостью, обеспечивающей заполнение припоем зазора между соединяемыми поверхностями за счет сил капиллярного притяжения;

в) достаточно гомогенным и стабильным составом, а также минимальной ликвацией в процессе пайки и отсутствием сильно испаряющихся элементов;

г) способностью образовать паяные соединения с желаемыми физическими и механическими свойствами, такими как прочность, пластичность и др.

### Температура плавления припоев

Для лучшего выяснения природы припоев и правильного выбора их для специальных целей необходимо прежде всего изучить температурные характеристики (кривые охлаждения и пр.) применяемых металлов и сплавов. Характеристику плавления чистого металла описать легко, так как чистый металл переходит из твердого состояния в жидкое при постоянной температуре и скорее, чем плавятся сплавы в определенном интервале температур. Характеристика плавления сплавов более сложная. Любые группы сплавов можно изучить лучше всего путем составления диаграммы зависимости химического состава от температуры. Такие диаграммы называются *диаграммами состояния*.

Такую диаграмму можно получить при исследовании свойств сплавов различного состава при различных температурах.

После точного химического анализа для каждого сплава строят кривые охлаждения, по которым определяют температуру начала затвердевания и температуру, при которой весь сплав становится совершенно твердым. Эти точки наносят на диаграмму и соединяют линиями. В результате получается серия кривых, которые обычно представляются в координатах: состав в процентах — температура в градусах.

Для иллюстрации сказанного рассмотрим фиг. 13, на которой приведена диаграмма состояния сплавов системы медь—серебро.

На диаграмме состояния применены следующие термины.

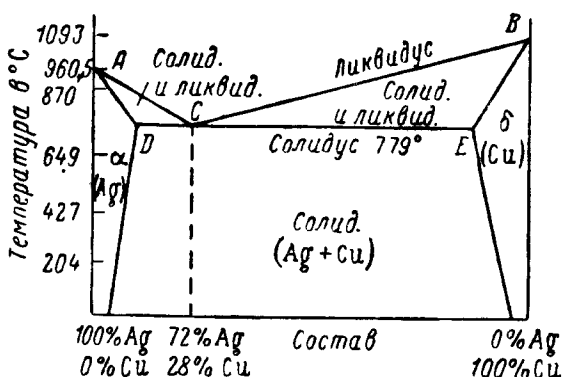
*Солидус* — наивысшая температура, при которой металл или сплав полностью затвердевает (кривая *ADCEB*).

*Ликвидус* — самая низшая температура, при которой металл или сплав остается еще полностью жидким (кривая *ACB*).

*Эвтектический состав* представляет собой специфический сплав, который полностью расплавляется при постоянной температуре. В этом отношении эвтектический сплав ведет себя подобно чистому металлу. Из диаграммы фиг. 13 видно, что эвтектика представляет

собой состав, который показан точкой *C*, образованной при пересечении двух опускающихся ветвей линии ликвидуса; причем температура плавления сплава этого состава ниже точек ликвидуса соседних сплавов.

Как показано на фиг. 13, чистое серебро (точка *A*) имеет температуру плавления  $960,5^{\circ}$ , а чистая медь (точка *B*) температуру плавления  $1083^{\circ}$ . Температура солидуса для любого состава между 91,2% серебра — 8,8% меди и 8% серебра — 92% меди (линия *E*) равна  $779^{\circ}$ .



Фиг. 13. Диаграмма состояния системы медь—серебро.

Из диаграммы фиг. 13 видно, что в эвтектический состав входят 72% серебра и 28% меди (точка *C*). Этот состав плавится и становится полностью жидким при  $779^{\circ}$ .

Любые сплавы, имеющие состав, отличный от эвтектического, не становятся полностью жидкими до тех пор, пока не будет достигнута более высокая температура. Например, сплав из 50% серебра и 50% меди имеет температуру солидуса  $779^{\circ}$ , а температуру ликвидуса  $862^{\circ}$ . Другими словами, этот состав сплава серебро—медь начинает плавиться при  $779^{\circ}$  и полностью превратится в жидкое состояние при  $862^{\circ}$ .

Интервал между температурой солидуса (кривая *ADCEB*) и температурой ликвидуса (кривая *ACB*) называется *диапазоном температур плавления* или *интервалом кристаллизации*. В этом диапазоне одни составляющие сплава находятся в жидкой фазе, а другие — в твердой.

*Температура плавления* и *температура растекания* припои являются терминами, имеющими общее применение, но так как они имеют не одно и то же значение, то это приводит к некоторой путанице. Во избежание этого в книге применяются термины *солидус* и *ликвидус*, которые более четко определяют эти понятия.

Припои с узким интервалом кристаллизации (малая разница между температурами солидуса и ликвидуса) и эвтектическим составом ведут себя при плавлении и пайке подобно чистым метал-

лам. Такие припои широко применяются для пайки в тех случаях, когда величину зазора в соединении легко установить. При пайке этими припоями можно применять как медленный, так и быстрый нагрев.

В противоположность этому имеются другие припои с широким интервалом кристаллизации (большая разница между температурами солидуса и ликвидуса), в случае применения которых необходимо принимать меры предосторожности во избежание слишком медленного нагрева. При частичном расплавлении этих припоев (температура нагрева припоя в процессе пайки несколько выше температуры солидуса, но ниже температуры ликвидуса) жидкая их часть будет иметь состав, отличный от твердой части. Если припой типа предварительно поместить в соединение и медленно нагревать в пределах интервала кристаллизации, то жидкая часть припоя может затекать в соединение под действием сил капиллярного притяжения и образовывать спай, а твердая часть представляет собой нерасплавившийся остаток. Этот остаток остается в твердом состоянии даже в том случае, когда припой нагрет до температуры выше его температуры ликвидуса, так как легкоплавкая часть припоя уже затекла в соединение, а оставшаяся часть имеет более высокую температуру плавления. Разделение твердой и жидкой фаз припоя в процессе нагрева называется *ликвацией*. Однако, если нагрев для пайки производить быстро в пределах интервала кристаллизации до температуры выше температуры ликвидуса припоя, то ликвации не произойдет, припой останется однородным (однородным) и в таком состоянии затечет в соединительный зазор.

Тенденция припоя с широким интервалом кристаллизации к ликвации зависит от соотношения компонентов, которые плавятся, и времени, в течение которого это плавление происходит. Составляющие компоненты припоя, которые фактически остаются твердыми при температуре верхнего предела кристаллизации, не проявляют чрезмерного стремления к ликвации, а часть припоя, находящаяся в жидком состоянии в процессе плавления, способна ликвидировать.

Припой с широким интервалом кристаллизации, который не проявляет стремления к чрезмерной ликвации, часто применяется, когда пригонка деталей в узле не является точной, и в особенности, когда в процессе производства невозможно поддерживать постоянный зазор между соединяемыми деталями. В тех случаях, когда детали собраны с необходимым зазором, применяемый припой можно нагревать выше его температуры ликвидуса, чтобы обеспечить затекание его в узкий зазор за счет капиллярного притяжения. Однако, когда при соединении требуется большой зазор, то припой можно осторожно нагревать до температуры в пределах интервала кристаллизации, чтобы полностью заполнить больший зазор между этими деталями. Таким же образом можно делать швы с валиком, что было бы невозможно без припоев с широким интервалом кристаллизации. Однако применение таких припоев считается нецелесообразным и их по возможности исключают из употребления.



## Температура, необходимая для пайки

Согласно теории припой должен полностью расплавиться прежде, чем он затечет в зазор и распределится в соединении под действием капиллярных сил. Поэтому обычно температура ликвидуса припоя может считаться самой низкой температурой, применяемой для пайки \*, и все детали, входящие в соединение, должны быть нагреты до этой температуры или выше.

Практически нельзя быть уверенным, что все внутренние и внешние части паяемого соединения нагреваются только до этой минимальной температуры. Месторасположение и скорость нагрева, масса деталей и коэффициент термического расширения основного металла являются теми факторами, которые определяют распределение тепла в паяемой детали. В случае быстрого местного нагрева (индукционная пайка) распределение температуры неравномерно и температура наружных поверхностей значительно больше, чем внутренних. При медленном нагреве (пайка в печи), когда деталь нагревается равномерно и постепенно, распределение температуры в паяемом узле более равномерное (см. ниже таблицы припоев).

## Диффузия и растворение припоя в процессе пайки

При смачивании паяемого металла расплавленным припоем может иметь место диффузия компонентов припоя в основной металл или растворение припоем основного металла. Такие диффузия и растворение наиболее вероятны в том случае, когда припой и основной металл подобны по химическому составу. На диффузию и растворение могут оказывать влияние следующие факторы:

- 1) температура пайки;
- 2) продолжительность процесса пайки;
- 3) геометрия паяемого соединения, так как она определяет площадь основного металла, которая подвергается действию припоя, и
- 4) химический состав припоя.

Иногда в процессе пайки вследствие местной диффузии припоя между зернами основного металла происходит растрескивание металла, которое зависит от его внутренних напряжений. Этот вопрос освещен в гл. 2.

Чрезмерная диффузия припоя в основной металл может оказывать существенное влияние на физические и механические свойства металла. Тонкие части основного металла являются наиболее уязвимым местом паяного соединения и в них вследствие эрозии могут образоваться сквозные раковины. Растворение основного металла припоем изменяет температуру его ликвидуса и может привести к плохому заполнению зазора между соединяемыми деталями. Для того чтобы уменьшить или диффузию или растворение

\* Имеется несколько сплавов, применяемых в качестве припоев, которые становятся полностью жидкими при температуре ниже действительной температуры ликвидуса. С припоем такого состава пайка протекает успешно даже в том случае, если температура пайки не достигла линии ликвидуса.

основного металла, процесс пайки необходимо производить как можно быстрее и поддерживать низкую температуру пайки в пределах диапазона кристаллизации для применяемого припоя.

### Выбор припоя и способа пайки

Остальная часть главы посвящена описанию составов и применению припоев, входящих в «Спецификацию припоев» (AWS A5.8—52; ASTM B260—52). Состав припоев указан номинальный.

Стандартная форма и размер припоев

Таблица 2

Марка припоя по спецификации ASTM	Форма припоя	Размер в мм
Алюминиевокремниевые припои:		
BAISi-1 и BAISi-3	Лента	0,5×50
	Проволока	∅ 1,6—4,75
	Пруток	∅ 1,6—6,35
BAISi-2	Плакированный лист*	0,152—6,35
BAISi-4	Лента	0,5×50
	Проволока	∅ 1,6—4,75
Меднофосфористые припои:		
BCuP-1	Лента	(0,125—0,380)×38
BCuP-2	Проволока	∅ 1,6—4,75; ∅ 3,18—4,75
	Пруток	∅ 1,6—6,35; ∅ 3,18—4,75
	Порошок	50—325 меш.
BCuP-3	Проволока	∅ 0,125—3,18
	Пруток	∅ 1,6—6,35
	Порошок	50—325 меш.
BCuP-4	Проволока	∅ 1,6—4,75; ∅ 3,18—4,75
	Пруток	∅ 1,6—6,35; ∅ 3,18—6,35
	Порошок	50—325 меш.
BCuP-5	Лента	0,075—0,625
	Проволока	∅ 0,254—6,35; ∅ 3,18—6,35
	Пруток	∅ 0,8—6,35; ∅ 3,18—4,75
	Порошок	50—325 меш.

\* Покрит припоем с одной или с обеих сторон; толщина припоя составляет 5—10% от толщины листа основного материала.

Марка припоя по спецификации ASTM	Форма припоя	Размер в мм
Серебряные припой:	{ Лента Проволока Пруток Порошок	0,075—0,625
Все марки припоев		$\varnothing$ 0,254—4,76; $\varnothing$ 3,18—4,76 $\varnothing$ 1,6—6,35; $\varnothing$ 3,18—6,35
Меднозолотые припой:		50—325 меш.
BCuAu-1 и BCuAu-2	{ Лента Проволока	По требованию
Медь и медноцинковые припой:		По требованию
BCu, BCuZn-1 BCuZn-2; BCuZn-3	{ Лента Проволока Пруток	0,10—0,625
BCuZn-4		$\varnothing$ 0,075—6,35
BCuZn-5		$\varnothing$ 1,6—9,53
BCuZn-6	{ Гранулы Гранулы	3—40 меш.
		3—70 меш.
BCuZn-7	{ Лента Проволока Пруток	0,16—0,625
		$\varnothing$ 1,6—6,35
		$\varnothing$ 0,8—6,35
Магниевые припой:	{ Лента Проволока Пруток	0,16—0,625
		$\varnothing$ 1,6—6,35
		$\varnothing$ 1,6—6,35
BMg	{ Порошок	40—180 меш.
Жаропрочные припой:	{ Проволока Пруток	$\varnothing$ 1,2—4,75
		$\varnothing$ 1,2—4,75
BNiCr	{ Проволока Проволока Порошок	0,125—0,50
		$\varnothing$ 1,6—3,2
		325 меш.
BAgMn	{ Лента Проволока Порошок	0,075—0,625
		$\varnothing$ 0,25—6,35
		$\varnothing$ 1,6—6,35

Более точный состав припоев приведен в «Спецификации припоев». В табл. 2 указана также форма (или состояние), в которой можно применять припой.

Сведения о пайке специальных металлов и сплавов помещены ниже в отдельных главах книги.

## Применяемые припой

Группа алюминиевокремниевых припоев (BAISi). Эти припой применяются для соединения пайкой алюминиевых сплавов, указанных в табл. 8 гл. 12.

Величину соединительного зазора практически лучше всего определять опытным путем. Обычно для нахлесточных соединений с длиной нахлестки (перекрытия) менее 6,35 мм применяется зазор от 0,15 до 0,25 мм, а для больших перекрытий — 0,62 мм.

Наиболее широко применяется пайка алюминия горелкой, в печи или погружением, хотя возможны также и другие способы пайки. Применение флюса необходимо при всех перечисленных способах пайки. Вследствие того, что флюсы для пайки алюминия по своей природе могут вызывать коррозию, надо после пайки тщательно очищать детали от остатков флюса. Способы удаления остатков флюсов описаны в гл. 12.

Алюминиевокремниевые припой хорошо противостоят коррозии во многих средах.

**Алюминиевокремниевые припой**

Марка припоя	Номинальный состав в %			Температура в °С		
	Si	Cu	Al	Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
BAISi-1	5	—	95	578	631	620—640
BAISi-2	7,5	—	92,5	578	613	605—615
BAISi-3	10	4	86	521	585	570—640
BAISi-4	12	—	88	578	582	590—640

*Припой BAISi-1* \* применяется при пайке горелкой, погружением и при пайке в печи.

*Припой BAISi-2* применяется только для плакирования листов из алюминиевых сплавов M1A и J51S с одной или с обеих сторон. Пайку деталей из листов, плакированных припоем, можно производить горелкой или в печи.

*Припой BAISi-3* применяется при пайке погружением и в печи.

*Припой BAISi-4* применяется в некоторых случаях для получения паяных соединений с относительно высокой устойчивостью против коррозии. Пайку рекомендуется производить горелкой, но возможна также пайка в печи и погружением.

Группа меднофосфористых припоев (BCuP). Припой этой группы применяются в основном для соединения пайкой меди и медных сплавов, а также с некоторыми ограничениями — для пайки серебра и молибдена. Эти припой не рекомендуются для пайки черных металлов и никельсодержащих сплавов, так

\* Буквой В (от слова Brazing) в стандартах США условно обозначаются твердые припой. (Прим. ред.).

как присутствующий в припое фосфор образует в процессе пайки хрупкие фосфиды железа или никеля. Эти припои можно применять при любом способе пайки; пайку меди и серебра можно производить ими без флюса. Однако лучшие результаты получаются с применением флюса. Если припой ВCuP применяется для пайки других материалов, то флюс необходим. Паяные соединения, выполненные этими припоями, имеют хорошую электро- и теплопроводность. Коррозионная стойкость паяных соединений в большинстве сред обычно хорошая. Но эти припои не рекомендуется применять для пайки соединений, которые будут работать в сернистой атмосфере при температуре выше нормальной.

При медленном нагреве меднофосфористые припои имеют тенденцию к ликвации. Поэтому необходимо, в особенности, когда припой накладывается предварительно, производить нагрев по возможности быстро. После пайки припой приобретает в шве светло-серый цвет. После погружения паяного соединения в 10%-ный раствор серной кислоты припой снова принимает цвет меди.

В приведенной ниже таблице отмечено, что нижний предел температур пайки для этих припоев меньше, чем их температура ликвидуса. Основным принципом пайки является нагрев до наименьшей температуры из рекомендованного интервала в соответствии с минимальным зазором между соединяемыми деталями и необходимым временем выдержки. Это в свою очередь зависит от соединяемых материалов, применяемого способа пайки и конструкции паяемого соединения.

Меднофосфористые припои

Марка припоя	Номинальный состав в %			Температура в °С		
	Cu	Ag	P	Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
BCuP-1	95	—	5	708	900	785—925
BCuP-2	93	—	7	708	810	730—840
BCuP-3	89	5	6	645	815	705—840
BCuP-4	87	6	7	640	748	705—815
BCuP-5	80	15	5	640	815	705—815

Припой ВCuP-1 применяют преимущественно для предварительной укладки у места соединения и при пайке методом сопротивления, а в некоторых случаях в печи. Этот припой более пластичен, чем другие меднофосфористые припои, содержащие больше фосфора, и поэтому его можно прокатать в тонкую полосу; он также менее текучий при температуре пайки, чем другие меднофосфористые припои. Соединительный зазор должен быть от 0,05 до 0,125 мм.

Припой ВCuP-2 имеет исключительно хорошую текучесть при температурах пайки и поэтому проникает в соединения с очень ма-

лым зазором. Самые лучшие результаты получаются при соединительном зазоре от 0,025 до 0,075 мм.

*Припой ВCuP-3* также имеет исключительно хорошую текучесть при температуре пайки. Рекомендуемый соединительный зазор от 0,05 до 0,125 мм.

*Припой ВCuP-4* дает самые лучшие результаты при зазорах от 0,025 до 0,075 мм.

*Припой ВCuP-5* применяется для очень плотных соединений. Соединительный зазор рекомендуется устанавливать в пределах 0,075—0,125 мм.

Группа серебряных припоев (ВAg). Серебряные припои применяются для пайки всех черных и цветных металлов, за исключением алюминия, магния и других металлов с очень низкой температурой плавления. Эти припои применимы для всех способов пайки и в жидком состоянии обычно хорошо растекаются. Чтобы получить самое лучшее распределение припоя в соединении под действием капиллярного притяжения, соединительный зазор рекомендуется в пределах 0,05—0,125 мм. Применение флюса при пайке обязательно. Однако при некоторых процессах, в особенности, если пайка ведется припоем ВAg-8 в вакууме или в инертной атмосфере, флюс можно не применять.

### Серебряные припои

Марка припоя	Номинальный состав в %					Температура в °С		
	Ag	Cu	Zn	Cd	другие	Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
ВAg-1	45	15	16	24	—	607	618	620—760
ВAg-1a*	50	15,5	16,5	18	—	627	635	635—760
ВAg-2	35	26	21	18	—	607	702	705—845
ВAg-3	50	15,5	15,5	16	Ni3	646	688	690—815
ВAg-4	40	30	28	—	Ni2	671	779	780—895
ВAg-5	45	30	25	—	—	677	743	745—845
ВAg-6	50	34	16	—	—	688	774	775—870
ВAg-7	56	22	17	—	Sn5	618	652	653—760
ВAg-8	72	28	—	—	—	779	779	779—895
ВAg-9	65	20	15	—	—	693	718	720—845
ВAg-10	70	20	10	—	—	724	755	755—870
ВAg-11	75	22	3	—	—	740	788	787—895

\* Как дополнение к «Спецификации припоев».

*Припои ВAg-1 и 1a* свободно растекаются и плавятся при низких температурах; они применяются для пайки общего назначения.

Интервал температур плавления этих припоев очень узкий. После пайки припой в шве приобретает светло-желтый цвет.

*Припой ВAg-2* также свободно растекается по паяемой поверхности и применяется для пайки общего назначения, но при несколько повышенной температуре пайки. Более широкий интервал кристаллизации этого припоя позволяет выполнять пайку соединений с неравномерными зазорами, но необходимо принимать меры для предотвращения ликвации припоя. После пайки припой приобретает желтый цвет.

*Припой ВAg-3* широко применяется для припаивания твердосплавных пластин режущего инструмента к стальным державкам вследствие его способности смачивать поверхности твердых сплавов. Припой имеет широкий интервал кристаллизации, но его твердая и жидкая фазы не склонны к чрезмерной ликвации. Это позволяет применять припой для пайки соединений с большими зазорами или для получения валиков (галтелей). Припой обычно имеет хорошие антикоррозионные свойства, но растекается несколько хуже, чем припой ВAg-1 и ВAg-2. После пайки припой ВAg-3 приобретает беловато-желтый цвет.

*Припой ВAg-4* подобно припою ВAg-3 широко применяется для припаивания к резцам пластин из твердых сплавов, хотя при этом требуется несколько повышенная температура нагрева. В расплавленном состоянии припой более текуч, чем припой ВAg-3. После пайки припой приобретает светло-желтый цвет.

*Припои ВAg-5* и *ВAg-6* применяются для пайки металлов при повышенных температурах. Их можно применять в том случае, когда присутствие кадмия в составе припоя является вредным, например при пайке оборудования для пищевых продуктов. После пайки припой в шве имеет светло-желтый цвет.

*Припой ВAg-7* является промышленным припоем с низкой температурой плавления, который не содержит кадмия; применяется при пайке в печи. После пайки припой принимает беловатый цвет подобно цвету нержавеющей стали. Этот припой находит применение в молочной и пищевой промышленности, где содержание кадмия в швах паяных изделий не допускается. Припой ВAg-7 менее склонен вызывать при пайке коррозионное растрескивание под напряжением на нержавеющей стали и некоторых никелевых сплавах.

*Припой ВAg-8* применяется в тех случаях, когда припой не должен содержать легко испаряющихся элементов, как, например, при пайке вакуумных труб. Хотя этот припой свободно растекается, но плохо смачивает черные металлы. После пайки припой в шве имеет белый цвет.

*Припои ВAg-9, -10* и *-11* применяются обычно для соединения пайкой серебряных изделий. Эти три припоя имеют разную температуру плавления и могут применяться для ступенчатой пайки последовательных соединений. После пайки все припои в шве приобретают белый цвет.

Группа меднозолотых припоев (ВCuAu). Эти припои применяются преимущественно для соединения пайкой узлов

электронных трубок, где легко испаряющиеся элементы особенно нежелательны. Пайка электронных трубок этими припоями ведется индукционным методом, в печи или методом сопротивления в восстановительной атмосфере или вакууме без флюса. При других способах пайки применяют флюс из буры и борной кислоты. Для ступенчатой пайки имеются два меднозолотых припоя ВCuAu-1 и ВCuAu-2, допускающие изменения температуры пайки.

### Меднозолотые припой

Марка припоя	Номинальный состав в %		Температура в °С		
	Au	Cu	Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
ВCuAu-1	37,5	62,5	957	990	990—1090
ВCuAu-2	80	20	883	888	890—1010

Группа медных (ВCu) и медноцинковых припоев (ВCuZn). Медные и медноцинковые припои применяются для соединения пайкой различных черных и цветных металлов. Пайку можно производить различными способами. При пайке необходимо применять флюс, за исключением некоторых способов пайки в печи с соответствующей атмосферой. В качестве флюса обычно применяют смесь буры и борной кислоты. Соединительный зазор при пайке медноцинковыми припоями устанавливается в пределах 0,05—0,125 мм, а в случае медных припоев для получения плотного соединения рекомендуется зазор не более 0,05 мм.

При пайке медноцинковыми припоями следует избегать перегрева припоя, что может привести к испарению цинка и получению пористых швов.

Коррозионная стойкость медноцинковых припоев обычно отличается от коррозионной стойкости соединяемого основного металла, поэтому необходимо принимать во внимание условия работы паяных соединений при пайке этими припоями таких материалов, как медь, кремнистая бронза, медноникелевые сплавы или нержавеющей сталь.

*Медный припой* ВCu применяется для соединения пайкой черных металлов, никелевых и медноникелевых сплавов. В жидком состоянии медь очень хорошо растекается. Этот припой находит широкое применение для бесфлюсовой пайки в печи с атмосферой водорода или диссоциированного аммиака. Однако при пайке материалов, содержащих такие элементы, как хром, марганец, кремний, титан, ванадий, алюминий и цинк, которые образуют трудно восстанавливаемую окисную пленку, необходимо применять флюсы.

Оксиды меди, применяемые в качестве припоя в порошке, при нагреве в надлежащей печной атмосфере восстанавливаются, пла-



### Припои на медной основе

Марка припоя	Номинальный состав в %			Температура в °С		
	Cu	Zn	Другие	Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
BCu	99	—	—	1083	1083	1090—1150
BCuZn-1	60	40	—	900	905	910—955
BCuZn-2	57	42	Sn1	888	900	910—955
BCuZn-3	56	40	Sn1; Fe1; Mn1; Ni1	865	888	910—955
BCuZn-4	52,5	47,5	—	855	867	870—925
BCuZn-5	51,5	45	Sn3,5	863	877	880—925
BCuZn-6	48	42	Ni10	921	935	940—980
BCuZn-7	47	41,5	Ni10,5; Ag1	917	932	920—980

вятся и образуют паяные соединения, подобные соединениям, получаемым при пайке медным припоем BCu.

*Припои BCuZn-1, -2, -3, -4 и -5* применяются для пайки сталей, меди, медных сплавов, никеля, никелевых сплавов и нержавеющей стали. Пайку этими припоями можно производить горелкой в печи или индукционным методом.

*Припои BCuZn-6 и -7* обычно известны как белые припои и применяются для пайки сталей, никеля и никелевых сплавов. Пайку этими припоями можно производить любыми способами.

Группа магниевого припоя (BMg). Этот припой применяется для соединения пайкой магниевого сплава М1. Наиболее часто пайку производят горелкой, в печи или погружением, а в некоторых случаях и другими способами, за исключением пайки сопротивлением. Температуру нагрева при пайке необходимо точно контролировать, чтобы предотвратить расплавление основного металла. При всех способах пайки необходимо применять флюс.

### Магниевый припой

Марка припоя	Номинальный состав в %			Температура в °С		
	Mg	Al	Zn	Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
BMg	89	9	2	410	600	605—625

В большинстве случаев лучшим соединительным зазором считается зазор в пределах 0,10—0,25 мм. Коррозионная стойкость паяного соединения хорошая при полном удалении флюса после пайки. При

пайке в печи к этому припою добавляют небольшое количество бериллия, который предотвращает возгорание припою при плавлении. При пайке другими способами добавка в припой бериллия не требуется.

Группа жаропрочных никельхромовых (BNiCr) и серебряномарганцевых (BAgMn) припоев.

*Припой* BNiCr применяется главным образом для соединения нержавеющей стали и сплавов с высоким содержанием никеля, которые работают при повышенных температурах, например для пайки деталей турбореактивных двигателей. Этот припой также применяется для пайки углеродистых и низколегированных сталей. Соединительный зазор применяется в пределах 0,05—0,125 мм. Никельхромовый припой сохраняет свою жаропрочность в паяных швах при температуре до 1100° и обладает также очень высокими антикоррозионными свойствами. Припой применяется преимущественно для пайки в печи с контролируемой атмосферой сухого водорода без флюса, а также для пайки в печи в стандартной контролируемой атмосфере, но при этом необходимо применять флюс.

*Припой* BAgMn применяется главным образом для пайки нержавеющей стали и сплавов с высоким содержанием никеля. Он не обладает высокой прочностью при повышенных температурах, подобно припою BNiCr, но при температурах в пределах 260—480° имеет хорошую прочность. Соединительный зазор для пайки припоем BAgMn применяется в пределах 0,05—0,125 мм. Для получения лучших результатов этот припой рекомендуется применять при пайке в печи с восстановительной атмосферой.

**Никельхромовый и серебряномарганцевый припой**

Марка припою	Номинальный состав в %	Температура в °C		
		Солидус	Ликвидус	Интервалы температур пайки
BNiCr	Ni70; Cr16,5; B3,5; Fe+ +Si+C10	1010	1066	1090—1175
BAgMn	Ag85; Mn15	960	971	970—1150

#### ГЛАВА 4

### ФЛЮСЫ И АТМОСФЕРЫ

Паяльные флюсы способствуют образованию паяных соединений. В этом смысле флюсами могут быть также и газы, которые окружают паяемую деталь и создают активную или защитную атмосферу. В настоящей главе приведено описание флюсов и атмо-

сфер. Но принимая во внимание совершенно различные методы применения и характеристики, описание флюсов и атмосфер и табличные данные приведены раздельно.

Если металлы находятся на воздухе в незащищенном состоянии, то возникают химические реакции. При повышении температуры скорость этих реакций обычно повышается. В большинстве случаев при этом происходит реакция окисления, но в некоторых случаях могут иметь место реакции с образованием нитридов и даже карбидов. Степень окисления изменяется в зависимости от состава металла и природы окислов, т. е. от стойкости, структуры, прочности и других характеристик окисной пленки. На некоторых металлах окислы на воздухе образуются очень быстро даже при нормальной или более низкой температуре. Наличие на поверхности металла таких окислов или других химических соединений препятствует образованию качественных паяных швов.

### ФЛЮСЫ

Флюсы предназначены не для удаления окислов, масла, смазки и других загрязнений с деталей перед пайкой. Все соединяемые детали перед пайкой должны подвергаться соответствующим операциям очистки в зависимости от особенностей каждого металла (см. гл. 7).

Флюсы необходимы в процессе пайки для того, чтобы препятствовать образованию окислов или ослаблять действие окислов и других продуктов, которые образуются в процессе пайки, препятствуют пайке и так или иначе ослабляют паяное соединение. Флюс должен находиться в тесном соприкосновении с паемой поверхностью, чтобы препятствовать образованию окислов на этой поверхности при нагреве. Так как окисная пленка служит главным препятствием при пайке, то основная роль флюса заключается в том, чтобы растворить и удалить эту пленку в процессе пайки. При пайке флюс должен легко вытесняться из зазоров жидким расплавленным припоем и всплывать на его поверхность.

Важным свойством флюса при температуре пайки является его жидкотекучесть, вследствие чего жидкий припой вытесняет расплавленный флюс из зазора. Другим, родственным этому, свойством флюса является поверхностное натяжение, которое оказывает существенное влияние на смачиваемость припоем основного металла и на затекание припоя в шов. В некоторых случаях флюс может препятствовать испарению летучих компонентов в припое. Эти физические свойства флюса также очень полезны, в особенности при пайке горелкой, как показатели температуры нагрева деталей.

При пайке меди меднофосфористым припоем  $\text{VCuP}$  присутствующий в нем фосфор действует подобно флюсу. В этом случае пайку можно вести без применения флюса, но лучшие результаты получаются все же с применением флюса.

## Химические реактивы, обычно применяемые во флюсах

Описание паяльных флюсов преследует цель облегчить потребителю изучение свойств флюсов и таким образом обеспечить более эффективное их применение. Это не значит, конечно, что каждый потребитель сможет сам разрабатывать новые флюсы. Такая работа очень сложна и требует большого опыта и специального оборудования.

В состав флюсов входит большое число химических компонентов. Собственно флюс представляет собой смесь многих химических соединений, смешанных в определенных соотношениях, обеспечивающих удовлетворительные результаты. После перемешивания химических компонентов флюса (в особенности при нагреве в процессе пайки) между различными составляющими флюса происходят реакции. В результате этого окончательный раствор компонентов флюса при температуре пайки химически и физически совершенно отличен от первоначально смешанных составляющих. Так, например, если во флюсе присутствует фторборат в качестве составляющего компонента, то после смешения компонентов в нем образуются фториды, хотя они первоначально во флюс и не вводились.

В процессе пайки химические реакции проходят с большой скоростью. Находящиеся во взаимном соприкосновении флюс, основной металл, припой и газообразные продукты реагируют между собой, причем скорость этой реакции возрастает с повышением температуры. Составные части флюса должны действовать таким образом, чтобы соответствовать всем требованиям процесса пайки, в том числе и фактору времени. Флюс не должен слишком сильно растворять основной металл при температуре пайки и должен сохранять свои свойства достаточно долго, чтобы обеспечить надлежащее паяное соединение.

Активные галоиды, такие как хлориды и фториды, необходимы, например, во флюсах для пайки алюминия и других электроположительных металлов (см. табл. 3 типы 1, 2, 4 и 6). Некоторые особо активные флюсы следует готовить непосредственно перед употреблением, чтобы избежать реакции между компонентами флюса во время хранения.

Приводимый ниже список химических компонентов включает наиболее распространенные составные части, входящие в состав флюсов (описание основных свойств этих компонентов приведено ниже):

- бораты (натрия, калия, лития и др.);
- плавленая бура;
- кислота (борная, прокаленная борная);
- фторбораты (калия, натрия и др.);
- фториды (калия, натрия, лития и др.);
- хлориды (натрия, калия, лития);
- щелочи (гидроокись калия, гидроокись натрия);
- смачивающие компоненты;
- вода (или как кристаллизационная, или как добавляемая для превращения флюса в пастообразное состояние).

Бораты полезны во флюсах с высокой температурой плавления. Они хорошо растворяют окислы и обеспечивают защиту основного металла от окисления при нагреве в течение длительного периода времени. Большинство боратов плавится и эффективно действует при температуре около 760° или выше. Даже в расплавленном состоянии бораты обладают относительно высокой вязкостью и поэтому должны применяться в смеси с другими солями.

Бура имеет высокую температуру плавления и активна при высоких температурах пайки. Бура редко применяется в низкотемпературных паяльных флюсах.

Борная кислота является основным компонентом многих паяльных флюсов, применяется в обычном, а иногда в прокаленном виде. Прокаленная борная кислота реагирует подобно обычной, но имеет несколько более высокую точку плавления. Борная кислота действует главным образом как компонент, очищающий поверхность от окислов. Однако она применяется как составная часть флюса, так как улучшает его вязкость. Кроме того, борная кислота облегчает удаление стекловидных остатков флюса после пайки. Температура плавления борной кислоты ниже, чем температура плавления других боратов, но выше, чем температура плавления фторидов.

Фторбораты реагируют во многих отношениях подобно боратам. Однако они не обеспечивают настолько же эффективную защиту от окисления, как бораты. В расплавленном состоянии они лучше растекаются и обладают большей способностью растворять окислы, чем бораты. Фторбораты применяются во флюсах в смеси с боратами и карбонатами. Важным компонентом во флюсах является фторборат кремния. Этот препарат имеет более высокую температуру плавления, чем другие фторбораты и обеспечивает хорошее покрытие и смачивание поверхности металла. Высокая температура плавления ограничивает его применение во флюсах. (Соответствующие рекомендации по фтористым составляющим паяльных флюсов см. в гл. 23).

Фториды легко реагируют при повышенных температурах почти со всеми окислами металлов и поэтому часто применяются в качестве составной части флюсов как очищающий компонент. Их применение особенно важно в тех случаях, когда необходимо удалять с поверхности металлов такие тугоплавкие окислы, как окислы хрома, алюминия и др. Кроме очистки поверхности от окислов, фториды увеличивают жидкотекучесть расплавленных боратов, улучшая капиллярное затекание жидкого припоя. (Рекомендации по фтористым составляющим в паяльных флюсах см. в гл. 23).

Хлориды действуют подобно фторидам. Они дешевле, но менее эффективны по сравнению со фторидами. Хлориды следует применять со знанием дела, так как при повышенных температурах они имеют склонность окислять поверхности некоторых металлов.

Щелочи, такие, как гидроокиси калия и натрия, находят ограниченное применение во флюсах вследствие их высокой гигро-

скопичности, т. е. способности поглощать влагу из воздуха. Даже небольшие добавки щелочи к флюсу делают его гигроскопичным. Поэтому при пайке с флюсом, содержащим щелочи, необходимо рабочую температуру пайки несколько повышать.

Смачивающие компоненты применяются в пастообразных и жидких флюсах для того, чтобы облегчить смачивание флюсом паяемого изделия перед пайкой. Смачивающие компоненты не должны оказывать вредного влияния на свойства паяльного флюса.

Вода присутствует в паяльных флюсах или в форме кристаллизационной воды, входящей в состав применяемых компонентов, или добавляется отдельно во флюс для того, чтобы сделать его пастообразным или жидким. Если входящая в состав компонентов флюса кристаллизационная вода нежелательна, то ее удаляют прокаливанием этих компонентов. Вода, добавляемая во флюс для образования пасты, должна быть соответствующего качества; чрезмерно жесткую воду для этой цели применять не следует. Если для перемешивания флюса нельзя применить воду, то с соответствующими предосторожностями можно употреблять спирт.

### Основания для выбора флюса

Важным фактором при выборе флюса являются экономические соображения. Цена флюса не является в настоящем разделе предметом обсуждения, но следует иметь в виду, что выбор и техника применения флюса в большой степени определяют время и качество пайки. Пока еще не существует универсального флюса, одинаково пригодного для пайки всех материалов. Так как много различных факторов определяет пригодность флюса, как-то: паяемый металл, припой, способ пайки, время, необходимое для пайки, сложность конструкции соединения и другие, то требуется много различных составов флюсов, каждый из которых отличается от другого и имеет свои оптимальные характеристики для конкретных случаев. Однако эти составы флюсов могут быть классифицированы и сведены в шесть групп соответственно их характеристикам.

В табл. 3 перечислены эти группы с указанием номеров по спецификации AWS, определяющих каждую группу. Так как область применения каждой группы флюсов очень широка, то обычно один состав флюса не может наилучшим образом удовлетворить всем предъявляемым к нему требованиям, но каждый состав флюса (за редким исключением) может быть определен соответствующим номером и даст удовлетворительные результаты при применении в широких пределах заданного диапазона.

По данным изготовителей флюсов табл. 3 составлена на основании широкого обзора имеющихся флюсов. Эта таблица предлагается в качестве руководства при выборе флюсов для конкретного применения. Табл. 3 не ограничивает возможности проведения широких исследований по вопросу определения оптимального состава флюса для получения высококачественного соединения,

## Флюсы для пайки\*

**Важно:** перед применением флюса все материалы должны быть очищены (см. текст).

Типы плавящих флюсов по AWS	Основной металл, на котором рекомендуется применять флюс	Припой, с которым рекомендуется применять флюс	Максимальная температура в °С	Минимальная температура в °С	Составные части флюса (флюс может содержать все указанные компоненты или часть из них)	Вид флюса в состоянии поставки	Применяемая форма флюса
1	Все поддающиеся пайке алюминиевые сплавы	BAISi	640	370	Хлориды, фториды	Порошок	I, II, III, IV
2	Все поддающиеся пайке магниевые сплавы	BMg	650	480	Хлориды, фториды	Порошок	III, IV
3	Все сплавы, за исключением перечисленных в пп. 1, 2, 4 и 6**	Все припои, за исключением указанных выше	1090	370	Борная кислота, бораты, фториды, фторобораты, смазывающие компоненты	Паста, порошок, жидкость	I, II, III
4	Такие сплавы, как*** алюминевые бронзы, алюминиевые латуни, содержащие 0,5% алюминия или более	BAg, VSiZn, VSiP	980	565	Хлориды, фториды, бораты, смазывающие компоненты	Паста, порошок	I, II, III
5	То же, что и для типа 3	То же, что и для типа 3, за исключением высоко-температурных и серебряных припоев от BAg-1 до BAg-7	1200	540	Бора, борная кислота, бораты, смазывающие компоненты, не содержащие фтора в любой форме	Порошок, паста, жидкость	I, II, III
6	Сплавы на основе титана и циркония	BAg	870	370	Хлориды, фториды, смазывающие компоненты	Паста, порошок	I, II, III

## Форма применения флюсов

- I. Сухой флюс в виде порошка на место соединения.
- II. Нагретый пруток припой погружать в порошок или пасту.
- III. Перемешивать с различными растворителями, такими как вода, спирт, монохлорбензол и другие, для образования пасты или суспензии.
- IV. Ванна из расплавленного флюса.

\* Эта таблица является руководством по классификации большинства флюсов, применяемых в технике. Пригодные для применения флюсы для выбора флюса в специальных случаях. Поэтому гл. 4 должна быть тщательно изучена.

\*\* Некоторые флюсы типа 3 специально рекомендуются для металлов, перечисленных в п. 4.

\*\*\* Для этих материалов можно применять смесь флюсов типов 1 и 2. В некоторых случаях можно пользоваться флюсом типа 1.

К поставляемому флюсу должны прилагаться рекомендации поставщиков, а при отсутствии опыта рекомендуется производить пробу для выявления свойств флюса. Для успешного применения флюс должен быть химически совместимым как с основными металлами, так и с припоями, применяемыми с данным флюсом, и максимально активен в пределах температурного интервала пайки.

Для основного металла, определенного припоя или температуры пайки по табл. 3 можно выбрать один или несколько необходимых флюсов. Если выбранные флюсы не удовлетворяют предъявленным к ним требованиям, то можно применить их комбинацию. Когда рекомендуется более одного флюса, то для окончательного выбора необходимо учитывать стоимость флюса и технику безопасности работы с ним (см. гл. 23).

Для выбора специального флюса с максимальной эффективностью из числа рекомендованных спецификацией AWS имеются следующие критерии:

1) флюсы, применяемые при пайке погружением, не должны содержать воды (включая и кристаллизационную);

2) флюсы при пайке методом сопротивления должны проводить ток;

3) максимальная эффективность флюса должна проявляться при температурах, лежащих в пределах интервала температур пайки. Важно, чтобы температурные границы эффективности флюса не выходили ни за нижний, ни за верхний пределы температур пайки. Если время пайки продолжительно, то необходимо применять флюс менее активный и действующий длительное время. При быстром, например, индукционном нагреве для пайки надо пользоваться более активным флюсом, а продолжительность его действия уже не имеет существенного значения. В случае применения безокислительной атмосферы продолжительность жизни флюса удлинится;

4) необходимо учитывать легкость удаления остатков флюса после пайки;

5) при выборе флюса следует предусматривать, чтобы его коррозионное действие как на основной металл, так и на припой было минимальным.

### **Способы применения флюсов**

Флюсы для пайки в основном применяются в виде порошка, пасты или жидкости. Выбор способа применения флюса зависит от формы паяемой детали и применяемого способа пайки.

Обычно для приготовления пасты используют воду или спирт, в которых замешивают порошкообразный флюс. Порошок можно также применять в сухом виде, насыпая его на место пайки, хотя в этом случае не бывает хорошего сцепления с паяемым металлом. Сухой порошкообразный флюс можно также наносить на паяемое соединение при помощи нагретого конца пруткового припоя, окуная его в банку с флюсом. При пайке погружением в соляную ванну также применяется сухой порошкообразный флюс.

Флюс в виде пасты, очевидно, является наиболее употребительной формой. Такой флюс можно легко наносить перед пайкой на



припой и паяемое изделие; он хорошо с ними сцепляется. Разведенная паста применяется в том случае, когда флюс необходимо нанести на соединение при помощи распыления.

Для получения жидкого флюса (см. флюс типа З' в табл. 3) необходимо, чтобы все составные части его полностью растворились в воде.

Важной характеристикой сухого или пастообразного флюса является размер его частиц. Наилучшее флюсующее действие наблюдается в том случае, когда частицы флюса имеют минимальный размер и хорошо перемешаны. Полезно непосредственно перед пайкой произвести размол или тщательное перемешивание приготовленного флюса в шаровой мельнице или фарфоровой ступке.

Жидкий флюс типа 5 применяется почти исключительно при пайке горелкой. Горючий газ горелки пропускают через резервуар с жидким флюсом, в результате чего газ насыщается парами флюса. В процессе пайки газ сгорает, а флюс оседает на паяемую деталь в месте соединения. Обычно жидкий флюс применяется совместно с небольшим количеством другого флюса, предварительно нанесенного вокруг паяемого соединения.

Успешно применяются также смеси порошкообразного припоя и флюса, которые очень удобны для одновременного присаживания в место соединения припоя и флюса.

### Удаление остатков флюса

Остатки флюса после пайки необходимо удалить, чтобы устранить возможность коррозионного разрушения паяного соединения химически активными компонентами флюса. Остатки флюса, в особенности, когда с паяемой поверхности удаляется толстая окисная пленка, приобретают стекловидную форму. Чем меньше требуется флюса для хорошо очищенного перед пайкой металла, тем меньше будет стекловидных остатков и легче задача удаления этих остатков.

Остатки флюса удаляются обычно после полностью завершенного процесса пайки путем промывки спаянных деталей в горячей воде. После промывки детали рекомендуется тщательно просушить.

Остатки флюса в виде стекловидной пленки малой толщины можно удалять промывкой паяных изделий в холодной воде, прежде чем изделия полностью охладятся после пайки. Это создает тепловой удар, который приводит к растрескиванию и удалению остатков флюса. Такой метод удаления остатков флюса неприменим в том случае, когда происходящая при этом термообработка ухудшает прочность паяных соединений. Трудноудаляемые остатки флюса можно снимать химической обработкой паяных соединений в специальных ваннах. Вопросы химической очистки освещены в специальных главах.

Механические методы удаления остатков флюса применяются обычно в том случае, когда остатки флюса образовали прочную стекловидную пленку, которую невозможно удалить другими спо-

собами. Среди механических средств применяются фибровая щетка, проволочная щетка, пескоструйная обдувка, дробеструйная обработка, обдувка паром и даже отбивка молотком и зубилом. При этом необходимо соблюдать предосторожность, чтобы не повредить основной металл и полностью удалить остаток флюса. Мягкие металлы, например алюминий, повреждаются частицами остатков флюса.

Совершенно очевидно, что применение флюса в надлежащем количестве облегчит удаление его остатков. Если опыт показывает, что для удаления остатков флюса нужно применять более сложные методы, следует применять флюс в количестве, не превышающем необходимую норму.

### КОНТРОЛИРУЕМЫЕ АТМОСФЕРЫ

Назначение контролируемых атмосфер заключается в том, чтобы предотвращать образование окислов при нагреве, а в большинстве случаев и восстанавливать имеющиеся окислы на припое и основном металле в процессе пайки, чтобы припой мог смачивать основной металл и затекать в зазоры.

Подобно флюсам контролируемые атмосферы не предназначаются преимущественно для удаления с поверхности паяемого металла толстой окисной пленки, грязи и масла. Все это должно быть удалено с поверхности металла путем очистки перед пайкой в соответствии со специфическими свойствами каждого материала (см. гл. 7). Обычно контролируемые атмосферы применяются при пайке в печи (см. гл. 1). Однако их можно также применять при индукционной пайке и пайке методом сопротивления в специальных случаях. В случае применения для пайки только контролируемой атмосферы (без флюса) изделия получают совершенно чистыми и очистка их после пайки не требуется. В тех случаях, когда флюс необходим, контролируемые атмосферы даже желательны, так как продолжительность действия флюса при этом увеличивается, а очистка деталей после пайки сводится к минимуму.

Применение контролируемых атмосфер устраняет образование окислов и окалины по всей поверхности детали после пайки, и поэтому во многих случаях можно производить окончательную механическую обработку деталей перед пайкой. В некоторых случаях, например при производстве электронных трубок, очень важно не применять флюс. Некоторые типы установок и оборудования (как, например, металлические муфельные печи, вакуумные системы) сильно повреждаются или загрязняются, если на них попадает флюс.

Пайка в среде контролируемых атмосфер широко применяется для получения высококачественных паяных соединений. Пайкой в печи в контролируемой атмосфере можно соединять детали большого веса, выполненные из различных материалов.

Смеси некоторых атмосфер с воздухом взрывоопасны в широком диапазоне температур. Перед нагревом из реторты, содержащей

любую из таких атмосфер при температуре ниже  $700^{\circ}$ , необходимо тщательно удалить воздух. Например, смесь водорода с воздухом при содержании водорода в пределах от 4 до 75% взрывоопасна. Исползованную атмосферу следует или сжигать или быстро разбавлять воздухом путем соответствующей вентиляции.

В случае применения металла или флюса, содержащих токсичные элементы, необходимо соблюдать меры предосторожности, указанные в гл. 23. Некоторые атмосферы содержат угарный газ (CO), который является отравляющим. Поэтому при использовании таких атмосфер требуется хорошая вентиляция. Исползованную атмосферу с угарным газом необходимо сжигать или удалять путем вентилирования.

### Состав контролируемых атмосфер

В табл. 4 приведены десять рекомендованных типов атмосфер. Примерный состав указан для первых семи типов атмосфер. Эти типы атмосфер расположены в таблице в порядке возрастания трудности их получения и поддержания.

Первые четыре типа из перечисленных атмосфер приготавливаются путем пропускания замеренного количества смеси газообразного углеводорода и воздуха в реторту для реакции горения. В случае природного газа отношение количества воздуха к газообразным углеводородам может составлять 9,5 к 1, а для специально приготовленных атмосфер 2 к 1. В случае смесей, у которых это отношение находится в пределах от 5 к 1 и 9,5 к 1, происходит экзотермическая реакция и выделяющегося тепла достаточно для поддержания реакции. Для смесей, более богатых природным газом, чем при отношении около 5 частей воздуха на 1 часть газа, необходим дополнительный подогрев, а в реторту, где происходит реакция, следует помещать катализатор. Такой тип реакции называют эндотермическим. В результате реакции бедной смеси, состоящей из 9,5 частей воздуха и 1 части газа, получается продукт, который содержит слишком много молекул кислорода и потому не может быть использован в качестве контролируемой атмосферы для пайки. После сгорания таких воздушно-газовых смесей воду из них можно удалить или при помощи охлаждения или путем применения осушителя абсорбционного типа, чтобы понизить точку росы полученного газа до нужного значения. Если это необходимо, то из применяемой атмосферы газ  $\text{CO}_2$  можно удалить.

Атмосфера AWS тип 5 получается путем диссоциации сухого аммиака ( $\text{NH}_3$ ) в нагретой реторте с катализатором. Если аммиак не очень сухой, то полученный газ нужно осушить.

В табл. 4 указано также, для каких припоев и металлов можно применить ту или иную атмосферу.

Для специальных случаев применения атмосфер надо учитывать рекомендации поставщиков материалов и припоев. Для получения хороших результатов атмосфера для пайки должна хорошо подходить как для паяемого материала, так и для припоя. Применяемое

## Атмосферы для пайки металлов

Типы атмосфер для пайки по AWS	Наименование атмосфер	Максимальная точка росы входящего газа °С	Примерный состав в %				Применение		Примечание
			Н <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	СО	СО <sub>2</sub>	припои	основные металлы	
1	Сгоревший газ (с небольшим содержанием водорода)	Нормальная температура	5—1	87	5—1	11—12	Ваg*, ВCuP, ВCuZn*	Медь, латунь*	
2	Сгоревший газ (обезуглероживающий)	То же	14—15	70—71	9—10	5—6	ВCu, Ваg*, ВCuZn*, ВCuP	Медь**, латунь*, малоуглеродистые стали, никель, монель, среднеуглеродистые стали***	Обезуглероживает
3	Сгоревший газ, осушенный	—40	15—16	73—75	10—11	—	Те же, что и с 2	Те же, что с 2 плюс средне- и высокоуглеродистые стали монель и никелевые сплавы	
4	Сгоревший газ, осушенный (науглероживающий)	—40	38—40	41—55	17—19	—	Те же, что и с 2	Те же, что и с 2 плюс средне- и высокоуглеродистые стали	Науглероживает
5	Диссоциированный аммиак	—54	75	25	—	—	Ваg*, ВCuZn*, ВCu, ВCuP, ВNiCr	Те же, что с 1, 2, 3, 4 плюс сплавы, содержащие хром****	
6	Технический водород	Нормальная температура	97—100	—	—	—	Те же, что с 2	Те же, что с 2	Обезуглероживает

7	Водород, осушенный и очищенный от кислорода	-60	100	--	--	Те же, что с 5	Те же, что с 5 плюс сплавы кобальта, хрома, вольфрама и карбиды***	Для специальной цели. Может применяться с атмосферой 1 до 7 во избежание применения флюса
8	Вещества, легко испаряющиеся при нагреве	Пары неорганических элементов (цинка, кадмия, лития) и летучих фторидов				Ваг	Латунь	Для специальной цели. Может применяться с атмосферой 1 до 7 во избежание применения флюса
9	Очищенный инертный газ	Инертный газ (гелий, аргон и др.)				Те же, что с 5	Те же, что с 7 плюс титан, цирконий, гафний	Для специальной цели. Детали должны быть очень чистыми. Атмосфера должна быть очищена
10	Вакуум	Вакуум				Любые металлы, которые при нагреве не испаряются	Любые металлы, которые при нагреве не испаряются	Для специальной цели. Требуется сложное оборудование и сложная технология

\* Если применяются сплавы, содержащие летучие компоненты, то дополнительно к атмосфере требуется применять флюс.

\*\* Медь должна быть полностью бескислородной или очищенной от кислорода. См. гл. 2 и 14.

\*\*\* Время нагрева должно быть минимальным, чтобы устранить обезуглероживание.

\*\*\*\* Дополнительно к атмосфере нужно применять флюс, если основные металлы содержат в себе хотя бы небольшие количества алюминия, титана, кремния или бериллия.

для получения нужной атмосферы оборудование не должно загрязнять ее в процессе пайки.

Ниже приведено описание отдельных компонентов, входящих в состав атмосферы, применяемой для пайки.

**Водород ( $H_2$ ).** Водород является активным компонентом, восстанавливающим окислы большинства металлов при повышенных температурах. Однако его присутствие вредно для некоторых металлов вследствие возникновения в них водородной хрупкости, как описано в гл. 2 и других разделах по паяемым металлам.

**Окись углерода ( $CO$ ).** Окись углерода является активным компонентом, восстанавливающим окислы таких металлов, как железо, никель, кобальт и медь, при повышенных температурах. Окись углерода может служить желательным источником углерода при пайке углеродистых сталей, а в других случаях нежелательна вследствие разложения ее на углерод и кислород. Окись углерода может образовываться так же, как примесь при сгорании масла, оставшегося на деталях, при нагреве их до температуры пайки. Окись углерода является ядовитым газом, поэтому при работе с ней необходима хорошая вентиляция.

**Углекислый газ ( $CO_2$ ).** Углекислый газ применяется как инертный разбавитель атмосферы для пайки в рекомендованных ранее случаях. Его присутствие нежелательно, если он разлагается на кислород, углерод и окись углерода. Содержание углекислого газа в атмосфере пайки может нежелательно увеличиваться при просачивании в нее воздуха.

**Азот ( $N_2$ ).** Азот в контролируемой атмосфере служит инертным разбавителем атмосферы при пайке определенных материалов. Присутствие азота в атмосфере пайки не допускается, если паяемый материал образует с ним нитриды.

**Пары воды.** Допустимое содержание паров воды в атмосфере пайки устанавливается путем определения точки росы этой атмосферы, т. е. температуры, при которой содержащаяся в газе влага конденсируется. Влага из газа должна быть полностью удалена, за исключением тех случаев, когда обезуглероживание при пайке является полезным. Пары воды могут проникать в атмосферу при подсосе воздуха, заноситься с воздухом при установке в печь паяемых деталей, при восстановлении окислов металла, при утечке из водяного кожуха, при загрязнении газопровода, при диффузии кислорода через плохую заслонку и другие менее очевидные источники. Пары воды являются нежелательным источником кислорода, особенно при пайке хрома, цинка, магния, кремния, алюминия, титана, марганца или сплавов на основе бериллия. На этих металлах в присутствии воды образуются окисные пленки, препятствующие смачиванию и растеканию припоя.

**Кислород ( $O_2$ ).** Кислород может проникать в печь в качестве нежелательной примеси к атмосфере при просачивании воздуха, а также при загрузке в печь деталей; свободный кислород может выделяться при нагреве из поверхностей паяльной камеры. Присутствие кислорода в атмосфере для пайки крайне нежелательно.

**Метан (СН<sub>4</sub>).** Метан может образоваться в атмосфере пайки или получаться от сгорания масла на деталях, плохо очищенных перед пайкой. Его можно также специально добавлять в применяемую атмосферу после соответствующей очистки. Метан служит источником углерода и водорода (при разложении).

**Пары неорганических веществ.** В установке, сконструированной для их использования, пары таких элементов, как цинк, кадмий, литий или пары веществ, содержащих фториды, служат восстановителями окислов металлов или применяются для очистки атмосферы, содержащей кислород. Пары этих элементов успешно применяются для восстановления окислов на сплавах во время пайки. Эти пары токсичны (см. гл. 23).

**Инертные газы.** Инертные газы, например гелий, аргон и криптон, не реагируют с металлами. В установке, сконструированной для их применения, эти газы препятствуют испарению летучих компонентов во время процесса пайки и допускают применение менее прочных реторт, чем требуется при вакуумной пайке. Инертные газы в состоянии поставки иногда содержат нежелательные пары воды; в этом случае газы необходимо осушать.

**Вакуум.** При пайке в газе, разреженном до соответствующего низкого давления (одна миллионная атмосферного давления или еще ниже), с учетом газов, выделяющихся во время нагрева до температуры пайки, получаются очень чистые поверхности. Пайка в вакууме особенно полезна при производстве вакуумных электронных ламп, а также при пайке металлов, окислы которых легко испаряются, являются неустойчивыми или растворяются в металле при нагреве до температуры пайки.

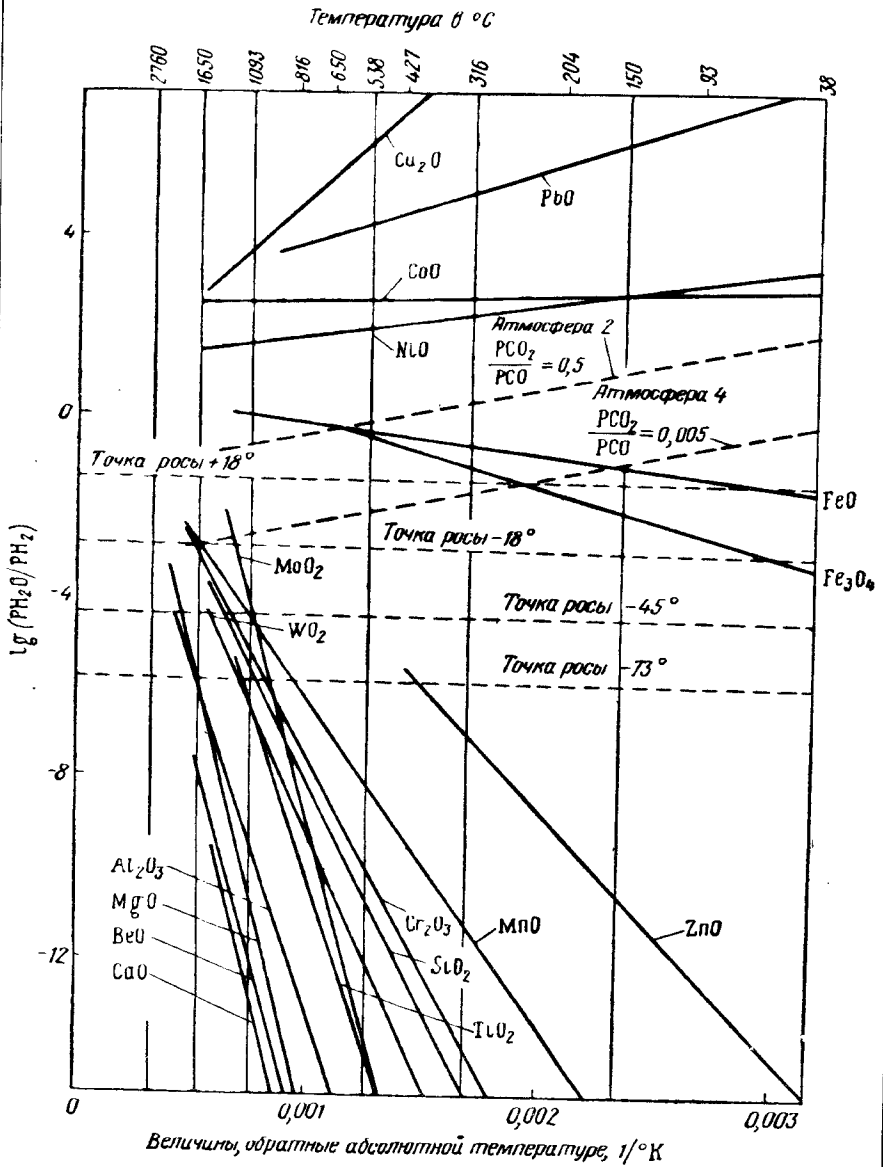
В дополнение к компонентам, указанным в табл. 4, можно еще назвать и серу.

**Сера (S).** Сера или сернистые соединения могут реагировать с металлами, применяемыми для пайки, ухудшая их смачиваемость. Сернистые соединения могут попадать в атмосферу для пайки из применяемого для нагрева газообразного топлива, из воздуха, сгорающего с этим топливом, из смазки, остающейся на поверхностях паяемых деталей в результате небрежной очистки, из кирпичной кладки печи и других материалов, используемых в конструкции горячей части печи.

### **Физико-химические основы окисления металлов**

На фиг. 14\* графически изображены результаты термодинамических расчетов равновесного состояния системы окислы металлов—газ. По ординате отложены логарифмы отношения парциального давления водяных паров к парциальному давлению водорода, а по абсциссе — величина, обратная абсолютной температуре, а также указана температура в градусах Цельсия. Для

\* Взята из отчета технологического института «Литературный обзор и промышленное применение пайки», № 90—1060В.



Фиг. 14. График равновесного состояния окислов в контролируемой атмосфере.



каждого окисла нанесены линии, представляющие собой границу равновесного состояния между металлом и его окислом. Значения температур и точек росы, расположенные ниже этих линий, характеризуют собой условия, при которых данный окисел может быть восстановлен водородом. Выше этих линий металл, о котором идет речь, может быть окислен парами воды.

Из фиг. 14 видно, что точка росы оказывает большое влияние на равновесие металлических окислов таких металлов, как марганец, хром и кремний. Например, окись хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) находится в равновесии с газообразным водородом, имеющим точку росы  $-18^\circ$ , когда основной материал нагрет до температуры примерно  $1650^\circ$ ; при точке росы газообразного водорода  $-45^\circ$  равновесие наступает при нагреве основного металла до  $1260^\circ$ , а при точке росы  $-73^\circ$  температура основного металла для равновесия должна быть около  $955^\circ$ . Для восстановления окиси хрома и получения чистой и подготовленной для пайки поверхности точка росы водорода при температуре пайки должна быть ниже равновесного значения. Эффективность действия атмосфер типов 2 и 4 также показана для определенного отношения парциальных давлений  $\text{CO}_2$  к  $\text{CO}$ . Совершенно ясно, что осушенный водород является гораздо более эффективным восстановителем, чем окись углерода.

Приведенные кривые помогают понять действие водорода и водяных паров при соответственном восстановлении металлических окислов и окислении металлов, но они не дают полной характеристики контролируемых атмосфер. Эти кривые не указывают ни скорости, с которой будет происходить восстановление, ни физической формы окисла. Кривые показывают, возможно ли при данной температуре удаление окислов с поверхности металлов по принятой химической реакции при условии указанных состава газа и температуры. Предполагается, что в каждом случае окисел восстанавливается до металла в одну стадию.

Возможно также, что сложные металлические окислы могут вести себя совершенно отлично от составляющих их простых окислов. Следует отметить, что окислы алюминия, магния, бериллия, кальция и титана способны восстанавливаться только при очень высоких температурах в атмосфере с очень низкой точкой росы. Обычно равновесная температура значительно выше обычной температуры пайки. Если паяемый металл содержит небольшое количество этих элементов (ниже 0,5%), то пайка его происходит удовлетворительно. Но если в паяемом металле имеется большее количество указанных элементов, то наряду с атмосферой необходимо применять и флюс или покрывать паяемые поверхности гальваническим покрытием, чтобы закрыть трудно восстанавливаемые окислы.

Данные фиг. 14 находятся в грубом соответствии с действительными наблюдениями. Заметным отклонением является то, что медь окисляется при температурах между  $65-180^\circ$  даже в водородной атмосфере с точкой росы ниже  $-18^\circ$ . Необходимо иметь в виду, что опыты по пайке в контролируемой атмосфере не дают точных ре-

зультатов, если не принимать чрезвычайных мер по предотвращению загрязнения атмосферы. Некоторые из загрязняющих компонентов, которые могут встретиться, упомянуты в разделе «Состав контролируемых атмосфер». Другая трудность при проведении опытов по исследованию атмосфер заключается в том, что очень трудно или почти невозможно производить анализ газов при температуре пайки в непосредственной близости от паяемых изделий.

Строгая теоретическая обработка результатов опытов должна включать реакции не только восстановления газом металлических окислов, но и все возможные другие реакции — между окислом и металлом, между металлом и атмосферой, а также процессы, происходящие вследствие неустойчивости окислов. Влияние сплавляющихся элементов, входящих как в паяемый материал, так и в припой, помимо всего прочего, усложняет проблему. Когда будет найдено решение всех этих проблем, можно будет заранее выработать требования, предъявляемые к контролируемой атмосфере для каждого случая пайки. Между тем рекомендациями поставщиков материалов и оборудования следует пользоваться тогда, когда встречаются затруднения или разрабатывается максимально эффективный и высокопроизводительный процесс пайки.

Для наибольшей эффективности процесса пайки можно выбирать многие различные комбинации основного металла и припоя, применяя подходящую стандартную контролируемую атмосферу и обходясь при этом без тщательного контроля атмосферы, который представляет потенциальный источник трудностей.

### **Основания для выбора атмосферы**

В основном атмосферу следует выбирать по табл. 4 для рекомендованных материалов и припоев, применяемых для пайки. Сноски, помещенные под таблицей, имеют очень важное значение и должны быть учтены при разработке состава атмосфер. Когда паяемый металл чувствителен к науглероживанию или обезуглероживанию (см. гл. 15, 16 и 17), то применяемая атмосфера и температура пайки должны выбираться с таким расчетом, чтобы указанные реакции места не имели.

Если применяемый для пайки металл может охрупчиваться при воздействии на него водорода (см. гл. 2 и 14) или химически соединяться с водородом (например, тантал), то количество водорода в применяемой атмосфере должно быть ниже соответствующего максимального значения.

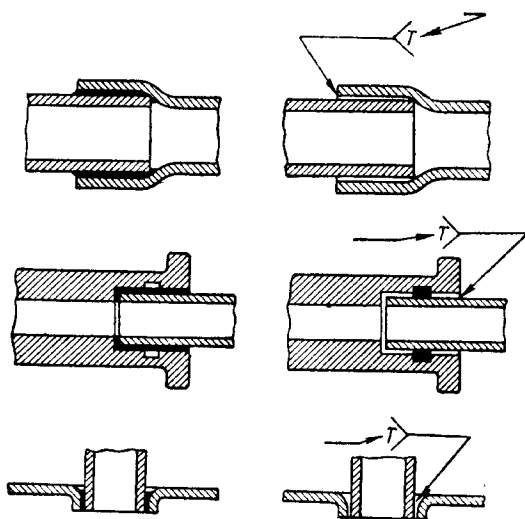
Наиболее широко контролируемая атмосфера применяется при пайке стали медью (BCu). В этом случае можно успешно применять атмосферы типов 1, 2, 3, 5 или 6 (см. табл. 4) в зависимости от состава стали и предъявляемых к ней требований.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ПАЙКУ

Для успешного протекания процесса пайки важно, чтобы соединение под пайку было надлежащим образом спроектировано. Правильно спроектированное соединение должно выдерживать рабочие нагрузки, воздействующие на него в процессе эксплуатации, и не вызывать неудобств при сборке отдельных деталей в условиях производства. Поэтому производственные предприятия и инженеры-проектировщики должны работать в тесном содружестве.

Конструктор может лучше всего донести свою идею до производителя, пользуясь стандартными обозначениями, установленными Американским обществом сварщиков. Эти обозначения служат средством для указания требуемой технологии пайки. Если необходимо, то на чертежах должны быть сделаны дополнительные эскизы и примечания, уточняющие подготовку деталей к пайке и конфигурацию паяного соединения (фиг. 15).

Конструкторам настоятельно рекомендуется ознакомиться с другими главами настоящей книги, чтобы лучше все уяснить и давать в чертежах соответствующие соображения в отношении сборки, размещения припоя и выбора процесса пайки.



Фиг. 15. Примеры применения обозначений на чертежах.

Справа показан чертеж соединения до пайки, а слева — желательный вид соединения после пайки. Указания по технологии процесса пайки следует помещать в месте, указанном буквой Т.

## КОНСТРУКЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ

Конструкция подлежащего пайке соединения зависит от большого числа факторов, наиболее важными из которых являются:

- 1) основной материал и припой;
- 2) типы соединений;
- 3) эксплуатационные требования, как-то: механическая прочность,

электропроводность,  
герметичность,  
характеристики при повышенных и отрицательных (ниже нуля)  
температурах.

Приводимые ниже сведения являются основными и могут быть использованы для большинства обычно применяемых металлов и классов припоев.

### Выбор основного металла и припоя

Предполагается, что конструктору полностью известны основные характеристики паяемых изделий или агрегатов и их основное назначение. Из оценки этих данных выбирают основной металл, который лучше всего отвечает необходимым требованиям.

Для пайки любого из наиболее широко применяемых материалов имеются один или несколько припоев. В табл. 5 приведены основные металлы и рекомендуемые припои для пайки как однородных, так и разнородных материалов.

Иногда для пайки данного узла можно выбрать несколько припоев, чтобы произвести пайку по соседству с ранее паяными соединениями без разрушения первоначальных паяных швов. При этом припои с высокой температурой плавления применяются для пайки первоначальных соединений, а для пайки последующих швов применяются припои с более низкой температурой плавления. Такая пайка называется *ступенчатой*.

При пайке разнородных материалов необходимо соблюдать меры предосторожности. Так, при пайке материалов с различными коэффициентами термического расширения особое внимание необходимо уделять тому, чтобы не возникали термические напряжения, которые могут вызвать разрушение основного металла или паяного соединения во время или после пайки.

### Типы соединений

Выбор конструкции соединения для специальных целей в большой мере определяется условиями эксплуатации паяного узла, но может также зависеть от таких факторов, как применяемый способ пайки, техника и оборудование для пайки, количество подлежащих пайке деталей, метод размещения припоя и т. д. Если условия эксплуатации паяного соединения жесткие, то паяное соединение должно быть равно по прочности или прочнее наиболее слабой детали паяемого узла.

Механические свойства припоя в соединении редко соответствуют механическим свойствам подлежащего пайке материала. Удельная прочность припоя иногда бывает выше удельной прочности паяемого металла, но обычно она ниже. На прочность паяного соединения большое влияние оказывают также соединительный зазор (как будет объяснено ниже) и наличие таких дефектов, как

Основные металлы и припой, применяемые для их пайки  
(однородные и разнородные сочетания)

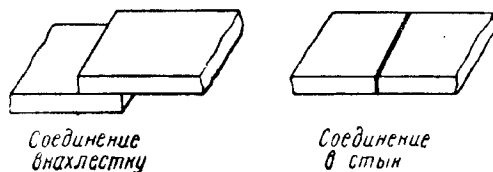
Основной металл	Алюминий и алюминевые сплавы	Магний и магниевые сплавы	Никель и никелевые сплавы	Углеродистые и низколегированные стали	Нержавеющие стали	Сплавы железа	Медь и медные сплавы	Высокоуглеродистые и инструментальные стали	Жаропрочные сплавы
Алюминий и алюминевые сплавы	ВАISI								
Магний и магниевые сплавы	×	ВMg							
Никель и никелевые сплавы	×	×	ВАg, ВСu, ВNiCr						
Углеродистые и низколегированные стали	ВАISI-4	×	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr					
Нержавеющие стали	×	×	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr					
Сплавы железа	×	×	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСuP, ВCuZn		
Медь и медные сплавы	×	×	ВАg, ВСuZn	ВАg, ВСuZn	ВАg, ВСuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn		
Высокоуглеродистые и инструментальные стали	×	×	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn	
Жаропрочные сплавы	×	×	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr, ВаgMn	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr	ВАg, ВСu, ВCuZn	ВАg, ВСu, ВCuZn, ВNiCr, ВаgMn	

× — не рекомендуется.  
Свойства и особенности основных металлов описаны в гл. 12—22.  
Рабочие характеристики и свойства припоев описаны в гл. 3.

пористость, флюсовые включения и непропаянные поверхности или пустоты.

Существуют лишь два основных типа применяемых при пайке соединений, показанных на фиг. 16. Первый тип — соединение внахлестку, а второй — соединение в стык. Однако для разных конструкций можно применять различные комбинации и варианты соединений внахлестку и в стык.

При соединении внахлестку площадь перекрытия можно варьировать так, что прочность паяного соединения будет равна проч-



Фиг. 16. Основные типы паяных соединений.

ности самой тонкой детали паемого соединения, несмотря на более низкую удельную прочность припоя или наличие небольших дефектов в шве. Максимальная прочность паяного соединения внахлестку получается в том случае, когда перекрытие (нахлестка) — более трех толщин самой тонкой части паемого соединения.

Соединение внахлестку следует применять во всех возможных случаях, так как оно обеспечивает максимальную эффективность



Фиг. 17. Типичные скошенные соединения (косой стык).

паяного соединения. В этом случае толщина металла в месте соединения увеличивается.

Соединение в стык имеет ограниченную соединяемую площадь, которая не может быть больше поперечного сечения паемой детали. Для получения прочного стыкового соединения необходимо устранить какие бы то ни было дефекты. В большинстве случаев при стыковой пайке это требование трудно выполнимо. Поэтому соединения в стык применяются в тех случаях, когда паяные соединения работают не в жестких условиях и когда герметичность и прочность соединения не имеют особо большого значения.

Скошенные соединения (фиг. 17) являются разновидностью стыкового соединения и применяются для увеличения соединяемой площади. Применение скошенного соединения сомнительно в том случае, если полученная соединяемая площадь не будет более чем в 3 раза превышать площадь нормального поперечного сечения соединяемого изделия.

Скошенное соединение более трудно подготовить и оно труднее поддается выравниванию во время процесса пайки, чем соединения внахлестку и в стык. Т-образные и уголковые соединения относятся обычно к категории стыковых соединений.

### Эксплуатационные требования

**Механическая прочность.** Паяные соединения могут подвергаться различного рода нагрузкам, таким, как растяжение, сжатие, срез, удар и усталостное нагружение. В настоящем разделе описано влияние различных факторов на механическую прочность паяных соединений.

**Соединительный зазор.** Соединительный зазор оказывает непосредственное влияние на механическую прочность паяных соединений вне зависимости от характера нагружения. Величина соединительного зазора определяет толщину слоя припоя в паяном шве и является определяющим фактором для получения максимальной прочности соединения.

Соединительный зазор измеряется между внутренними плоскостями собранного для пайки соединения. Однако зазор следует измерять в определенных условиях, т.е. при нормальной температуре или при температуре пайки. В случае однородных металлов примерно одинаковой массы зазор, измеренный при нормальной температуре непосредственно перед пайкой, является удовлетворительным показателем. При пайке двух разнородных металлов металл с более высоким коэффициентом термического расширения может иметь тенденцию уменьшать или расширять соединительный зазор в зависимости от относительного расположения и конфигурации деталей из этих металлов. Таким образом, когда производится пайка разнородных металлов (или однородных металлов с большой разницей в массе) соединительный зазор следует устанавливать с расчетом на температуру пайки и пригонку зазора производить при нормальной температуре так, чтобы при температуре пайки зазор достиг требуемой величины.

Удобным показателем величины зазора при температуре пайки является толщина припоя в окончательно выполненном соединении при условии, что в процессе пайки не имела место значительная диффузия. Толщину припоя в соединении можно измерять в поперечном сечении шва.

Иллюстрацией влияния соединительного зазора (измеренного на окончательно спаянных соединениях) на прочность шва может служить паяное соединение углеродистой стали. На фиг. 18 показана зависимость предела прочности на срез соединения, спаянного серебряным припоем ВAg-1 с применением флюса, от величины соединительного зазора. Кривая может быть выражена более или менее резко, чем это показано на фиг. 18. Однако обычно считается, что для каждого отдельного припоя в сочетании с основным металлом имеется оптимальный диапазон значений зазора, при которых получаются наиболее прочные соединения.

Табл. 6, в которой указана величина зазора для ряда групп припоев, можно принять в качестве рекомендации при конструировании паяных соединений, дающих максимальную прочность.

Таблица 6

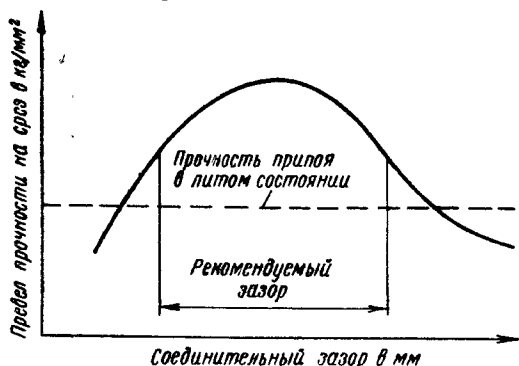
Рекомендуемые соединительные зазоры при температуре пайки

Припой по спецификации AWS — ASTM	Соединительный зазор* мм
Группа BAISi	0,150—0,250 при нахлестке менее 6,5 0,250—0,625 при нахлестке более 6,5
Группа BCuP	0,025—0,125
Группа BAg	0,05—0,125
Группа BCuAu	0,05—0,125
BCu	0 до 0,05**
Группа BCuZn	0,05—0,125
BMg	0,1—0,25
BNiCr	0,05—0,125
BAgMn	0,05—0,125

\* В случае круглых или трубчатых деталей зазор измеряется на радиусе.

\*\* Максимальная прочность получается при зазоре, равном нулю или при натяге.

Если устанавливать зазоры меньше, чем рекомендуемые в табл. 6, то прочность паяного соединения может значительно понизиться вследствие образования незаполненных припоем пустот, флюсовых включений и других факторов.



Фиг. 18. Зависимость предела прочности паяного шва на срез от величины соединительного зазора (при пайке малоуглеродистой стали серебряным припоем).

предусматривать допуск (запас) на расширение при высоких температурах пайки.

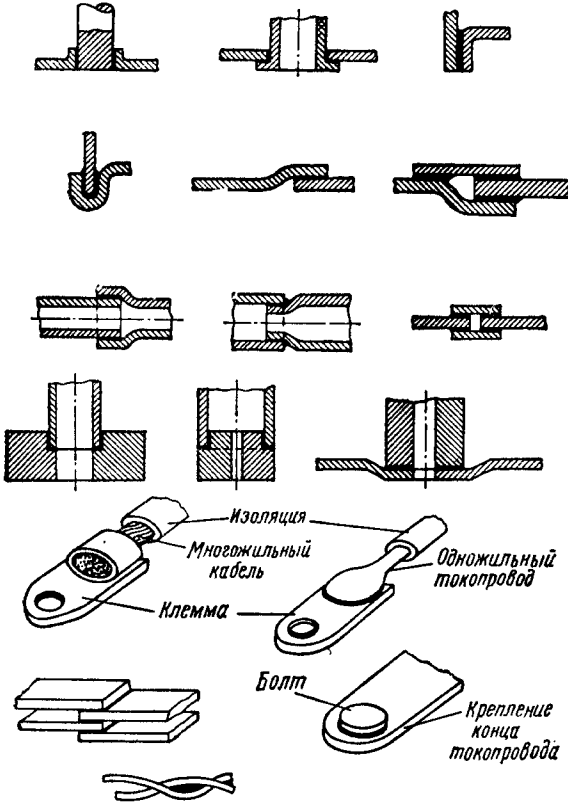
Большие зазоры легче получаются при механической обработке, но они сильно ослабляют паяное соединение и требуют расходования лишнего припоя.

Размеры соединительных зазоров, указанные в табл. 6, следует поддерживать при температуре пайки. В зазорах, установленных при нормальной температуре, следует



При пайке разнородных материалов рекомендуется проверять их коэффициенты термического расширения, в особенности в диапазоне температур пайки, так как могут возникнуть затруднения, к которым относятся следующие:

1) когда одна деталь припаивается внутри другой, то расширение этой второй детали может быть таким, что при температуре пайки будет достигнут плотный контакт соединяемых поверхностей.

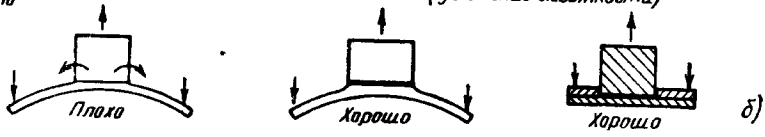
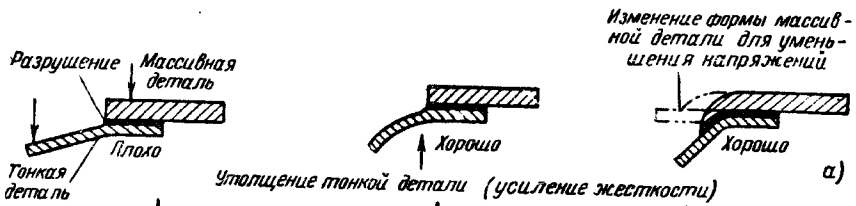


Фиг. 19. Типовые соединения пайкой.

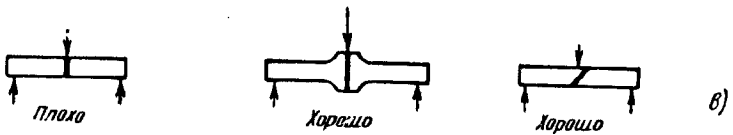
В этом случае соответствующие зазоры, рекомендуемые табл. 6, поддерживаться уже не могут, в соединение войдет очень мало (если вообще войдет) припой и образуется только валик. Перестановка паяемых деталей может привести к обратному положению — увеличению зазора — и предотвратить действие сил капиллярного притяжения;

2) если принять во внимание, что припой все же входит в соединение, то большее сужение второй детали приведет к разрушению припоя в шве во время охлаждения.

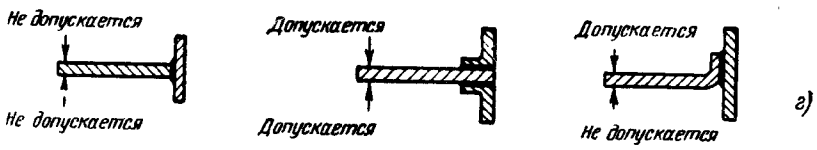
*Распределение напряжений.* На фиг. 19 показаны типовые паяные соединения, обеспечивающие нормальную механическую проч-



Не допускать действия пары сил на соединение



При ударной нагрузке



Не допускается

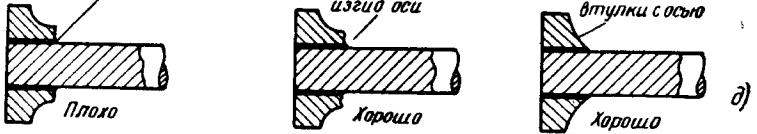
Допускается

Не допускается

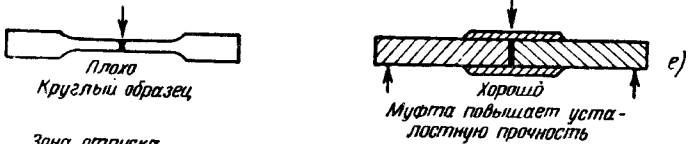
Место усталостного разрушения от изгиба

Конструкция втулки допускает небольшой изгиб оси

Радиус допускает небольшой изгиб втулки с осью

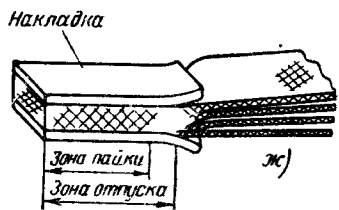
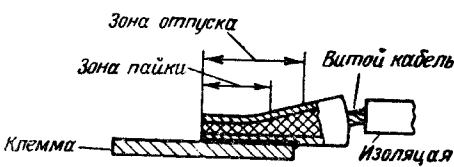


Повышение усталостной прочности оси и втулки



Круглый образец

Муфта повышает усталостную прочность

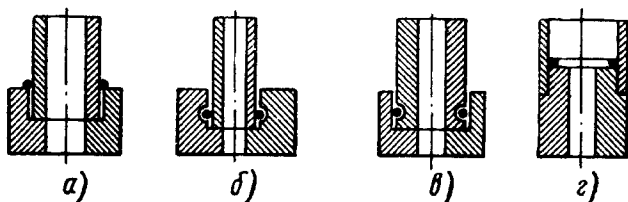


Фиг. 20. Правильные и неправильные конструкции паяных соединений.

ность. Необходимо помнить, что во всех случаях, где возможно, предпочтение следует отдавать соединениям внахлестку. Стыковые и скошенные соединения применяются лишь в том случае, когда соединения внахлестку выполнить нельзя вследствие ограниченной площади.

Конструкция паяного соединения должна быть такой, чтобы предотвращать концентрацию напряжений, вызывающих разрушение. Это часто достигается путем увеличения податливости (уменьшения жесткости) тех деталей узла, которые могут служить началом разрушения соединения.

На фиг. 20, *а—е* показаны правильные и неправильные конструкции паяных соединений для характерных видов нагрузок (показаны



Фиг. 21. Способы размещения припоя в виде проволоки.

стрелками). Соединения на фиг. 20, *ж* предназначены для вибрационных или знакопеременных нагрузок. В этом случае собранные детали должны дополнительно поддерживаться накладками, припаянными сверху и снизу собранного узла.

*Внешняя подача и предварительное размещение припоя.* Очень важным фактором конструирования паяных соединений является способ размещения припоя в соединении. Поэтому конструктор должен знать, какой способ пайки будет наиболее целесообразен.

Обычно, когда пайка производится вручную, то припой присаживается с внешней стороны и это не вызывает никаких затруднений. Однако при большом количестве подлежащих пайке деталей, требующем применения механизированного или автоматического оборудования для пайки, или в специальных случаях может потребоваться предварительная укладка припоя. Это необходимо принимать во внимание при конструировании соединений.

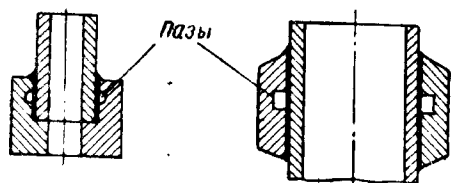
Припой можно предварительно укладывать в виде проволоки, полос, шайб, порошка и др. Наиболее часто применяются проволока и полосы. Некоторые припои можно также наносить на соединения разбрызгиванием подобно процессу, применяемому при металлизации. На фиг. 21 приведены случаи возможного применения припоя в виде проволоки. Следует отметить, что паз или выемка, прорезаемые в основном металле для укладки припоя в виде проволоки, как это показано на фиг. 21, *б* и *в*, всегда выполняются в детали, имеющей большее сечение.

Припой растекается из пазов и распространяется по всему соединению, как это показано на фиг. 22. При подсчете механической

прочности паяного узла площадь прорезанного паза необходимо вычитать из площади паяного соединения.

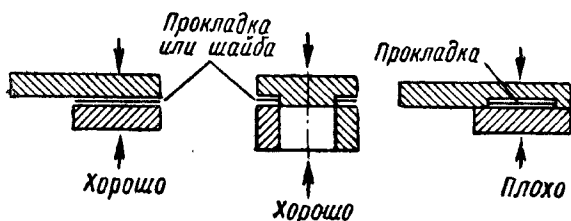
В конструкциях соединений, где припой укладывается в виде шайб или тонкой плоской полосы, очень важно, чтобы паяемые детали перемещались относительно друг друга во время плавления припоя. В этом случае излишнее количество припоя и флюса выжигается из соединения применением надлежащего давления во время процесса пайки (фиг. 23).

**Электропроводность.** При конструировании паяных соединений, предназначенных для токопроводящих изделий, важным фактором является их электропроводность. Если соединение сконструировано правильно, то при включении в электроцепь оно не должно повышать электросопротивления.



Фиг. 22. Паяные соединения с канавками для укладки припоя.

Установлено, что припой обычно имеет низкую электропроводность по сравнению с медью. Например, электропроводность меднофосфористого припоя ВCuP-5 составляет примерно 10% от электропроводности меди, а серебряный припой ВAg-6 составляет 24,4% от электропроводности меди. Для того чтобы паяное соединение не повышало сопротивления электроцепи, необхо-



Фиг. 23. Размещение припоя в форме шайбы.

димо при пайке устанавливать зазор в соответствии с табл. 6. Более короткий путь через припой в шве по сравнению с более длинным путем через провод пренебрежимо мало увеличивает общее сопротивление электроцепи\*.

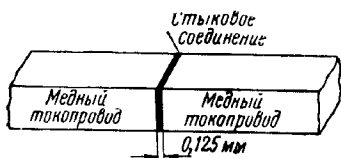
На фиг. 24 показан медный токопровод, спаянный меднофосфористым припоем ВCuP-5 при соединительном зазоре 0,125 мм, как это рекомендуется согласно табл. 6.

С практической точки зрения следует признать, что при пайке будет иметь место некоторое количество пустот, которые сократят эффективную площадь пути прохождения электрического тока,

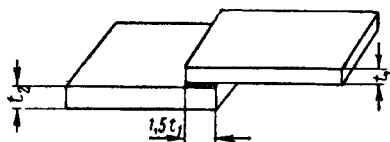
\* Расчеты и опыт показывают, что при пайке меднофосфористым припоем медного токопровода длиной 1 м общее сопротивление электроцепи увеличивается на 1,2%, а при длине токопровода 10 м — только на 0,1%. (Прим. ред.).

вследствие чего там, где допускает конструкция, рекомендуется применять соединения внахлестку.

Длина нахлестки, равная 1,5 толщины более тонкой части соединения, даст сопротивление примерно равное сопротивлению цельного медного токопровода (фиг. 25). Применение такого способа соединения дает хорошие результаты. Если это необходимо для удобства пайки или других каких-либо целей, можно применять нахлестку с большим перекрытием.



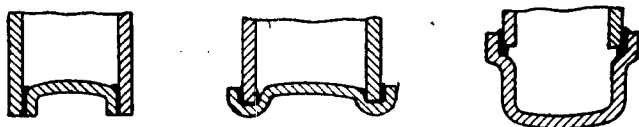
Фиг. 24. Паяный шов в электропроводах.



Фиг. 25. Оптимальная нахлестка для соединения электрических токопроводов.

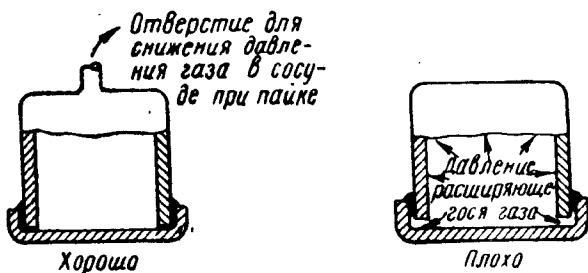
**Герметичность.** При сборке герметичных узлов следует применять пайку внахлестку (или скошенные соединения). Такие соединения не только гарантируют самую высокую прочность шва, но обеспечивают также большую площадь пайки, что уменьшает возможность просачивания через соединение.

На фиг. 26 приведено несколько примеров пайки герметичных конструкций.



Фиг. 26. Типовые паяные соединения герметичных контейнеров.

Важным фактором при конструировании паяных узлов или агрегатов, предназначенных для работы под давлением или в вакууме,



Фиг. 27. Вентилирование контейнеров в процессе пайки.

является обеспечение надлежащего выхода припоя или так называемой «вентиляции» шва.

При нагреве в процессе пайки воздух или газ, находящийся внутри закрытого сосуда или узла, расширяется так быстро, что если сосуд хорошо не вентилируется (не открыт для воздуха), то может произойти выпучивание стенок сосуда. В то же самое время давление может воздействовать на припой, входящий в зазор, и свести к минимуму действие капиллярного притяжения (фиг. 27).

Глухие отверстия можно считать маленькими контейнерами, где во время пайки создается давление. На фиг. 28 представлены различные конструкции соединений с вентиляционными отверстиями для отвода давления, создаваемого при нагреве во время пайки.



Фиг. 28. Вентилирование несквозных паяных соединений во время пайки.

Работа паяных соединений при повышенных температурах. Легко понять, что правила в отношении максимальных рабочих температур, которые будут претерпевать паяные соединения, представляются очень сложными при применении столь большого количества припоев и основных материалов. При этом действие максимальных температур может быть продолжительным или коротким. Все это является причиной того, что данный вопрос может быть освещен только в общих чертах. Прочность всех металлов и сплавов понижается при увеличении температуры нагрева; припой не является исключением в этом отношении. Поэтому можно ожидать, что паяные соединения будут также снижать свою прочность при повышении температур.

К сожалению, имеется мало данных по прочности паяных соединений при повышенных температурах при кратковременных испытаниях на разрыв, и еще меньше данных по испытаниям на ползучесть и разрушение при длительном нагружении. При разработке конструкции с паяными соединениями, рассчитанной на работу при повышенных температурах, необходимо производить расчет на максимальную нагрузку, выдерживаемую соединением. Испытание пробных соединений в действительных условиях эксплуатации является единственным надежным методом, по результатам которого можно судить о сроке службы паяных соединений.

В табл. 7 указаны максимальные рабочие температуры для различных припоев. Следует отметить, что две температуры указываются из условий назначения конструкции. При выборе припоя и основного материала необходимо учитывать такие факторы, как среда, в которой будет работать соединение, напряжение, продолжительность работы и температура. В тех случаях, когда нагрузка

Таблица 7

Припой по спецификации AWS — ASTM	Рекомендуемая предельная рабочая температура для продолжительной работы в °С	Рекомендуемая максимальная рабочая температура в °С
Группа BCuP	150	150
Группа BAg	205	260
Группа BCuZn	205	260
BCu	205	480
BAgMn	260	480
BNiCr	540	1095

и продолжительность процесса пайки позволяют, применяются максимальные рабочие температуры.

**Отрицательные (ниже нуля) температуры.** Приведенные данные показывают, что на прочность паяных соединений при разрыве, срезе и испытании на удар низкая рабочая температура до  $-73^{\circ}\text{C}$  значительного влияния не оказывает. Если имеется сомнение, то проводят испытания на пробных образцах для определения времени, температуры и напряжения, которые может выдерживать соединение в условиях эксплуатации.

## ГЛАВА 7

### ОЧИСТКА И ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ

Чистые, свободные от окисной пленки поверхности обеспечивают получение высококачественных и прочных паяных соединений.

Для получения наиболее прочного паяного соединения необходимо перед пайкой тщательно удалить с поверхности припоя и паяемого металла окислы и загрязнения, так как только после этого может в полной мере проявиться действие капиллярного притяжения между припоем и основным металлом. Хотя применяемые флюсы и обладают некоторым очищающим действием, но это не является их основной функцией.

Флюсы применяются преимущественно для того, чтобы предотвратить образование окисной пленки в процессе пайки, уменьшить поверхностное натяжение припоя и образовать защитное покрытие в виде шлака вокруг затвердевающего паяного соединения.

Пайку рекомендуется производить как можно быстрее после очистки поверхности. Время, в течение которого поверхность остается чистой перед пайкой, зависит от свойств применяемого металла, состава атмосферы, условий хранения и других факторов.

Способы очистки обычно разделяются на две категории: химические и механические. Наиболее эффективным считается химический способ очистки, применяемый для удаления всех остатков масла или жиров. В качестве очистительных или растворяющих компонентов обычно применяются четыреххлористый углерод, трихлорэтилен и тринатрийфосфат. В гл. 23 описана техника безопасности при обращении с этими реактивами.

Для удаления различных типов окислов и окалины, которые нельзя удалить указанными очистителями, применяются другие реактивы. Выбор требуемого очистителя зависит от индивидуальных особенностей очищаемого материала. Очень важно, чтобы применяемый очиститель легко смывался водой с поверхности металла, так как остатки очистителя могут повредить основной металл или образовывать на его поверхности другую нежелательную пленку.

Нежелательные окислы и загрязнения можно также удалять с поверхности металла такими механическими способами, как шлифование, опиловка, зачистка стальной щеткой, и другими механическими способами при условии, что не будет поврежден соединительный зазор. Однако, если при механической очистке применялся керосин или смазка, то их также необходимо удалить с поверхности металла перед пайкой.

При применении пайки для ремонта разрушенных деталей, инструмента и пр., необходимо тщательно удалить краску, лак или другие защитные покрытия, которые могут быть на поверхности.

Описание очистки специальных металлов приведено в главах, посвященных этим металлам.

---

## ГЛАВА 8

### СБОРКА ДЕТАЛЕЙ ПОД ПАЙКУ

Способ сборки и фиксации деталей, предназначенных для пайки, следует выбирать во время конструирования деталей; одновременно нужно определять способ пайки и тип соединения, так как все эти факторы тесно связаны между собой.

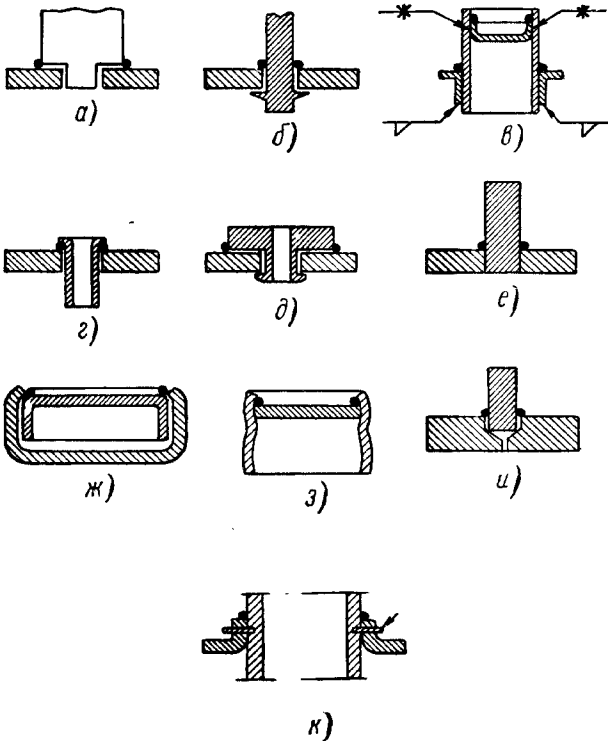
Как правило, желательно применять самые простые способы сборки деталей, которые надежно гарантируют правильное и устойчивое положение паяемых деталей во время нагрева и охлаждения в процессе пайки. Во многих случаях можно конструировать детали таким образом, чтобы их можно было собирать и паять без применения специальных приспособлений, тогда как в других случаях желательно или необходимо применять зажимы и поддерживающие приспособления, чтобы детали надежно удерживались в правильном положении в процессе пайки.

Для сборки деталей под пайку без применения вспомогательных приспособлений имеется много способов. Некоторые из этих способов перечислены ниже, а некоторые показаны на фиг. 29.



Крепление деталей перед пайкой может осуществляться при помощи:

- 1) силы тяжести. В этом случае используется вес паяемых частей или еще и дополнительный груз;
- 2) прихватки точечной или дуговой сваркой;
- 3) скручивания проволокой;



Фиг. 29. Примеры сборки деталей под пайку без вспомогательных приспособлений с использованием:

*a*—силы тяжести, *б*—бортика, *в*—точечной сварки, *г*—развальцовки, *д*—осадки, *е*—легкой запрессовки, *ж*—подчеканки, *з*—гофрирования, *и*—силы тяжести (вентилируемый шов), *к*—штифта.

- 4) гофрирования деталей;
- 5) создания соединительных пазов;
- 6) ковочных операций;
- 7) развальцовки, например, концов труб в пластинчатом коллекторе;
- 8) подчеканки;
- 9) свинчивания;
- 10) склепывания;
- 11) закрепления прямым или коническим штифтом;
- 12) контровочных операций;
- 13) операций по созданию лунок (вдавливание);

- 14) операции гибки;
- 15) создания заплечика на одной из паяемых деталей;
- 16) создания препятствий в виде насечки (накатки), если пайка производится в печи медью, так как в этом случае соединительный зазор для затекания припоя может отсутствовать.

Если для сборки деталей под пайку применяются приспособления, то при этом нужно учитывать следующие факторы. Масса приспособления должна быть минимальной и оно должно соответствовать своему назначению. Конструирование таких приспособлений следует осуществлять таким образом, чтобы предотвратить их влияние на паяемые изделия в процессе нагрева для пайки, которое может проявляться в чрезмерном отводе тепла от паяемой поверхности или создавать препятствия для растекания припоя.

Материал для изготовления крепежных приспособлений нужно выбирать с учетом применяемого способа пайки. Например, для пайки в печи надо применять материалы, которые выдерживают температуры, развиваемые в процессе пайки; при этом не должно происходить заметного ослабления или разрушения приспособлений.

Чтобы гарантировать соблюдение установленного соединительного зазора при температуре пайки, необходимо учитывать величину расширения и сжатия приспособления относительно паяемых деталей. Для этого нужно сравнивать коэффициенты термического расширения паяемого материала и материала, из которого выполнено приспособление. Приспособление должно быть выполнено из таких материалов, которые не сплавляются при повышенных температурах с паяемым материалом (имеется в виду место контакта паяемого изделия и приспособления) и не смачиваются расплавленным припоем.

Имеются и другие требования, предъявляемые к приспособлениям для пайки, которые следует учитывать при определенных способах пайки. Например, при пайке горелкой приспособление должно обеспечивать свободный доступ пламени горелки к паяемому соединению, а также возможность введения припоя в шов. При пайке в печи приспособления не должны терять устойчивости при нагреве в процессе пайки. Рычажные системы, кулачковые или системы, в которых используется сила веса, широко применяются для прижатия соединяемых частей во время нагрева и охлаждения. Пружины для этой цели применяются редко, так как при нагреве они теряют упругость.

Конструирование приспособлений для индукционной пайки также связано со значительными трудностями, так как необходимо, чтобы в поле индукционной катушки попадало только паяемое соединение, исключая все другие материалы. Обычно для такой пайки применяются приспособления, выполненные из фарфора, слюды, керамики или асбеста.

При других способах пайки к конструированию приспособления для пайки нужен индивидуальный подход исходя из предъявляемых к нему требований. Основные из этих требований сводятся к тому,

чтобы соединяемые детали были расположены правильно относительно друг друга, независимо от расширения или сжатия их в процессе пайки, чтобы паяемые детали нагревались равномерно, несмотря на различие в массе деталей и приспособления, и чтобы приспособление не оказывало влияния на свободное затекание припоя в соединительный зазор.

Часто рекомендуется конструировать приспособления с таким расчетом, чтобы они выполняли к тому же и функции отражателя или поглотителя тепла.

---

## ГЛАВА 9

### ТЕХНИКА ПАЙКИ ТВЕРДЫМИ ПРИПОЯМИ

Прочность паяных соединений в большой степени зависит от конструкции соединения, чистоты поверхности применяемых припоев и флюсов, а также от фиксирующих приспособлений. Неправильная техника пайки может быть причиной получения недоброкачественных паяных соединений. Нагрев деталей до температуры пайки рекомендуется производить в течение возможно короткого времени, не допуская при этом недогрева деталей, местного перегрева и возникновения в них высоких термических напряжений.

Любой нагрев узла перед пайкой считается предварительным нагревом. Например, при пайке горелкой первоначальный подогрев преимущественно массивных деталей или деталей с различной толщиной стенок считается предварительным подогревом, хотя сам нагрев и является частью процесса пайки. Предварительный нагрев снижает температурный градиент, сводит к минимуму температурные напряжения в деталях и предотвращает их растрескивание.

#### Пайка горелкой

Для получения качественных соединений при газопламенной пайке надо уметь пользоваться горелкой. Обычно желательно применять слабо восстановительное пламя. Регулирование ацетилено-кислородного пламени относительно просто и выполняется путем наблюдения за характеристикой пламени (по его окраске). Надлежащее регулирование пламени других типов горючих газов более затруднительно, так как здесь не происходит какого-либо заметного на глаз изменения характеристики пламени. В таких случаях регулирование и контроль пламени можно осуществлять при помощи расходомеров или анализа газов. При нагреве деталей для пайки обычно используется внешняя зона пламени, а не внутренний конус. Это отмечено потому, что техника пайки горелкой отличается от техники газовой сварки.

Величина зоны предварительного нагрева горелкой зависит от размера и формы паяемой детали, а также от коэффициента терми-

ческого расширения основного материала и типа соединения. Неправильный нагрев преимущественно из-за недостаточно интенсивного перемещения пламени горелки по изделию может вызвать растрескивание, чрезмерную диффузию и окисление применяемого припоя, а также неполное затекание припоя в соединение.

Весьма важно, чтобы соединение равномерно нагревалось до такой температуры (в пределах интервала температур пайки), при которой припой свободно растекается и заполняет соединительный зазор. При пайке не следует допускать перегрева деталей, что лучше всего достигается применением активного флюса с температурой плавления несколько ниже предела температур плавления припоя. В этом случае плавление флюса может служить показателем того, что нагрев металла начинает достигать требуемой температуры пайки.

Если припой подается с внешней стороны соединения, то его следует вводить в соединение лишь тогда, когда нагрев основного металла достигнет температуры, обеспечивающей плавление и свободное затекание припоя в зазоры. После этого нагрев следует прекратить. Такая техника получения паяного соединения сходна с пайкой мягкими припоями. При таком методе нагрева исключается перегрев. Пламя горелки не рекомендуется направлять непосредственно на припой или флюс для их плавления и растекания.

По всему паяемому соединению желательно поддерживать достаточно равномерную температуру, для чего необходимо применять многопламенные наконечники на горелке или многопламенные горелки.

При механизации процесса пайки горелкой детали могут перемещаться, отклоняться или вращаться по мере того, как они проходят через зону нагрева. Пламя в свою очередь может передвигаться вокруг паяемых деталей. При некоторых операциях паяльную лампу или горелку следует располагать таким образом, чтобы детали нагревались по всей площади соединения. В любом случае необходимо обеспечить и поддерживать равномерную температуру металла.

При ручной пайке горелкой припой в большинстве случаев вводится в соединение с внешней стороны. В случае механизированных операций пайки правильная конструкция соединения позволит укладывать припой в виде кольца, шайбы, прокладки, пасты или порошка. Однако припой необходимо располагать на паяемой детали таким образом, чтобы он не расплавлялся преждевременно от пламени горелки.

### **Пайка в печи**

Пайка в печи находит широкое промышленное применение и производится в специально сконструированных печах. Процесс пайки в печи является универсальным и не ограничивается ни паяемым металлом, ни припоем, но при управлении этим довольно сложным процессом необходимо учитывать сочетание ряда факторов, которые будут подробно рассмотрены.

**Оборудование.** Печи для пайки могут быть электрически, газовыми или нефтяными, хотя некоторые процессы пайки можно проводить только в печах определенного типа. Печь выбранного типа должна иметь конструкцию, обеспечивающую создание надлежащей температуры, контроль времени выдержки и состав необходимой для пайки атмосферы. При этом требуется точное регулирование температуры пайки и применяемой атмосферы в соответствии с назначенными условиями процесса пайки. В случае применения конвейерных печей необходимо контролировать скорость передвижения деталей через печь, что позволяет регулировать время выдержки при температуре данного процесса пайки.

**Конструкция соединений.** Для выполнения пайки в печи соединения должны иметь специальную конструкцию. Если это возможно, то припой нужно укладывать внутри соединения вблизи самой массивной части. Это предотвратит расплавление и растекание припоя прежде, чем соединяемые детали нагреются до температуры пайки.

Так как при нагреве в печи подлежащие пайке детали полностью нагреваются до температуры пайки, необходимо особо учитывать расширение металла деталей, чтобы при температуре пайки получить требуемый соединительный зазор. В этом заключается отличие нагрева в печи от местного нагрева, когда нагреваются только само соединение и непосредственно примыкающие к нему поверхности.

Желательно конструировать такие соединения, которые можно собирать без фиксирующих приспособлений. Любые элементы, служащие для выравнивания и фиксации паяемых деталей, будут нагреваться до температуры пайки, поэтому из соображений экономии они должны быть небольшого размера, а количество их должно быть минимальным. Очень важно, чтобы материалы, из которых выполняются все элементы для фиксации паяемого узла, при пайке в печи хорошо выдерживали температуру пайки. Во многих случаях целесообразно применять экраны вокруг тонких частей паяемого изделия, чтобы замедлить их нагрев.

**Припой и флюсы.** Припои для пайки в печи применяются в виде прокладок, шайб, колец, пасты или порошка. Как уже было упомянуто в гл. 4, некоторые флюсы при температуре пайки имеют тенденцию разлагаться, теряя свои свойства. Эту характеристику следует учитывать при выборе флюсов, исходя из продолжительности процесса и температуры пайки.

Даже в тех случаях, когда применяется контролируемая атмосфера, иногда рекомендуется наносить на соединения небольшое количество флюса. Этот дополнительно введенный флюс противодействует окислению соединяемых поверхностей, которое может иметь место в процессе нагрева детали до температуры пайки, при которой становится эффективной атмосфера. В случае применения флюса надо соблюдать предосторожность, чтобы не повредить печь.

**Техника пайки.** Перед пайкой соединяемые поверхности следует тщательно очистить, затем, если необходимо, покрыть флюсом и собрать, уложив на них припой. Перед загрузкой в печь паяе-

мые детали нужно прогреть и, в случае пайки в контролируемой атмосфере, очистить от посторонних загрязнений все их поверхности (см. гл. 4 и 23). Температура печи должна быть выше температуры ликвидуса припоя примерно на 40—65°.

Если при пайке в печи термопара не может быть установлена непосредственно у соединяемых поверхностей, то рекомендуется разработать режим пайки\*. Когда количество паяемых деталей невелико и точность опытных данных по установлению температуры цикла не гарантируется, то температуру можно приблизительно измерить через печное окно или через другие отверстия в печи.

После пайки необходимо охладить детали. Если пайка производится в контролируемой атмосфере, то спаянные детали охлаждаются в той же атмосфере. Во всех случаях следует предотвращать возможность перемещения спаянных деталей относительно друг друга, пока соединение не приобретет достаточную прочность при охлаждении.

### Индукционная пайка

Большое значение на процесс индукционной пайки оказывают такие факторы, как оборудование, соединяемые материалы, конструкция соединения, конструкция индуктора, температура плавления припоя и флюса, а также применяемые приспособления.

Каждый из этих факторов важен как сам по себе, так и в сочетании с другими факторами. При соответствующем учете указанных выше факторов индукционную пайку можно применять для большинства металлов.

**Оборудование.** Установки для индукционной пайки могут быть трех основных типов: машинный генератор, ионный преобразователь и ламповый генератор. Эти установки отличаются по своим рабочим характеристикам. Так, машинный генератор является низкочастотной установкой (до 10 000 гц); ионный преобразователь является среднечастотной установкой (от 20 000 до 30 000 гц), ламповый генератор имеет частоту от средней до высокой (от 200 000 до 5 000 000 гц). Промышленностью выпускаются стандартные установки с различной электрической мощностью, а сочетание этих установок согласно рабочим схемам обеспечивает применение их для различных целей.

Выбор установки надлежащей мощности зависит от размера паяемых деталей и необходимой производительности. Окончательный выбор индукционных установок производится после экспериментальной пайки на них промышленных деталей.

Неотъемлемой частью всех индукционных нагревательных установок является индукционная катушка (или блок), называемая *индуктором*. Большинство индукторов имеет простую конструкцию и легко может быть изготовлено потребителем. Обычно индукторы выполняются из меди в форме трубки или блока с внутренним каналом для водяного охлаждения. Необходимо, чтобы индуктор во

\* В данном случае время выдержки при температуре пайки. (Прим. ред.).

время процесса пайки охлаждался циркулирующей внутри него водой. Небольшие индукционные установки мощностью до 0,75 *кв*а могут работать с индуктором воздушного охлаждения.

Индуктор должен выполняться с таким расчетом, чтобы детали нагревались до требуемой температуры с максимальной эффективностью. Для нагрева более чем одного соединения можно применять сверхразмерные индукторы, т. е. индукторы большего размера, чем это необходимо по расчету в пределах развиваемой агрегатом мощности.

Число витков медной катушки или толщина медного блока зависит от размера требуемой зоны нагрева. При конструировании индуктора следует предусматривать поправку на *краевой эффект*, возникающий в деталях прямоугольной формы и на неровностях поверхности, которые находятся в зоне индукционного воздействия.

Промежуток между индуктором и паяемой деталью называют *связью*. Путем изменения связи от плотной (малый зазор) до свободной (широкий зазор) вокруг различных частей паяемой детали можно получить изменение количества тепла, возникающего в этих частях. Это очень важно при пайке деталей различного сечения. В этом случае как массивные, так и легкие части могут нагреваться до температуры пайки одновременно при применении индуктора с соответствующим зазором для каждого сечения. Применение многovitковых индукторов обеспечивает пайку различных деталей в одно и то же время.

Нагрев деталей индукционным методом осуществляется очень быстро. При этом необходимо обеспечивать достаточное время для надлежащего растекания припоя и хорошего заполнения им паяемого соединения. Обычно лучше применять многovitковые индукторы при использовании полной мощности установки и нагрев до температуры пайки в течение 30—60 сек., чем одновитковый индуктор и нагрев в течение 5—10 сек. Скорость процесса пайки в каждом случае будет одинакова. Слишком быстрый нагрев может также вызвать растрескивание под действием возникающих напряжений (см. гл. 2).

Конструкция соединений. Так как при пайке индукционным способом происходит местный нагрев, то при конструировании соединения это обстоятельство необходимо учитывать.

Последовательное соединение узлов можно осуществлять путем ступенчатой пайки или при помощи двух последовательных процессов пайки с использованием одного и того же припоя при условии, чтобы нагрев подлежащего пайке соединения не распространялся по уже спаянному шву.

Индукционная пайка наиболее эффективна в том случае, когда зажимное приспособление крепится к упорам, жестко закрепленным на рабочей плите.

При индукционной пайке следует очень тщательно устанавливать нужный соединительный зазор, так как при этом процессе тепло может индуктироваться преимущественно в одной из соеди-

няемых деталей, вызывая ее более быстрый нагрев и расширение. Это может создать нежелательные неравномерные условия нагрева во время процесса пайки, что необходимо компенсировать первоначально установленным соединительным зазором. Например, если соединительный зазор во время пайки увеличивается, то при сборке соединений в холодном состоянии надо устанавливать уменьшенный зазор и, наоборот.

**Припой, флюсы и атмосферы.** Припой обычно применяется в форме колец, прокладок или шайб. В некоторых случаях применяют припой в виде пасты или порошка, но эту форму припоя трудно приспособить к условиям индукционной пайки.

В тех случаях, когда припой и основной металл требуют применения флюса, первостепенным условием для выбора флюса является температура, при которой будет производиться пайка этим припоем. При индукционной пайке происходит быстрый нагрев, поэтому время выдержки при заданной температуре сводится к минимуму.

Индукционная пайка в активной (восстановительной) или защитной атмосфере протекает успешно. В случае применения защитной атмосферы на поверхности соединяемых деталей следует иногда наносить небольшое количество флюса, чтобы защитить эти поверхности от окисления, пока защитная атмосфера не достигнет температуры, при которой ее действие наиболее эффективно.

**Техника пайки.** Перед пайкой соединяемые детали следует тщательно очистить, профлюсовать, если необходимо, и собрать вместе с уложенным на них припоем. Эти операции следует выполнить заранее, но с соблюдением предосторожности. Индукционный способ пайки включает значительное количество ручного труда; следует иметь в виду, что после высыхания флюс может осыпаться.

Полностью собранные детали фиксируются в определенном положении в индукторе, что обеспечивает одинаковое взаимное расположение паяемых деталей и индуктора.

Для обеспечения экономичности процесса пайки необходимо предусматривать механизмы автоматического регулирования времени пайки. Эти приборы позволяют оператору устанавливать время процесса пайки и поддерживать его одинаковым с точностью до долей секунды. Если необходимо ускорить охлаждение детали в индукторе после пайки, то следует включить охлаждающую среду, например воздуходувку или водяную струю. Закалку в воде следует применять только после того, как паяное соединение достаточно охладилось и прочно держит детали.

### **Пайка сопротивлением**

**Конструкция соединений.** Пайка сопротивлением больше всего применяется для соединений, имеющих относительно малую протяженность. Очень трудно получить равномерную плотность тока по всей соединяемой поверхности, а следовательно, и одинаковый нагрев в тех случаях, когда соединяемая поверхность



большая или прерывистая или когда соединение имеет большую протяженность. Для пайки сопротивлением соединяемые детали должны быть расположены так, чтобы к ним можно было приложить давление, не вызывая их искривления при температуре пайки. Там, где это возможно, подлежащие пайке детали следует конструировать так, чтобы их фиксация осуществлялась без дополнительных приспособлений. При этом соединяемые детали должны иметь некоторую свободу перемещения для уменьшения в них внутренних напряжений во время плавления и затекания припоя.

**Оборудование для пайки.** Одним из обычных источников тока для пайки сопротивлением является понижающий трансформатор, вторичная обмотка которого может обеспечивать достаточно низкое напряжение (от 2 до 25 в). Сила тока при пайке колеблется в пределах примерно от 50 а для небольших тонких деталей до нескольких тысяч ампер для крупных. Для пайки сопротивлением можно использовать обычное промышленное оборудование. Машины для точечной сварки всех размеров можно легко переделать для выполнения на них пайки сопротивлением. При пайке сопротивлением надо прикладывать меньшее давление и устанавливать большее время прохождения тока через деталь, чем при точечной сварке.

Электроды для пайки сопротивлением изготавливаются из материалов с высоким электрическим сопротивлением: углеродных или графитовых стержней, вольфрамовых или молибденовых прутков или вкладышей, а в некоторых случаях даже из стали. Тепло, необходимое для пайки, генерируется главным образом в электродах, а нагрев паяемой детали осуществляется за счет ее теплопроводности. Попытки использовать для нагрева детали сопротивление самой паяемой детали обычно кончаются неудачно, так как для этого нужно пропускать ток большой силы, чтобы обеспечить растекание припоя. Такой ток равен сварочному и вызывает перегрев детали.

Скорость затвердевания припоя при пайке сопротивлением исключительно высокая, так как паяемые детали находятся в соприкосновении с холодным электродом.

В качестве электродов чаще всего применяют углеродистые или графитовые стержни и блоки, так как они не смачиваются расплавленным припоем и не сцепляются с ним. Для изготовления электродов применяют графит или углеродистые материалы разных сортов, с различным электросопротивлением и твердостью в зависимости от рода выполняемых работ. Из этих материалов можно легко изготавливать электроды требуемой формы, но они считаются дорогими, так как быстро изнашиваются при работе. Покрытие наружной поверхности углеродистых электродов флюсом может удлинить срок их службы.

Давление, применяемое на машинах точечной сварки, зажимы, специальные клещи или другие приспособления вполне обеспечивают хороший электрический контакт и прочно удерживают паяемые детали вместе, пока плавится припой. Слишком высокое дав-

ление может вызвать растрескивание электрода из углеродистого материала. Давление следует поддерживать как во время пропускания тока, так и после его выключения до тех пор, пока соединение не станет достаточно твердым, допускающим перемещение собранного узла.

Время пропускания тока через паяемое соединение может быть различное: примерно от одной секунды для небольших тонких деталей до нескольких минут при пайке больших деталей. Обычно время протекания тока контролируется вручную оператором, который визуально определяет время достижения температуры пайки и степень затекания припоя в зазор. При пайке сварочными машинами методом сопротивления можно применять также стандартные реле времени.

**П р и п о и и ф л ю с ы.** Для пайки сопротивлением применяют припой в форме шайб, прокладок, колец или в виде порошка. В некоторых случаях припой можно присаживать с внешней стороны в процессе пайки. Пайка меди и медных сплавов наиболее успешно осуществляется меднофосфористыми припоями ВCuP, которые являются самофлюсующими. Если применяются серебряные припой ВAg, то пайку необходимо вести в контролируемой атмосфере или с применением флюса. Флюс обычно наносят на паяемое соединение в виде тонкоразмельченной влажной смеси непосредственно перед сборкой деталей под пайку. Сухой порошкообразный флюс является хорошим изолятором и препятствует протеканию электротока. В некоторых случаях порошкообразный припой перемешивают с тонкоразмельченным флюсом для обеспечения надежного электрического контакта и пропускания электротока. Одну из соединяемых деталей погружают в эту смесь, где она покрывается флюсом и припоем, а затем устанавливают в приспособление для пайки.

Жидкие флюсы, обычно не рекомендуемые, в некоторых случаях можно применять при пайке сопротивлением. Пайку сопротивлением без флюса можно производить в восстановительной атмосфере, но эта операция применяется редко из-за трудности поддержания восстановительной атмосферы в зоне пайки. Алюминиевые и магниевые сплавы редко подвергаются пайке сопротивлением.

**Т е х н и к а п а й к и.** Подвергаемые пайке детали следует тщательно очистить, нанести на них припой и флюс, установить после сборки в приспособление для пайки и приложить давление. При пропускании тока электроды нагреваются, благодаря своей теплопроводности нагревают флюс и припой, которые плавятся, смачивают соединяемые поверхности и затекают в зазоры, образуя паяный шов. Сила тока должна быть отрегулирована так, чтобы обеспечить равномерный и быстрый нагрев паяемых соединений. Если сила тока слишком велика, то электроды получают слишком много тепла и быстро сгорают. При этом также имеется опасность сгорания или расплавления паяемых деталей. Если сила тока слишком мала, то время пайки чрезмерно удлиняется. Силу тока можно

регулировать изменением напряжения, подаваемого через трансформатор, а также применением большего количества электродов или электродов с более высоким сопротивлением в цепи. Небольшое изменение состава электродов, их геометрии и напряжения лучше всего обеспечивает быстроту нагрева и большую продолжительность их работы.

При прохождении тока через паяемое соединение давление не должно прерываться, иначе возникнет искрение и паяемый узел быстро придет в негодность. После прекращения подачи тока давление на паяемое соединение не должно прекращаться до тех пор, пока припой не затвердеет и соединение не приобретет достаточную прочность, допускающую перемещение узла. Закалка паяных деталей с повышенных температур улучшает структуру шва и способствует удалению флюса. Такая закалка производится только после полной кристаллизации припоя в паяном соединении.

### Пайка погружением

Применяются два способа пайки погружением: пайка погружением в расплавленный припой и пайка погружением в расплавленный флюс (в соляную ванну).

Пайка погружением в расплавленный припой. Применение этого способа обычно ограничивается пайкой мелких деталей, а также проводов и металлических лент. Ванна, обычно выполненная из графита, нагревается с внешней стороны до такой температуры, чтобы припой все время находился в жидком состоянии. Сверху расплавленный припой должен быть покрыт флюсом. Размер плавильной ванны и способ нагрева должны быть такими, чтобы при погружении деталей температура ванны не падала ниже температуры, необходимой для пайки. Перед погружением в ванну подлежащие пайке детали следует очистить и профлюсовать.

Пайка погружением в расплавленный флюс. При этом способе пайки требуется специальный металлический или керамический контейнер (ванна) для флюса. Для нагрева флюса и поддержания его в расплавленном состоянии применяются: внешний нагрев горелками, электрический нагрев специальными нагревателями, расположенными внутри ванны, и нагрев самого флюса за счет прохождения электрического тока ( $I^2R$ ) через расплавленный флюс. Последний способ требует предварительного расплавления флюса внешним источником тепла, так как обычный сухой флюс не проводит электрического тока, а расплавленный флюс уже является проводником электрического тока. Для поддержания требуемого интервала температур пайки нужно обеспечить соответствующий контроль за температурой расплавленного флюса. Размер ванны должен быть таким, чтобы при погружении в нее деталей для пайки температура флюса не падала ниже температуры, необходимой для пайки.

Перед погружением в ванну подлежащие пайке детали необходимо очистить, нанести на них припой, собрать и закрепить в приспособлении. Припой предварительно укладывается на месте пайки в виде колец, прокладок и шайб или же припоем плакируется паяемый металл. Очень важно, чтобы погружаемые в ванну детали были совершенно сухими, так как погружение мокрых деталей может вызвать сильный взрыв. Некоторое количество флюса прилипает к собранному узлу после пайки. Этот флюс необходимо удалять сразу же после пайки, пока детали еще горячие. Любые оставшиеся следы флюса следует впоследствии удалять промывкой в воде или химическими способами после охлаждения паяных деталей.

### **Пайка нагретым блоком**

Для проведения этого процесса пайки необходимо нагреть блок до требуемой температуры, чтобы получить равномерный и достаточный нагрев паяемого соединения для обеспечения растекания припоя. При этом способе пайки припой размещают в виде колец, шайб, прокладок или в виде пасты у места пайки. Соответствующий флюс следует наносить совместно с припоем. При пайке деталей, сильно различающихся в поперечном сечении, их следует предварительно подогреть, чтобы обеспечить температуру, необходимую для процесса пайки.

### **Пайка заливкой**

Этот процесс пайки производится путем заливки расплавленного припоя в паяемое соединение. Соединяемые детали должны быть точно зафиксированы в специальных зажимах. Желательно предварительно подогреть детали, чтобы сократить время процесса пайки и свести к минимуму растрескивание их от напряжений, возникающих при тепловом ударе.

### **Ступенчатая пайка**

Ступенчатая пайка является процессом, применяемым для соединения нескольких деталей в один узел припоями с различной температурой плавления. При этом способе сначала паяют одну часть узла припоем с более высокой температурой плавления. После этого можно выполнить любые дополнительные операции, а затем произвести пайку припоем с более низкой температурой плавления, чем у предыдущего. При этом припой выбирают с таким расчетом, чтобы температура, применяемая при второй пайке, не могла разрушить соединения, спаянные раньше более высокотемпературным припоем. Можно применять также ступенчатую пайку с тремя последовательными процессами.

Можно применять любой из упомянутых выше процессов пайки, но наилучшие результаты дают пайка в печи, индукционная и пайка сопротивлением.

## Пайка электронных ламп

Кроме процессов, описанных выше, в отдельных отраслях техники применяются специальные процессы пайки, вызываемые особыми требованиями. Вакуумная пайка принадлежит к одному из видов специальных процессов пайки и находит особо широкое применение в производстве электронных ламп. Для хорошей работы электронных ламп требуется высокий вакуум. Если эти лампы наполняются различными газами, то необходимо обеспечить хорошую очистку газов. При работе электронных ламп часто развивается высокая температура, а в некоторых случаях такая температура поддерживается в течение всего срока их службы.

Величайшее значение имеет очисткаготавливаемых для пайки соединений; применяемые для ламп материалы должны быть дегазированы настолько, насколько это физически возможно. К вакуумной пайке прибегают часто, так как она обеспечивает получение совершенно чистых поверхностей и дегазацию материалов, которая происходит в процессе пайки. Процесс вакуумной пайки является по существу специальным видом пайки в печи.

**Оборудование.** Вакуумные печи для пайки могут иметь различные форму и размер. В основном вакуумная печь представляет собой замкнутый объем соответствующей конструкции, чтобы поддерживать вакуум и противостоять температурам, необходимым для ведения процесса пайки. Источником нагрева при вакуумной пайке обычно как и при индукционной пайке или пайке сопротивлением служит электричество (см. индукционную пайку и пайку сопротивлением).

**Припой и флюсы.** Припои, применяемые для получения соединений в электронных лампах и подобных устройствах, следует выбирать с особой тщательностью. Для того чтобы обеспечить необходимый вакуум в окончательно собранной лампе, нельзя применять материалы, у которых давление испарения превышает необходимое минимальное давление при рабочих температурах. Это требование исключает применение всех обычных флюсов и налагает много жестких ограничений на количество примесей, которые могут присутствовать в припое. В качестве припоев при вакуумной пайке применяются медь, серебро, золото, платина, никель, родий, иридий и их сплавы. Процесс пайки ведется в атмосфере чистого сухого водорода или в вакууме.

Припой обычно предварительно укладывается в месте соединения в форме колец, шайб, прокладок или в виде пасты. Для некоторых случаев применяются составные части припоя, которые разлагаются или восстанавливаются в процессе пайки. Таким образом, окислы меди, серебра, азотнокислое серебро, хлорная платина применяются в виде пасты или раствора для пайки очень мелких деталей, на которые нельзя предварительно уложить припой в обычной форме.

Техника пайки. Техника пайки электронных ламп подобна технике пайки в печи. Необходимо помнить, что нужно с особой тщательностью очищать подлежащие пайке детали и поддерживать их чистоту до и в течение процесса пайки.

## ГЛАВА 10

### ОПЕРАЦИИ, ПРОИЗВОДИМЫЕ ПОСЛЕ ПАЙКИ

После процесса пайки всегда следует очищать паяные швы от остатков флюса и, если необходимо, то проводить термическую обработку паяных деталей, режимы которой устанавливаются в зависимости от процесса пайки и условий работы паяной конструкции.

Детали, паянные в печи с контролируемой атмосферой, должны быть блестящими и чистыми, если применялась правильная техника пайки. Однако, если в процессе пайки применялся флюс, то остатки его следует полностью удалить во избежание коррозии паяных швов в процессе эксплуатации. Остатки некоторых флюсов растворяются в горячей воде, поэтому детали можно очищать погружением в чистую проточную горячую воду (см. гл. 4, стр. 49).

Если детали были перегреты в процессе пайки и на них наблюдаются цвета побежалости или почернение, которые не удаляются полностью при промывке в горячей воде, то в этих случаях рекомендуется очищать паяные детали в химических ваннах, обдувом песком или крупным песчаником. Если в состав припоя, применяемого для пайки, входят медь или серебро, то очистка с применением азотной кислоты не рекомендуется. После химической очистки детали необходимо хорошо промыть в воде и просушить для удаления остатков химических реактивов.

Паяные детали, которые в процессе работы должны подвергаться переменным нагрузкам, или которые должны быть газонепроницаемыми и спаяны серебряными припоями (ВАg), необходимо после пайки медленно охлаждать до температуры по крайней мере 427° перед закалкой. Если производить слишком быстрое охлаждение паяных швов, имеющих высокую температуру, то в припое могут возникнуть микротрещины.

Можно сочетать процесс пайки с процессом термообработки основного металла, если подобрать припой с соответствующей температурой пайки, близкой к температуре термообработки паяемого металла.

Можно подобрать припой с температурой солидуса выше температуры термообработки для проведения термообработки после пайки или выбрать припой с температурой солидуса ниже температуры термообработки для проведения пайки после термообработки. Третьим вариантом может быть такой выбор процесса нагрева, ко-

торый обеспечит растекание припоя и термообработку за одну и ту же операцию.

Для некоторых особых условий требуется специально подбирать припой и последовательность операций нагрева, чтобы получить надлежащие результаты в отношении определенного основного металла, паяного соединения и условий эксплуатации.

---

## ГЛАВА 11

### КОНТРОЛЬ

Контроль паяных швов является последней важной операцией технологии пайки, применяемой в производстве. Процесс контроля в каждом отдельном случае может быть упрощен, а количество проверок уменьшено или увеличено в зависимости от условий работы конструкции и производственных требований, предъявляемых к паяемым изделиям и изложенных в предыдущих главах при описании выбора способа пайки, припоя, конструкции соединения, метода очистки и пр.

Способы контроля обычно определяются условиями работы паяной детали, а во многих случаях устанавливаются основным потребителем или специальными техническими условиями.

Для получения сравнительных результатов часто применяются опытные или макетные образцы. Это могут быть образцы, выполненные при установлении режима пайки, или образцы, взятые из производства. В любом случае эти образцы показывают минимально приемлемое качество паяного соединения. Такие образцы применяются для определения глубины затекания припоя, количества и размеров пустот в соединении и др. и служат готовыми эталонами для контроля.

Проверочные испытания разделяются на две группы: испытания без разрушения и испытания с разрушением.

#### Испытания без разрушения

*Визуальный осмотр* как метод проверки паяных соединений без разрушения находит самое широкое применение в промышленности. Однако визуальный осмотр не может быть эффективным, если затруднен всесторонний осмотр паяного соединения или если остатки флюса закрывают часть шва. Визуальный осмотр является также предварительным контролем соединения и в том случае, когда применяются другие методы проверки.

Если припой подается в соединение с одной стороны или предварительно укладывается внутрь соединения (обычно соединения внахлестку), вблизи одной его стороны, то наличие тонкого валика (галтели) с противоположной стороны соединения, обнаруживаемое после пайки визуальным путем, свидетельствует о прочно-

сти соединения. Если припой подается в соединение с той стороны, которая должна проверяться (при неправильной практике), то можно получить хороший валик на этой стороне соединения без проникания припоя через шов.

*Испытание давлением* необходимо производить в том случае, когда соединение должно быть плотным и не должно пропускать жидкости или газа. Соединения, подвергающиеся действию низкого давления, можно испытывать воздухом, но соединения, предназначенные для работы под высоким давлением из соображений безопасности, следует подвергать гидростатическим испытаниям. Можно также применять и газы, такие как гелий и фреон (freon). Однако, если применяется газ, то он должен быть инертным и не-вредным для здоровья окружающих в случае утечки. Давление, создаваемое при испытаниях, должно быть всегда больше давления, под которым будут работать паяные соединения, и обычно определяется по спецификации или по специальным нормам.

*Проверка путем флуоресценции и проникающей краски* применяется для обнаружения дефектов, имеющих на поверхности как магнитных, так и немагнитных материалов. Этот метод проверки широко применяется для контроля паяных соединений из нержавеющей стали, которые могут подвергаться коррозионному растрескиванию под напряжением.

*Проверка методом электросопротивления* основана на различном падении напряжения при прохождении электрического тока через поперечное сечение паяного соединения. При пропускании через паяное соединение тока относительно небольшой силы (с одной стороны шва на другую) измеряется общее падение напряжения при помощи сдвоенного мостика Кельвина. Пустоты, имеющиеся в паяных швах, удлиняют путь прохождения тока и таким образом обнаруживаются по увеличенному падению напряжения.

*Рентгеноскопия* применяется до некоторой степени как метод контроля паяных швов. Как правило, рентгеноскопическим методом можно проверить спаянные детали примерно одинаковой толщины и не слишком толстые, чтобы можно было сделать экспозицию перпендикулярно плоскости паяного соединения. Угловое изображение или изображение со стороны шва может дать неправильное представление о паяном соединении. При особой предосторожности можно получить изображение двух сторон шва, например, при соединении трубы.

### Испытания с разрушением

Методы испытаний с разрушением паяных деталей обычно применяются при выборочных испытаниях, которые производятся лишь на небольшой части изготовленной продукции. Результаты таких испытаний суммируются для всей партии паяных деталей и все паяные соединения на различных участках принимаются или бракуются.



В том случае, когда проверка паяных соединений осуществляется без их разрушения, например путем визуального осмотра, можно периодически производить и выборочную проверку шва с разрушением для поддержания более жесткого контроля паяных соединений.

*Испытанию на отди́р* обычно подвергаются соединения внахлестку. Одна часть соединения укрепляется жестко, как в тисках, а другая часть сдвигается относительно шва. Это испытание можно применять в качестве производственного качественного контроля для определения общего качества соединения и количества пустот в паяном шве. Для большинства случаев пустоты, распределенные равномерно по всему шву, могут занимать до 25% общей площади паяного соединения; в случае особо ответственных соединений пустоты обычно не должны превышать 15% общей площади.

*Испытания на разрыв или срез* обычно проводятся для определения прочности паяного соединения. Такие испытания чаще проводятся в лабораториях для определения основной прочности самих припоев и соответствия конструкции соединений. Эти испытания можно применять для проверки относительной прочности паяных соединений и деталей узла. Испытанию на разрыв или срез подвергают паяные соединения для проверки их прочностных характеристик при температурах выше или ниже нормальной. Указанные испытания более широко применяются для исследований, чем для производственного контроля качества, хотя они применяются для отработки процесса пайки выборочных образцов.

*Испытанию на усталость* паяные соединения подвергаются в ограниченных случаях. Как правило, такие испытания требуют продолжительного времени, поэтому в качестве критерия контроля качества они применяются очень редко.

*Испытания на удар*, подобно испытаниям на усталость, ограничиваются лабораторной практикой и проводятся для определения основных свойств паяных соединений. Как правило, обычные образцы с надрезом не являются лучшими для паяных соединений. Для получения более точных результатов требуются соединения специального типа, которые можно подвергать испытанию на удар при температуре выше и ниже нормальной.

*Испытания на скручивание* паяных соединений как контроль качества проводятся очень редко. Эти испытания специально применяются в случаях, когда шпильки, винты или различные трубчатые детали припаиваются к более массивным деталям.

Более подробное изложение любого из указанных выше методов испытаний приведено в «Справочнике сварщика», издание третье.

### Типичные дефекты и их причины

Когда в паяных соединениях имеются дефекты, то это показывает, что некоторые операции процесса пайки не подвергались контролю или что была применена непригодная технология пайки. В настоящей главе приведено описание нескольких типичных де-

фектов, встречающихся при пайке, которые могут быть выявлены путем осмотра. В каждом случае указана причина появления дефекта.

На фиг. 30 показана половина сечения медной капиллярной трубки (в центре), впаянной в узел из нержавеющей стали (показано черным). Указанная стрелкой пустота вызвана присутствием газов в припое. Эта пустота была обнаружена при испытании паяного соединения давлением воздуха при погружении его



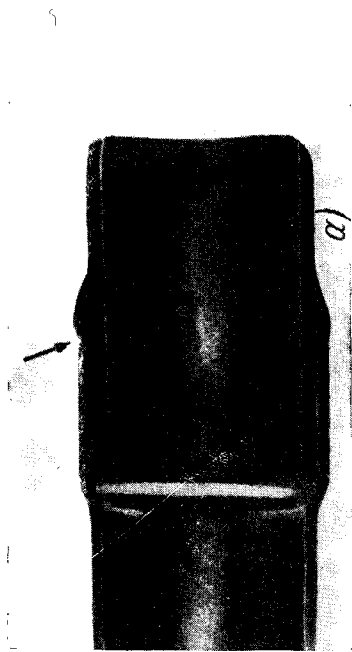
Фиг. 30. Пустоты в трубчатом паяном соединении (указаны стрелкой).

в воду. Возможной причиной образования пустоты является недостаточный нагрев при пайке. При этом происходит неравномерное и неполное заполнение соединения припоем.

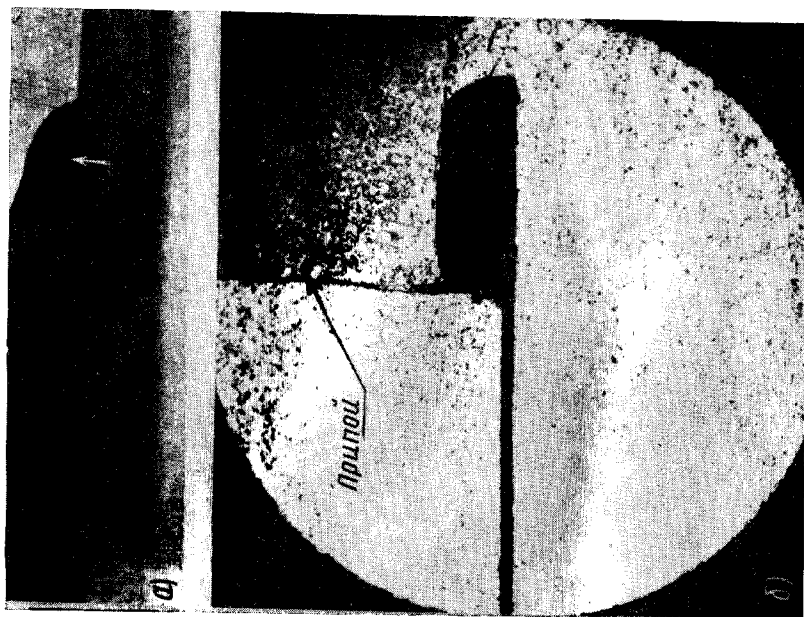
На фиг. 31, а показано продольное сечение соединенных пайкой медных труб, а на фиг. 31, б — увеличенный в 25 раз участок, показанный стрелкой на фиг. 31, а.

Пустоты и неполное затекание припоя в соединение являются результатом недостаточного нагрева в процессе пайки. Такие дефекты, обычно возникающие внутри шва, могут быть выявлены испытанием на скручивание или другими механическими испытаниями. Иногда они обнаруживаются при испытании давлением, если соединение имеет пустоты, вызывающие утечку воздуха или жидкости.

На фиг. 32, а показано продольное сечение соединения, у которого припой не затек в зазор между соединяемыми деталями. Большой валик припоя, расположенный на той стороне, с которой была выполнена пайка, свидетельствует о том, что припой не затек в соединение. Признаком затекания припоя в зазор между паяемы-

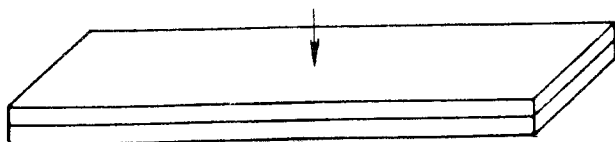


Фиг. 31. Телескопическое соединение медных труб.  
*а* - продольное сечение, *б*—макрофотография участка, показанного стрелкой на снимке *а*.

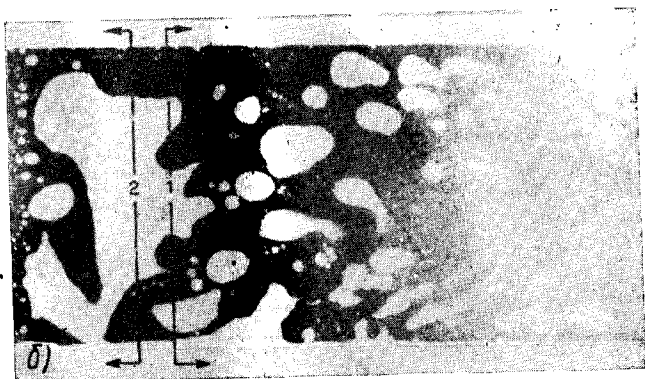


Фиг. 32. Соединение, в котором припой не затек между деталями.  
*а*—продольное сечение, *б*—макрофотография соединения, показанного на снимке *а*.

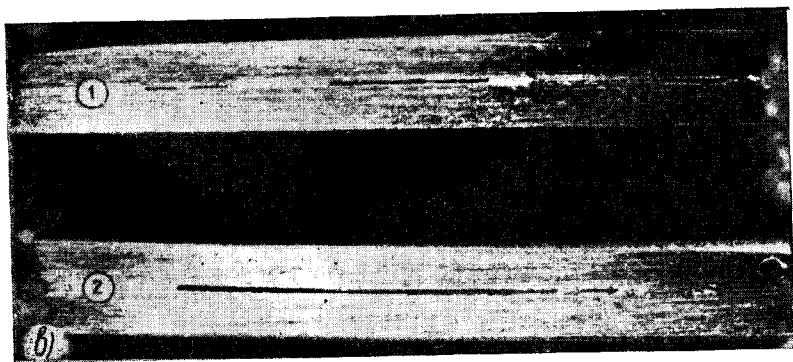
ми деталями может служить образование валика на другой стороне шва, что в данном случае отсутствует. На фиг. 32, б показана макрофотография увеличенного в 25 раз паяного соединения, приведенного на фиг. 32, а.



а)



б)



Фиг. 33. Рентгеновский снимок паяного соединения.  
 а—две стальные пластины, спаянные вместе, б—рентгеновский снимок, в—сечение по площадн, указанной стрелками на снимке б.

На фиг. 33, а показано паяное соединение, подвергнутое рентгенографии. Узел состоит из двух пластинок малоуглеродистой стали, спаянных серебряным припоем. Рентгенографическое просвечивание проводилось в направлении, указанном стрелкой.

На фиг. 33, б приведен рентгеновский снимок паяного шва, на котором белые площадки представляют собой пустоты, имеющиеся в паяном шве. Пунктирные линии 1 и 2 на фиг. 33, б показывают направление сечений, представленных на фиг. 33, в в том месте, где имеются большие пустоты.

## ГЛАВА 12

### АЛЮМИНИЙ И АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Процесс пайки алюминиевых сплавов аналогичен процессу пайки металлов на основе железа с той лишь разницей, что припои для алюминиевых сплавов являются сплавы на алюминиевой основе, а температура пайки соответственно близка к температуре солидуса основного металла.

Не все алюминиевые сплавы можно соединять при помощи пайки, так как еще не найдены припои с достаточно низкой температурой плавления. Припои, рекомендуемые для пайки алюминиевых сплавов, указаны в гл. 3. Припои с достаточно низкой температурой плавления можно получить путем легирования алюминия различными сочетаниями цинка, меди или других металлов с добавкой или без добавки кремния. Хотя некоторые из указанных сочетаний могут иметь хорошие характеристики с точки зрения процесса пайки, однако не удалось получить ни одного сочетания, которое не снижало бы коррозионную стойкость паяных швов. Степень снижения коррозионной стойкости трудно выразить специальным термином, но это снижение настолько значительно, что пайку припои не на основе алюминия применяют в редких случаях.

Имеется ряд термически обрабатываемых и не обрабатываемых термически алюминиевых сплавов, которые можно подвергать пайке. К термически обрабатываемым сплавам, поддающимся пайке, можно отнести алюминиевые сплавы, легированные магнием и кремнием. Эти сплавы паяются при температуре выше температуры ликвидуса припоя. Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы, в состав которых в качестве легирующих элементов входят медь или цинк, нельзя паять обычно применяемыми в промышленности методами, так как температура плавления этих сплавов ниже температуры плавления припоев, указанных в гл. 3. Температурный интервал плавления и физические свойства типичных деформируемых алюминиевых сплавов, поддающихся пайке, указаны в табл. 8.

При пайке алюминиевых сплавов применяются стандартные способы пайки. Сюда относятся пайка горелкой, пайка двухэлектродной дугой с графитовыми электродами, пайка в печи, индукционная пайка, пайка погружением и пайка нагретым блоком. Пайка заливкой и пайка сопротивлением еще недостаточно исследованы.

Таблица 8

## Характерные свойства поддающихся пайке алюминиевых сплавов

ASTM	Наименование сплава		Удельный вес г/см <sup>3</sup>	Примерный интервал температур плавления °С
	по спецификации алюминиевого объединения	промышленное		
990A	1100	2S (A2)	2,71	645—657
M1A	3003	3S (AMц)	2,73	645—655
MG11A	3004	4S (D12)	2,72	630—650
GS11B	6053	53S	2,69	579—650
GS11A	6061	61S	2,70	582—650
GS10A	6063	63S	2,70	616—650
G1A	5050	50S	2,69	627—650
—	6951	J51S	2,70	550—649
—	6062	62S	2,70	582—650
ZG61B*	—	A612	2,81	596—646
ZG61B**	—	C612	2,84	605—643
ZG61A	—	40E	2,84	605—643

\* Отливка в песчаные формы.

\*\* Отливка в кокиль.

дованы, но, по-видимому, эти способы можно принять для пайки алюминиевых сплавов.

Очень существенно, чтобы при проведении всех этих процессов пайки был обеспечен надлежащий контроль температуры. Это достигается при всех способах пайки (за исключением пайки горелкой и двухэлектродной дугой) путем установления автоматического контроля температуры, который будет поддерживать температуру в пределах  $\pm 10^\circ$  от номинальной температуры пайки и обеспечит распределение температуры внутри камеры для пайки в тех же пределах.

В случае ручной пайки горелкой и двухэлектродной дугой необходимая температура пайки регулируется по изменению цвета флюса, а также по плавлению и растеканию флюса и припоя.

Для пайки алюминиевых сплавов применяются обычные процессы пайки. Исключение представляет пайка погружением, когда ванна, заполненная расплавленным флюсом, применяется как в качестве источника нагрева паяемых деталей до температуры пайки, так и для удаления окисной пленки.

При пайке алюминия необходимо применять паяльный флюс. Все флюсы для пайки алюминия изготавливаются в виде порошка. Флюс применяется в сухом виде или замешивается на воде или спирте. В последнем случае флюс наносится на паяемую деталь щеткой (или кисточкой), распылением или погружением во флюс

паяемой детали. Сухой флюс насыпают на паяемое соединение или наносят при помощи прутка припоя, нагретый конец которого погружают во флюс перед началом процесса пайки. Для нанесения кисточкой флюс обычно готовится в виде пасты, состоящей из двух частей флюса и одной части воды (по весу). Более жидкую смесь, содержащую большее количество воды, можно наносить на паяемые детали разбрызгиванием или погружением в нее деталей. Необходимое количество воды в этом случае определяется опытным путем с учетом паяемых деталей и конструкции распылителя. Обычно разбрызгивание флюса на паяемый участок производится в изолированной камере или на оборудовании, которое обеспечивает собирание избытка флюса для повторного использования. После применения стандартные распылители следует промыть во избежание засорения и коррозии.

При пользовании флюсом для пайки алюминия необходимо соблюдать все правила предосторожности. Более подробное изложение этих правил приведено в гл. 23.

### Форма припоев

Для пайки алюминиевых сплавов припой можно применять в виде проволоки или прокладок или в виде равномерного слоя, нанесенного на соединяемые детали при помощи металлизации.

Круглая проволока различных размеров применяется в форме колец или прямоугольников в зависимости от формы паяемого изделия. Припой в виде прокладок изготавливается из плоского прутка или листа, причем геометрия прокладок соответствует форме паяемого узла или соединения.

Если припой наносят на лист в виде сплошного металлического покрытия, то такой лист называется *лист, плакированный припоем*. В этом случае покрытие осуществляется припоем, представляющим собой алюминийкремниевый сплав (BA1Si-2), который наносят с одной или с двух сторон листа. Прочность сцепления нанесенного припоя с металлом листа достигается прокаткой листа, в результате чего получается плакированный лист, которому можно придавать любую форму при помощи штамповки (вытяжки), изгиба или других операций, при которых нанесенное покрытие не отслаивается. Детали из листа, плакированного припоем, можно собирать, покрывать флюсом и паять без дополнительной подачи припоя в соединение.

Плакированный лист часто применяется как часть узла в соединении с листом из основного металла, не покрытым припоем. При плавлении припой под действием капиллярного притяжения заполняет соединительный зазор.

Принцип применения припоя в виде плакированного покрытия экспериментально отработан для труб и листов. Однако этот способ еще не нашел применения для плакирования припоем проволоки, стержней, прутков, а также прессованных, прокатанных штампованных или отлитых деталей.

## Подготовка материалов для пайки

Предварительная очистка деталей перед пайкой зависит от состояния поверхности металла, толщины материала, от сплавов, подвергаемых пайке и, наконец, от требований, предъявляемых к готовому паяному соединению в отношении влаго- или газонепроницаемости. Как легкая, так и густая смазка могут попасть в расплавленный припой. Для удаления этих смазок вполне удовлетворительной является очистка с применением растворителя. Легкая смазка, применяемая для предохранения листов во время транспортировки, в большинстве случаев не смешивается с расплавленным припоем, однако ее желательно смыть растворителями, в особенности при пайке больших поверхностей, когда в процессе нагрева образуется масляный дым, являющийся взрывоопасным.

Во многих случаях очистку поверхности путем травления производить не требуется. Травление обычно применяется для штампованных или пресованных деталей. Однако детали, выполненные путем выдавливания из листа на станке, обычно имеют толстую окисную пленку, которая растрескивается под действием прижимающего инструмента и так вдавливается в поверхность материала, что предотвращает равномерное растекание жидкого флюса и припой. В этом случае желательно применять обычный щелочной раствор или раствор азотной и фтористоводородной кислоты.

Очистку от окислов можно производить при помощи растворов со щелочным или кислотным очистителем. Ниже указаны два процесса очистки и два состава очистителей. Имеется также много других очистительных растворов, дающих равные удовлетворительные результаты.

### *Щелочной процесс очистки*

- обезжиривание в четыреххлористом углероде ( $CCl_4$ ) или любом равном патентованном очистителе;
- погружение в 5%-ный раствор щелочи ( $NaOH$ ) при  $60^\circ$  на время до 60 сек.;
- промывка в холодной воде;
- погружение в холодную 50%-ную азотную кислоту ( $HNO_3$ ) на 10 сек.;
- промывка в холодной или горячей воде;
- просушка.

### *Кислотный процесс очистки*

- обезжиривание в четыреххлористом углероде ( $CCl_4$ ) или любом равном патентованном очистителе;
- погружение в холодную смесь из 10% азотной и 0,25% плавиковой кислоты на время до 5 мин.;
- промывка в холодной или горячей воде;
- просушка.

Такой обработке подвергаются детали из листового материала изготовленные в небольших количествах ручной гибкой или другими подобными способами.

При пайке деталей из тонкого материала желательно применять очистку путем травления или по крайней мере обезжиривание испаряющимися растворителями. При пайке больших поверхностей



алюминиевого теплообменника толщина листа обычно лежит в пределах от 0,15 до 0,30 мм. В этом случае количество припоя, потребного на лист такой толщины, невелико и однородные соединения получаются только в том случае, если вся поверхность листа тщательно очищена. Лучшим способом очистки поверхности является легкое травление, хотя в ряде случаев очистка растворителем может оказаться вполне достаточной.

Припой перед пайкой также желательно очищать путем травления. Припой в виде проволоки или припой в форме прокладки, изготовленной из плоской проволоки, растекается при пайке более равномерно, если с его поверхности удалить травлением пленку окислов, образовавшуюся при изготовлении припоя в виде проволоки.

### Типы соединений

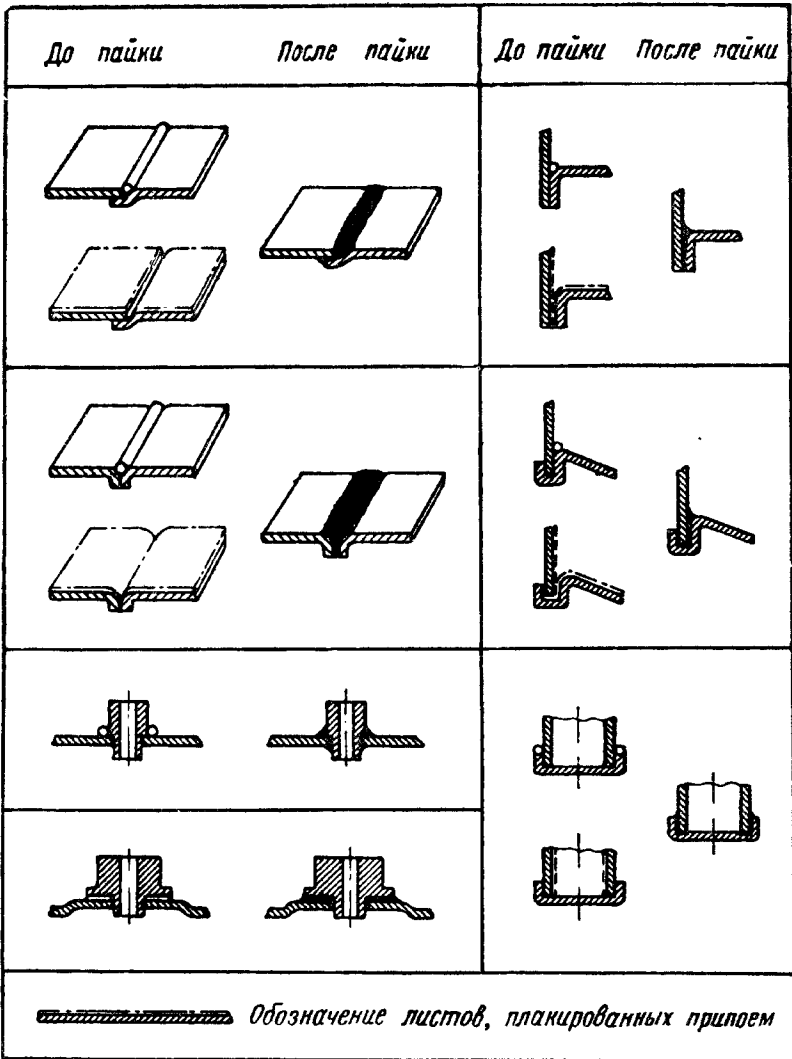
При пайке алюминия и его сплавов обычно применяются соединения внахлестку, которые значительно лучше стыковых (см. фиг. 34 и гл. 6). Однако при применении паяного соединения любого типа следует избегать давления на детали или затяжки их при сборке узла, чтобы облегчить растекание припоя и свести к минимуму количество флюсовых включений в шве. Для соединения внахлестку с перекрытием менее 6,5 мм зазор между соединяемыми деталями должен быть до 0,25 мм; для этих же соединений с перекрытием более 6,5 мм зазор должен быть до 0,62 мм. Однако лучше всего устанавливать зазор путем испытания паяного шва.

Конструкция соединения должна обеспечивать легкость сборки деталей перед пайкой. Закрытые паяные швы следует конструировать с таким расчетом, чтобы обеспечить выход газов из замкнутых полостей во время процесса пайки. Предпочтительно конструировать детали для пайки самофиксирующимися, например, при помощи пазов или такими, чтобы они могли удерживаться в собранном состоянии при помощи заклепок или выступов, которые остаются на деталях после пайки (см. гл. 8).

Фиксаторы и приспособления следует выполнять из таких материалов, которые обеспечивали бы нормальное расширение алюминия во время нагрева без искажения формы детали, т. е. коэффициенты термического расширения алюминия и материала фиксатора не должны сильно различаться. Алюминиевые фиксаторы можно применять в том случае, если их температура плавления выше температуры плавления паяемого сплава и если они имеют такую конфигурацию, что не соприкасаются с расплавленным флюсом и припоем.

### Характеристика соединений

Во всех случаях температура пайки превышает температуру, при которой происходит отжиг основного материала. Следовательно, детали, паянные в печи или в ванне с расплавленным флюсом



Фиг. 34. Типы соединений при пайке алюминиевых сплавов.

и выполненные из алюминиевых сплавов, не подвергавшихся термообработке, имеют механические свойства, соответствующие состоянию отжига этих сплавов.

Детали из термически обработанных основных металлов также отжигаются во время пайки, но их прочность может быть существенно повышена или путем последующей термообработки после пайки или путем закалки с температуры пайки. Последний процесс не всегда возможен и результаты закалки зависят от геометрии деталей. Термически обрабатываемые основные металлы могут подвергаться закалке охлаждением в струе воздуха, в струе воды или же в баке с холодной или горячей водой.

Перед закалкой деталей после пайки должно пройти некоторое время, чтобы паяные соединения могли достаточно затвердеть, в противном случае в результате происходящих при закалке объемных изменений швы вскроются. Воздушная закалка является наиболее мягкой из упомянутых выше.

В некоторых сложных конструкциях растрескивание соединений может иметь место и после полного затвердевания припоя. В таких случаях охлаждение после пайки и термическую обработку нужно выполнять как отдельные операции. Так как время и температура термической обработки зависят от применяемых сплавов, необходимо иметь их полную характеристику.

Пайка деталей из деформируемых термически обрабатываемых алюминиевых сплавов не даст хороших результатов, если детали не будут термически обработаны одним из указанных выше способов. Материалы, не обрабатываемые термически, более экономичны по стоимости и равны по прочности термически обрабатываемым сплавам, если паяные детали не подвергаются последующей термической обработке.

Коррозионная стойкость основных алюминиевых сплавов после пайки не снижается, а коррозионная стойкость паяных соединений такая же, как сварных швов. Детали, подверженные действию атмосферных условий, не обнаруживают признаков большого воздействия коррозии на основном металле или около паяных соединений. Коррозионную стойкость паяных швов в специальных агрессивных средах невозможно описать в общих словах, но обычно коррозионные характеристики паяных соединений близки к характеристикам сварных соединений. Но в ряде случаев для определения коррозионной стойкости паяных швов надо производить специальные проверочные испытания.

В этой связи особое внимание следует обращать на полное удаление с деталей остатков флюсов, которые могут служить очагом коррозии (за исключением случаев применения флюсов, не вызывающих коррозии). Если очисткой после пайки остатки флюса полностью удалить невозможно, то сочетание флюса с влагой на поверхности металла образует раствор, который вызовет коррозию. Такое воздействие не вызывает механического разрушения, но обычно производит поверхностное повреждение деталей.

## Пайка в печи

Для пайки алюминиевых сплавов в печи применяется оборудование, аналогичное оборудованию, используемому для термической обработки этих материалов. Такое оборудование конструируется для работы при температуре до  $650^{\circ}$ , которая достигается в печи при электрическом нагреве элементов сопротивления или при сгорании нефти или газа. Циркуляция печной атмосферы способствует максимальной скорости повышения температуры изделия и улучшает как коэффициент использования печного оборудования, так и растекание флюса и припоя. Медленное повышение температуры нагрева сложных изделий, таких как радиаторы или теплообменники, приводит к существенному отставанию температуры в центре изделия по сравнению с его внешними сторонами. Поэтому циркуляция печной атмосферы через упомянутые изделия необходима для обеспечения полного пронаивания изделий и в центре.

Обычный процесс пайки в печи регулируется таким образом, чтобы время нахождения деталей в печи превышало время, необходимое для нагрева соединения до температуры пайки, не более чем на период от 30 сек. до 2 мин. Слишком большая выдержка деталей в печи при температуре пайки приводит к интенсивной диффузии, потере контроля за растеканием припоя и к разъеданию основного металла флюсом.

Экспериментальные работы по пайке алюминиевых сплавов в специальной безокислительной атмосфере, применяемой для пайки сталей, показали неудовлетворительные результаты в отношении улучшения растекания припоя или ускорения процесса пайки. Необходимость применения флюса не отпала. Окисная пленка на этих материалах в течение процесса пайки заметно не изменяется. Следовательно, воздушная атмосфера является вполне удовлетворительной.

Алюминиевые сплавы иногда паяются со сталью. В этих случаях надо применять безокислительную атмосферу для защиты стали от окисления.

При пайке в печи необходимо соблюдать особую осторожность, чтобы не допустить контакта расплавленного паяльного флюса с металлическими деталями печи, так как флюс вызывает коррозию любого металла, применяемого в конструкции печей. Защита металлических деталей печи осуществляется путем установки мелких противней из обычной стали, на которые стекают излишки флюса. Замена таких противней стоит намного дешевле, чем замена пода или футеровки печи.

В некоторых случаях пайка алюминия в печах, которые периодически применялись для пайки стали медными припоями, вызывала быстрое разрушение нагревательных элементов и футеровки печи. Причиной этого, очевидно, являлось разрушение их флюсом которое имело место при пайке стали при повышенных температурах после того, как печь была использована для пайки алюминия.

Как непрерывные печи конвейерного типа, так и печи с неподвижным подом успешно применяются для пайки алюминия. В некоторых конструкциях печей для быстрого нагрева деталей на входе в печь предусмотрена зона с высокой температурой. В этой зоне детали нагреваются до температуры, отличающейся от температуры пайки на 10—40°, а затем поступают в зону пайки, где температура регулируется в пределах  $\pm 6^\circ$ .

### Пайка погружением

Пайка погружением широко применяется при производстве теплообменников. Процесс пайки заключается в погружении деталей (с нанесенным на них припоем) в расплавленный паяльный флюс. Таким образом, флюсование и нагрев деталей до температуры пайки совершаются одновременно. Существуют разные конструкции ванн и методы их нагрева. Ниже приведены сведения по пайке погружением.

Нагрев ванны за счет сопротивления электронагревателей применяется почти во всех промышленных установках, хотя внешний нагрев пламенем (газовый нагрев) применяется при экспериментальных и подготовительных работах.

Для ванн применяются только керамические материалы, как обладающие достаточным сопротивлением и обеспечивающие долгий срок службы. Металлические ванны из чистого никеля обладают большим сопротивлением, чем ванны из любого другого металла, но срок их службы не превышает 6 месяцев, после чего возникает межкристаллическая коррозия ванны. Ремонтировать протекающие или растрескавшиеся ванны безуспешно, так как очень трудно определить, где кончается участок коррозии, когда площадь, подверженная коррозии, зачищена для ремонта сваркой.

Перед погружением в расплавленный флюс детали, подлежащие пайке, предварительно подогревают. Температуры предварительного нагрева зависят от размера и контуров детали и находятся в пределах от 480 до 566°. Предварительный нагрев применяется для предотвращения затвердевания флюса в ванне, что может иметь место при погружении в ванну холодных деталей, и для осушки деталей, чтобы избежать быстрого образования пара в ванне. Затвердевшие частицы флюса изолируют деталь и закрывают небольшие отверстия, так что расплавленный флюс не может войти внутрь.

Перед применением флюс должен быть обезвожен, так как после плавления во флюсе остается влага от химических соединений. Обезвоживание осуществляется путем погружения во флюс змеевика из алюминиевого листа. В случае присутствия в ванне с флюсом влаги при обезвоживании выделяется водород, который поднимается и сгорает над поверхностью ванны в виде небольшого оранжевого пламени. Для удаления остатков влаги из ванны обработку флюса необходимо производить в течение 2—3 час.

## Пайка горелкой

Пайка горелкой выполняется вручную и подобна процессу газовой сварки. Существенное отличие пайки горелкой от газовой сварки заключается в том, что температура нагрева деталей для пайки достигает такой точки, когда флюс плавится и припой затекает в соединение без плавления основного металла.

При пайке горелкой флюс смешивается с водой или применяется в сухом виде; деталь и припой покрываются флюсом при помощи щетки, погружением в жидкий флюс или напылением.

Для горения применяются смеси кислородо-ацетиленовая, кислородо-водородная, смесь кислорода с другими горючими газами или же смесь воздуха с горючим газом. Горелка регулируется таким образом, чтобы пламя было слабо восстановительным.

## Очистка после пайки

После пайки флюсы, вызывающие коррозию, должны быть полностью удалены с деталей. Флюс после пайки остается в виде твердого, хрупкого слоя, который хорошо растворяется или удаляется химической очисткой. Механическая очистка, например, проволочной щеткой или наждаком, не рекомендуется, так как при этом корка флюса разрушается на мелкие частички, которые вдавливаются в поверхность алюминия и при последующем соприкосновении с влагой могут вызывать коррозию поверхности.

Существует много способов удаления остатков флюса после пайки. Эффективным способом удаления основной части флюса является погружение паяных деталей в горячую воду перед охлаждением после пайки. При этом способе пайки особенно хорошо удалять остатки флюса промывкой деталей в проточной горячей воде фибровой щеткой.

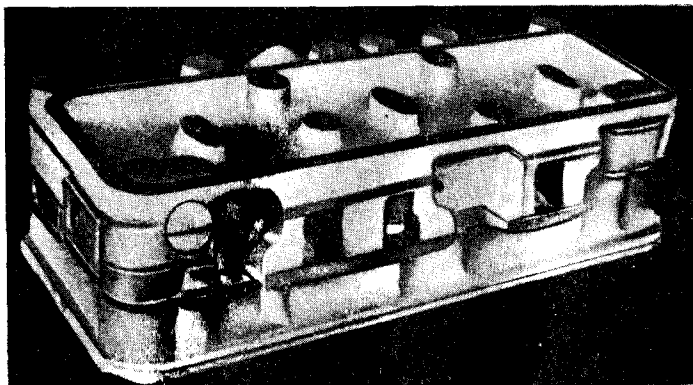
Флюс можно также удалять путем погружения деталей на 5 мин. в ванну с содержанием 10% азотной кислоты и 0,25% плавиковой кислоты или на время от 2 до 5 мин. в ванну с содержанием 1,5% плавиковой кислоты после промывки в горячей воде. Кислотные ванны этого типа всегда применяются в том случае, когда не имеется доступа для очистки соединений щеткой.

Хорошие результаты получаются также и при использовании любых промышленных очистителей. После всех этих способов очистки требуется тщательная промывка чистой водой для удаления остатков химических очистителей.

## Типичные случаи применения пайки

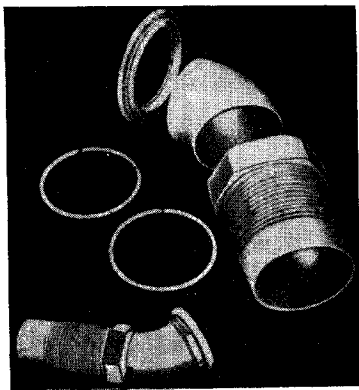
На фиг. 35 показана головка цилиндра, выполненная при помощи пайки четырех простых предварительно отлитых частей. Это является хорошим примером получения сложного узла из более простых деталей.

На фиг. 36 показан штуцер гидросистемы из термически обрабатываемого алюминиевого сплава, выполненный пайкой. Такие штуцеры выдерживают давление до  $140 \text{ кг/см}^2$ .

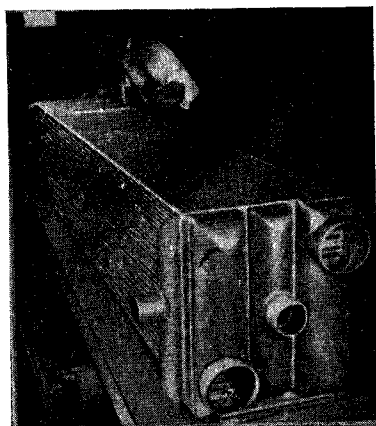


Фиг. 35. Головка цилиндра, выполненная при помощи пайки четырех отдельных отливок.

На фиг. 37 приведен паяный путем погружения теплообменник из листового алюминиевого сплава. Агрегат имеет паяные швы



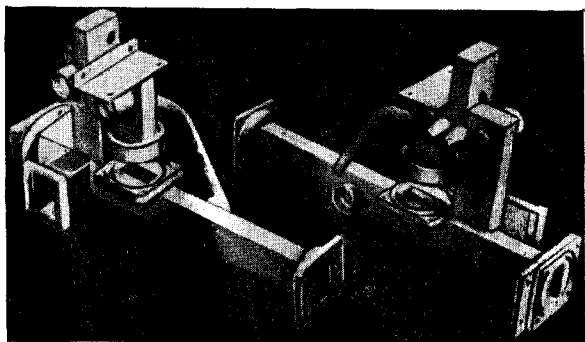
Фиг. 36. Паяный штуцер гидросистемы.



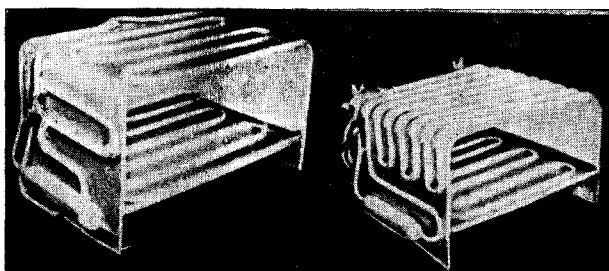
Фиг. 37. Теплообменник, спаянный погружением в расплавленный флюс.

общей длиной более  $32 \text{ км}$  ( $20 \text{ миль}$ ), которые могут выдерживать давление до  $10,5 \text{ кг/см}^2$ . Внутри теплообменник спаян, а фланцевые головки приварены.

На фиг. 38 показан паяный путем погружения волновод радиолокационной установки. Деталь состоит из листа, трубы, отливок и кованных частей.



Фиг. 38. Волноводы радиолокационной установки, паянные погружением в расплавленный флюс.



Фиг. 39. Рефрижераторный паробразователь, спаянный в печи.

На фиг. 39 показан спаянный в печи рефрижераторный паробразователь из листового и трубчатого алюминиевого сплава.

---

## ГЛАВА 13

### МАГНИЙ

#### Материалы

Ввиду того, что процесс пайки магниевых сплавов протекает при относительно высокой температуре, только сплав М1А можно паять с удовлетворительным результатом. В качестве припоя применяется сплав ВМg промышленной чистоты или с небольшой добавкой бериллия (см. гл. 23). Бериллий добавляется только при



пайке в печи, чтобы предотвратить возможное возгорание магния в процессе пайки.

Применяемые для пайки магния флюсы на основе хлоридов (см. табл. 3) обеспечивают очистку основного металла от окислов и капиллярное затекание и растекание припоя. Выполненные соединения хорошо противостоят коррозии в случае полного удаления остатков флюса, которое является очень важным условием.

### Конструкция паяных соединений

Соединения для пайки должны быть сконструированы так, чтобы создать достаточную капиллярность, которая позволила бы расплавленному припою вытеснить флюс из соединительных зазоров.

Вследствие коррозионной активности флюса при конструировании следует предусматривать, чтобы в соединения попадало минимальное количество флюса. Для магния можно применять соединения внахлестку и в стык, как и для других металлов. Зазор между соединяемыми деталями устанавливается в пределах 0,10—0,25 мм. Чтобы в полной мере использовать капиллярное притяжение и получить хорошее растекание припоя, лучше всего устанавливать зазор по нижнему пределу. При пайке путем погружения соединения должны иметь пазы или внутренние прорези для укладки припоя, чтобы предотвратить смывание припоя при погружении детали в ванну с флюсом (см. фиг. 21 и 23).

Соединения внахлестку, выполненные пайкой в печи и путем погружения в расплавленный флюс, имеют сопротивление разрыву в пределах 10,0—11,4 кг/мм<sup>2</sup>. Соединения в стык при пайке горелкой имеют сопротивление разрыву в пределах 12,7—16,3 кг/мм<sup>2</sup>.

### Техника пайки

Факторы, определяющие процесс пайки магния для трех обычных применяемых способов — пайки в печи, горелкой и методом погружения — приведены в табл. 9. Перед пайкой детали из магниевых сплавов должны быть тщательно очищены от масла, грязи, краски и солей хромовой кислоты или окислов. Процесс очистки указан в п. 5 табл. 9.

Применение флюса в соединениях перед пайкой зависит от способа пайки. При пайке в печи применяется флюс в виде сухого порошка, насыпаемого вокруг соединения. Пасты, замешанные на спирту или воде, в этом случае неприменимы, так как затрудняют растекание припоя. Флюс в виде пасты, замешанной на бензоле, толуоле или хлорбензоле, применять можно, но такая паста ложится неровно, так как флюс в этих жидкостях не растворяется и представляет собой суспензию. Эти органические растворители улетучиваются при нагреве до 177—200° в течение 5—15 мин. в сушильных печах или в циркуляционных воздушных печах. Пламенная сушка неприменима, так как при этом обильно выделяется копоть.

## Пайка магния

	Способы пайки		
	в печи	горелкой	погружением
1. Припой	ВМg + 0,002% Ве (миним.)	ВМg	ВМg
2. Основной металл	М1 листовой и штампованные заготовки	М1 листовой и штампованные заготовки	М1 листовой и штампованные заготовки
3. Пределы температуры пайки	610—630°	605—630°	605—630°
4. Флюс	Сухой порошок или хлорбензольная паста	Сухой порошок или спиртовая паста	Сухой порошок или спиртовая паста
5. Очистка перед пайкой	<i>Механическая</i> — стальной щеткой или абразивной бумагой <i>Химическая</i> — травление + осветление в кислотном растворе в течение 2 мин. (см. табл. 10)		
6. Оборудование для нагрева	Электрические или газопламенные печи. Регулирование температуры $\pm 5^\circ$	Ацетилено-кислородная горелка или горелка, работающая на смеси воздуха и природного газа	Электрический или газовый обогрев ванны. Регулирование температуры $\pm 5^\circ$
7. Очистка после пайки	В горячей воде + 1—2 мин. в хромовокислом растворе + 2 часа кипятить в 5%-ном растворе хромпика		

При пайке горелкой можно применять пасту как на спирту, так и на воде, но предпочтение отдается пасте на спирту, так как она обеспечивает лучшее растекание припоя.

При пайке в печи следует применять электрический или газовый нагрев с автоматическим регулированием температуры с точностью в пределах  $\pm 5^\circ$ . Для пайки магния не требуется специальной атмосферы, но атмосфера, получаемая при сгорании газа для обогрева печи, или атмосфера  $\text{SO}_2$  ограничивает растекание припоя и поэтому неприменима для пайки магния. Желательна циркуляция атмосферы печи, так как это уменьшает время нагрева печи и обеспечивает более равномерный нагрев изделий. Время процесса пайки до некоторой степени зависит от толщины применяемого материала. Обычно выдержка при температуре пайки достаточна в течение 1 или 2 мин., за исключением времени, необходимого для достижения температуры пайки, но время выдержки следует доводить до минимума, чтобы избежать чрезмерной диффузии. После удаления из печи спаянные детали охлаждаются на воздухе.

Пайка горелкой осуществляется путем использования нейтрального ацетилено-кислородного пламени или пламени от сгорания

в кислороде других горючих газов. Водородо-кислородное пламя может оказывать некоторое флюсующее действие, если оно входит в непосредственный контакт с флюсом. Нагрев паяемого соединения производится до тех пор, пока флюс не расплавится и затем продолжается более осторожно до тех пор, пока припой не нагреется до температуры плавления и не начнет растекаться по поверхности основного металла. При этом припой должен затекать в соединительный зазор под действием капиллярного притяжения. Если основной металл перегрет, то быстро происходит диффузия, в результате чего ухудшаются свойства основного металла.

При пайке погружением материалом для ванн с расплавленным флюсом служит сталь, никель или шамотно-графитные тигли. Перед погружением в ванну подлежащие пайке детали подогревают, чтобы они были совершенно сухими. В стальной ванне флюс изменяет цвет, но не теряет при этом своего флюсующего действия. Обогрев ванны производится электричеством или газом. Вследствие быстрого нагрева деталей и большого количества флюса получается более хорошее растекание припоя. Кроме того, при этом способе пайки можно применять нагрев деталей при более низкой температуре, всего на несколько градусов выше температуры ликвидуса припоя. Для материала толщиной 1,5—2 мм вполне достаточна температура нагрева 605—610° в течение 30—45 сек.

После пайки и достаточного охлаждения (до 40—50°) соединения нужно промывать горячей водой в течение получаса. Остатки флюса очень гигроскопичны и, если их не смыть с поверхности детали, то они вызывают точечную коррозию. После промывки соединений горячей водой можно применять хромовокислую обработку и двухчасовое кипячение в 5%-ном растворе хромпика. Составы травящих растворов указаны в табл. 10.

Таблица 10

Растворы для химической обработки

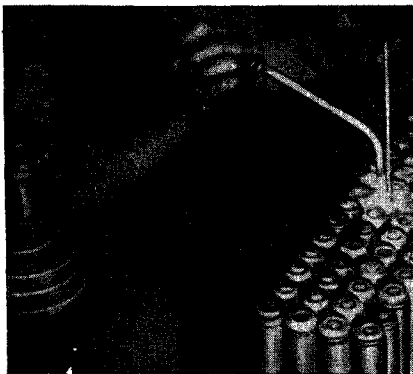
Обработка	Состав	Способ применения
Светлое травление (перед пайкой)	<p>Хромовая кислота — 680 г</p> <p>Натрий азотнокислый — 115 г</p> <p>Кальций фтористый или магний фтористый — 3,5 г</p> <p>Вода — до 4,5 л</p> <p>Температура 20—32°</p> <p>Раствор для промывки:</p> <p>Метасиликат натрия — 200 г</p> <p>Вода — до 4,5 л</p>	<p>Погрузить на 1—3 мин., затем промыть в щелочном растворе, после чего промыть в холодной, затем в горячей воде и осушить на воздухе</p>

Обработка	Состав	Способ применения
Хромово-кислая обработка (после пайки)	Хромпик — 680 г Азотная кислота — 0,85 л Вода — до 4,5 л Температура 20—32°	Погрузить на 1—2 мин., охладить на воздухе в течение 5 сек., промыть в холодной, затем в горячей воде, осушить на воздухе

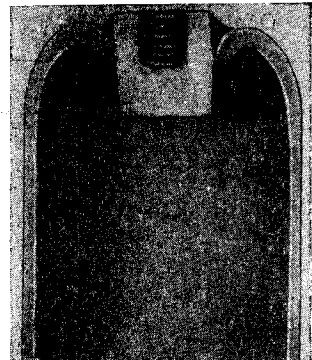
### Контроль

После очистки от остатков флюса производят визуальный осмотр паяного соединения для обнаружения мест, не заполненных припоем, наличие которых свидетельствует о недостаточной чистоте соединяемых деталей, некачественности флюса или слишком низкой температуре пайки. Прочность и плотность паяного соединения можно оценить при поперечном разрезе соединения и осмотре его под микроскопом. Травление в растворе с содержанием от 5 до 10% уксусной кислоты выявляет зону сцепления основного материала с припоем. Флюсовые включения и пористость на соединении простой конфигурации выявляются рентгеноскопией.

Выявление флюсовых включений в более сложных соединениях проверяют путем воздействия на них атмосферы с высокой влажностью (95%) в течение 28 дней. Более подробно о контроле см. в гл. 11.



Фиг. 40. Пайка горелкой гидравлических подъемных поплавков.



Фиг. 41. Поперечное сечение собранного поплавка.

## Типичные случаи применения пайки

На фиг. 40 показана пайка горелкой гидравлических поплавков из магния. ВМg припой расплавляется в кольцевом пазу, после чего затекает в узкий зазор под воздействием капиллярного притяжения. Пламя горелки направляется на пробку, а стенки трубок нагреваются в большей степени за счет теплопроводности.

На фиг. 41 показано поперечное сечение окончательно собранного поплавка.

## ГЛАВА 14

### МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ

За исключением трудностей, связанных с нагревом материалов высокой теплопроводности, пайка меди и ее сплавов не представляет собой трудной проблемы, если тщательно выполнять все необходимые правила процесса пайки.

Большое количество сортов меди и ее сплавов можно свести в группы с идентичными в основном характеристиками, что позволит избежать повторения при приведении сведений в отношении процессов пайки, припоев и т. д.

Сплавы на основе меди и сама медь хорошо паяются всеми стандартными способами (см. гл. 1).

#### Медь

В настоящее время применяются два сорта меди: кислородная и бескислородная медь. К кислородной меди относится электролитическая вязкая медь и медь, полученная огневым рафинированием. К бескислородной меди относится фосфористая медь и бескислородная медь с высокой электропроводностью.

Электролитическая медь и медь огневого рафинирования (кислородная медь). Эти сорта меди восприимчивы как к окисной миграции, так и к водородной хрупкости при повышенных температурах. Они содержат от 0,02 до 0,05% кислорода в форме закиси меди, которая обычно распределена равномерно по всему объему меди. При высоких температурах эти окислы могут мигрировать по границам зерен. Такие скопления, если и не оказывают серьезного влияния на прочность на разрыв, несомненно, снижают пластичность материала.

Водородная хрупкость проявляется в том случае, когда медь подвергается воздействию атмосферы, содержащей водород при повышенных температурах. Так как скорость диффузии водорода в медь намного выше, чем скорость выхода из меди перегретого водяного пара, то в результате образования в меди пустот создается огромное давление. Это явление описано также в гл. 2. При про-

должительном нагреве в водородной атмосфере образование таких пустот усиливается, а внутреннее давление возрастает настолько, что может вызвать разрыв металла по границам зерен.

В том случае, когда миграция кислорода уже произошла и кислород сконцентрировался по границам зерен, образование водородных пустот (хрупкости) становится наиболее вероятным. В результате этого серьезно ухудшаются все механические свойства основного металла. Однако указанное явление контролируется при помощи таких факторов, как время и температура. Быстрая кислородная миграция прекращается как только температура достигнет  $915^{\circ}$ . Водород проникает в медь при температуре выше  $400^{\circ}$  и особенно при температуре выше  $700^{\circ}$ .

Таким образом, при выборе электролитической меди вместо бескислородной описанное выше явление следует принимать во внимание в случае выполнения пайки любым способом.

**Фосфористая и бескислородная медь.** Фосфористая и бескислородная медь не содержат закиси меди и поэтому не подвержены явлениям окисной миграции или водородной хрупкости во время процесса пайки (см. гл. 2). Вследствие этого эти сорта меди применяют в любом случае, когда нужно произвести соединение пайкой. Фосфористую и бескислородную медь можно паять любым из существующих способов пайки, применяя в качестве припоев медноцинковые, меднофосфористые или серебряные припои, за исключением чистой меди.

## Латунь

Медноцинковые сплавы, какими являются латуни, легко паяются любым из существующих способов пайки. Однако пайка латуни в печи с восстановительной водородной атмосферой обычно не применяется, за исключением случая, когда пайке подвергаются различные материалы. Испарение и окисление цинка в любой, но совершенно сухой атмосфере, требует применения флюса даже в том случае, если пайка ведется в защитной атмосфере.

В качестве припоев для латуней с содержанием до 20% цинка можно применять любые из латуней ВCuZn или низкотемпературные сплавы ВCuP и ВAg. Однако вследствие подобия точек плавления латуни с высоким содержанием цинка (более 20% Zn) и латунного припоя (ВCuZn) обычно рекомендуется применять только низкотемпературные припои (меднофосфористые и серебряные).

Обыкновенные свинцовистые латуни с содержанием около 3% свинца можно паять фосфористой медью (ВCuP) или серебром, если применять соответствующий флюс. В противном случае свинцовая окалина значительно затрудняет хорошее смачивание или растекание припоя. Чем выше содержание свинца в латуни, тем труднее получить прочные паяные швы.

## Фосфористая бронза

Фосфористую бронзу можно паять любым из стандартных способов пайки. Низкооловянистые бронзы, сорта E и D, можно паять фосфористомедными припоями, серебром или латунью (BCuZn). Бронзы с высоким содержанием олова, сорта A и C, вследствие низкой температуры плавления нельзя паять латунью (BCuZn). В холоднообработанном состоянии фосфористые бронзы подвержены тепловому растрескиванию («firecracking») (см. гл. 2) и поэтому их нельзя подвергать быстрому нагреву.

## Кремнистая бронза

Сплавы меди с кремнием паяются легко, если применять соответствующий флюс для предотвращения при нагреве образования тугоплавких окислов кремния на поверхности металла. Эта бронза во время пайки не должна испытывать внутренних напряжений, которые в противном случае могут вызвать растрескивание металла в процессе плавления припоя (см. гл. 2). Снятие напряжений достигается путем медленного, осторожного нагрева в процессе пайки.

Кремнистая бронза обладает красноломкостью, поэтому во время пайки нужно предусматривать такую поддержку паяемого узла, которая сводила бы к минимуму любые резкие усилия, оказываемые на паяемый узел (см. гл. 8). В качестве припоев для пайки кремнистой бронзы применяются фосфористая медь (BCuP), латунь (BCuZn) и серебряные сплавы (BAg).

## Алюминиевая бронза

Алюминиевую бронзу можно паять, если применять надлежащую очистку и флюсование материала.

Хорошие паяные соединения алюминиевой бронзы с алюминиевой бронзой или с другими цветными металлами получаются при применении для пайки соответствующего промышленного флюса или специально приготовленной смеси из одной части флюса типа 1 и двух частей флюса типа 3 (см. гл. 4).

При соединении алюминиевой бронзы с черными металлами применяется специальный промышленный флюс.

Время нагрева должно быть минимальным, чтобы избежать чрезмерной диффузии алюминия и компонентов припоя, в результате которой в шве образуется хрупкая прослойка. Это условие следует в особенности выполнять в случае бронзы с высоким содержанием алюминия. Иногда применение припоев с содержанием никеля дает более хорошие результаты.

## Медноникелевые сплавы

Медноникелевые сплавы можно легко паять любым из стандартных способов. Сплав во время пайки не должен испытывать внутренних напряжений, которые в противном случае могут вызвать

растрескивание металла при плавлении припоя (см. гл. 2). Снятие напряжений достигается путем медленного, осторожного нагрева изделия в процессе пайки.

В качестве припоя применяется медь, которая особенно подходит для пайки медноникелевых сплавов (с высоким содержанием никеля) в печи с инертной или восстановительной атмосферой. Однако при температуре пайки медный припой может интенсивно сплавляться с медноникелевым основным металлом, так как медь и никель растворяются друг в друге во всех соотношениях. В результате такого сплавления в шве образуется промежуточный сплав, имеющий более высокую температуру плавления, чем медь, что не позволяет припою полностью заполнять соединение в случае, если требуется очень большая глубина шва. Кроме того, такое взаимное сплавление может в некоторых случаях распространиться в глубь основного металла настолько, что разрушит его.

Медноникелевые сплавы\* (от 5 до 28% никеля) можно паять латунию (сплав ВCuZn) или серебряным припоем, но при пайке латуни необходимо принимать меры предосторожности, так как латуни имеют более высокую температуру плавления. Небрежное ведение процесса пайки может вызвать перегрев и оплавление основного металла.

### Бериллиевая бронза

Этот сплав можно паять серебряным припоем с применением флюса после надлежащей очистки паяемой поверхности (см. гл. 23 — рекомендации по технике безопасности).

При пайке термически обработанного материала следует применять низкотемпературные припои (например, серебряный припой ВAg-1) и местный быстрый нагрев, чтобы сохранить возможно лучшие механические свойства основного металла.

Термообработку бериллиевой бронзы производят после пайки. Поэтому нужно применять припой, имеющий температуру солидуса выше 775°, так как термическая обработка бериллиевой бронзы происходит при температуре несколько выше 775°.

### Разнородные металлы

Медь и сплавы на основе меди можно соединять пайкой друг с другом или с черными и цветными металлами, за исключением сплавов алюминия и магния, если уделить должное внимание выбору припоя, способу пайки и пр.

В том случае, когда подлежащие пайке материалы имеют значительно отличающиеся коэффициенты теплового расширения, конструирование и выполнение паяных соединений с удовлетворительными характеристиками чрезвычайно затруднительно или практически даже неосуществимо.

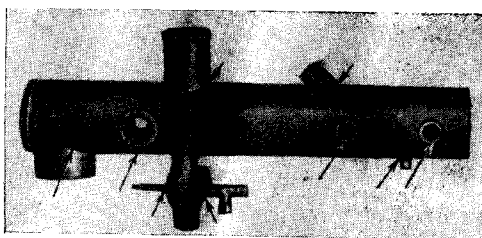
---

\* Типа нейзильбер или мельхиор. (Прим. ред.).

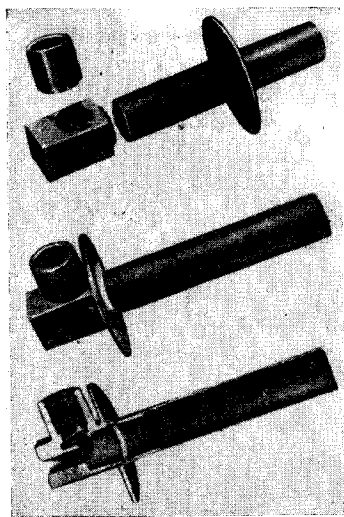




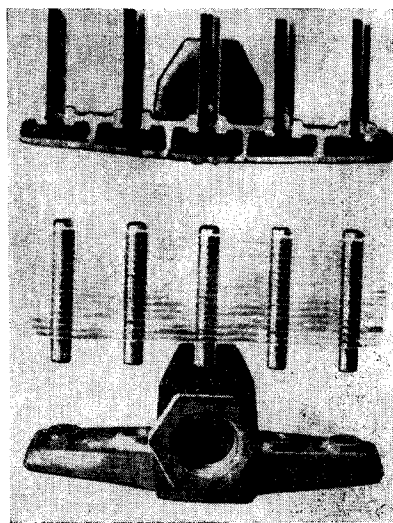
Фиг. 42. Контактная пайка латунных деталей.



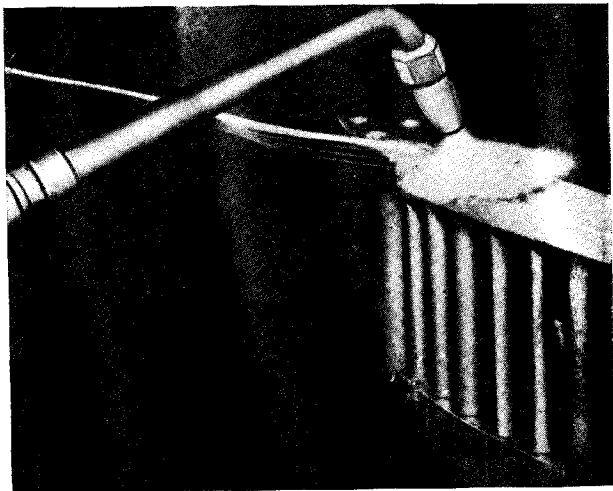
Фиг. 43. Латунный трубопровод, паянный в печи.



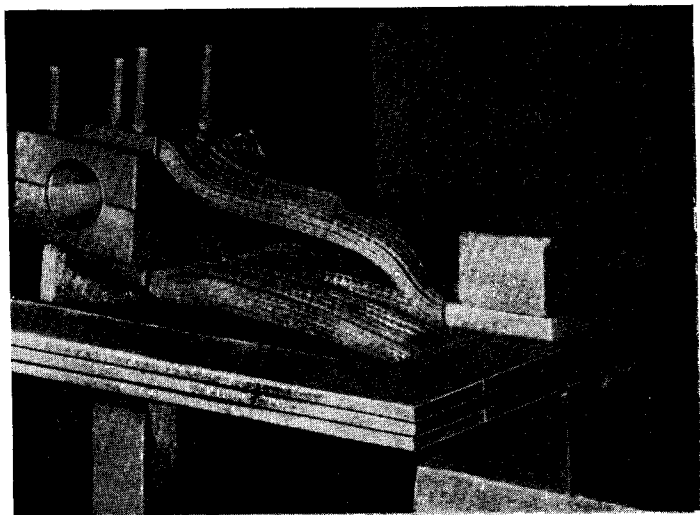
Фиг. 44. Корпус термовыключателя из латуни 70—30, спаянный серебряным припоем.



Фиг. 45. Чугунный коллектор с впаянными в него медными трубками.



Фиг. 46. Пайка горелкой латунной полосы с медным кольцевым сегментом.



Фиг. 47. Пайка сопротивлением медных оплетенных проводов с медными зажимами.

Некоторые сплавы на основе меди подвержены тепловому растрескиванию, возникающему от быстрого нагрева этих сплавов, имеющих остаточные напряжения. Холоднообработанные медноникелевые сплавы типа нейзильбер (или мельхиор), а также свинцовистые латуни, свинцовистые и высокооловянистые бронзы чувствительны к тепловому растрескиванию. Этого растрескивания можно избежать путем медленного нагрева в процессе пайки сделанных из этих материалов напряженных деталей или путем снятия напряжений за счет отпуска деталей перед пайкой при температуре 260—315°.

### Типичные случаи применения пайки

На фиг. 42 показана контактная пайка сопротивлением латунных деталей.

На фиг. 43 приведен паяный в печи трубопровод из латуни. Стрелками показано расположение паяных соединений.

На фиг. 44 приведен корпус термовыключателя из латуни 70—30, спаянный серебряным припоем.

На фиг. 45 приведен пример пайки деталей из разнородных материалов. К чугунному коллектору припаяны медные трубки.

На фиг. 46 показан процесс пайки горелкой латунной полосы с медным кольцевым сегментом, с применением серебряного припоя.

На фиг. 47 показана пайка сопротивлением медных оплетенных проводов с медными зажимами для электрического агрегата.

---

## ГЛАВА 15

### МАЛОУГЛЕРОДИСТЫЕ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Малоуглеродистые и низколегированные стали с успехом подвергаются пайке. Процесс пайки обычно не представляет больших затруднений, хотя и зависит до некоторой степени от содержания углерода в этих сталях. Малоуглеродистые стали паяются легче всего.

Обычно в качестве припоя для пайки углеродистых и низколегированных сталей применяются медноцинковые сплавы (например, припой ВCuZn-3). Для низкотемпературной пайки применяются такие серебряные припои, как ВAg-1 и ВAg-7.

Соединения, паянные медью (ВCu) и медноцинковыми припоями (ВCuZn), обладают высокой прочностью на срез и растяжение. Этими припоями можно выполнять соединения в стык, внахлестку и Т-образные соединения. При неравномерной подгонке соединяемых деталей (неравномерный стыковой зазор) более подходящими являются припои ВCuZn-3, -6 и -7. Последние два припоя дают окраску, хорошо совпадающую с окраской основного металла, но интервалы их температур пайки выше.

Двойные меднофосфористые или тройные меднофосфористосеребряные сплавы (BCuP-1 до BCuP-5) применять в качестве припоев для пайки стали не рекомендуется, так как присутствие фосфора вызывает охрупчивание паяного соединения (см. гл. 2).

Паяные соединения из углеродистой и малолегированной стали имеют хорошие механические свойства. Для получения оптимальных результатов при пайке обыкновенных углеродистых или малолегированных сталей необходимо применять соответствующий флюс или атмосферу, чтобы обеспечить хорошее смачивание припоем и сцепление соединяемых поверхностей.

Паяные соединения из стали обычно конструируют так, чтобы обеспечить очень плотную подгонку соединяемых деталей, обеспечивающую хорошее и полное затекание припоя в зазоры под действием капиллярного притяжения. Поэтому соединения внахлестку, которые обычно подвергаются действию сдвигающих усилий, конструируют с зазором в пределах 0,05—0,127 мм для всех припоев, за исключением меди (BCu), для которой устанавливают зазор от 0,00 до 0,05 мм. Опыты показывают, что наиболее прочные соединения получаются при минимальных зазорах. Такие соединения могут также хорошо противостоять сильным ударным и вибрационным нагрузкам.

### Техника пайки

Перед пайкой подлежащие соединению поверхности должны быть обязательно очищены и освобождены от грязи, окалины, жиров и окислов. Следы грязи и масла, оставленные на поверхности, будут мешать процессу пайки и могут явиться причиной чрезмерной пористости и разрывов в паяном шве.

Для пайки стали применяются все обычные способы пайки. Наиболее широко используются пайка горелкой, в печи и индукционная пайка. Остальные способы применяются в специальных случаях, для которых они уже опробованы и наиболее подходят.

При ручной пайке горелкой припой обычно подается в предварительно профлюсованное соединение. Для того чтобы свести к минимуму коробление и металлургические изменения в стали, ее не следует при пайке перегревать.

При пайке большого числа соединений желательно предварительно размещать припой в местах соединения.

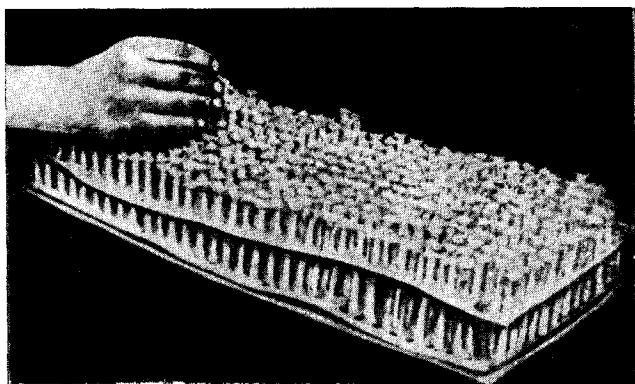
Пайка медью (BCu) стальных узлов в печи с соответствующей контролируемой атмосферой дает хорошие результаты при массовом производстве и не вызывает затруднений при повышенных температурах пайки.

Индукционный нагрев особенно пригоден для пайки деталей, которые нельзя полностью нагревать. В этом случае применяются серебряные (BAg) или латунные (BCuZn) припои с соответствующим флюсом или атмосферой.

Пайку низколегированных сталей желательно осуществлять припоем, который можно применять при температурах пайки ниже температур закалки, т. е. при температурах, не превышающих кри-



Фиг. 48. Пайка стальных труб горелкой.



Фиг. 49. Подготовка для пайки в печи.

тических температур для стали. В том случае, когда узел следует подвергать термической обработке после пайки, применяемый припой должен иметь температуру солидуса значительно выше температуры термической обработки во избежание повреждения соединения.

Когда температура пайки превышает критические точки стали, трудности пайки вообще возрастают соразмерно степени закалки в зоне теплового воздействия. Так как степень закалки зависит также от скорости охлаждения с температуры пайки, медленное охлаждение, которое вызывает минимальную закалку, благотворно влияет на соединение. Если применяется быстрое охлаждение, то может произойти растрескивание вследствие возникновения неравномерных температурных напряжений.

Средне- или низколегированные стали в закаленном состоянии при пайке подвергаются некоторому отжигу в зоне теплового воздействия. Этот отжиг будет минимальным в том случае, когда применяется припой с низкой температурой плавления и когда время выдержки при температуре пайки будет как можно меньше.

### Типичные случаи применения пайки

На фиг. 48 показана пайка стальных труб. Применяется в самолетостроении и других областях.

На фиг. 49 показана подготовка для пайки в печи стальных фланцев к маленьким стальным трубкам.

---

## ГЛАВА 16

### НЕРЖАВЕЮЩИЕ СТАЛИ

При современном состоянии развития техники пайка нержавеющей стали не представляет особых трудностей и производится обычными способами. Однако надлежащая техника пайки, материалы и применяемое оборудование имеют более важное значение, чем при пайке большинства обычных металлов.

В настоящей главе приведено описание пайки нержавеющей стали с содержанием 16—26% хрома и 8—25% никеля, а также хромистой стали с содержанием 11% хрома или более. Последовательность процесса пайки этих материалов такая же, как и для углеродистой стали. Однако некоторые свойства этих сталей выдвигают специальные проблемы, которые надо разрешить и с которыми придется встретиться (см. гл. 2).

Нержавеющие стали находят применение там, где требуется сопротивление одной или нескольким коррозионным средам или где необходимы прочность и сопротивление окислению при повышенных температурах. Ввиду того, что рабочие условия, при которых применяются эти стали, весьма разнообразны, трудно или почти

невозможно предсказать срок службы паяных соединений в специальных условиях. Поэтому выбор соответствующего способа пайки и припоя лучше всего производить путем испытания паяных соединений в действительных условиях их работы. Но в тех случаях, когда проведение таких испытаний невозможно или неосуществимо, приведенные в данной главе сведения могут послужить основой для правильного разрешения любой проблемы. Особо важное значение имеет раздел «Сопrotивление паяных соединений тепловому воздействию и коррозии».

### Основные металлы

Хромоникелевые стали. Этот тип сталей обычно хорошо поддается соединению при помощи пайки. Нестабильные стали, такие как 302, 303 и 304, способны выделять карбиды по границам зерен при нагреве до температур в пределах 480—700°. Выпадение карбидов ухудшает коррозионную стойкость этих сталей. Степень карбидных выделений зависит от времени и температуры нагрева. Поэтому это явление можно свести к минимуму, если сделать цикл пайки возможно более коротким. При минимально коротком цикле пайки эти материалы можно паять без существенного уменьшения их коррозионной стойкости.

Выделение карбидов в нержавеющей сталях фактически предотвращается при легировании их карбидостабилизирующими элементами, например ниобием или титаном. Стали 321 и 347, так называемые *стабильные нержавеющей стали*, можно паять гораздо большим количеством припоев при более продолжительном цикле, не опасаясь ухудшения их коррозионной стойкости.

Нестабильные стали модифицированного состава, такие как 304L (ELC), в которых содержание углерода не превышает 0,03%, можно паять в сущности с использованием той же широкой номенклатуры припоев при удлиненном цикле пайки, как и стабильные стали.

Выпавшие карбиды в нержавеющей сталях могут снова растворяться соответствующей термической обработкой после пайки, если применяются высокотемпературные припои. Более полное описание процесса выделения карбидов изложено в гл. 2. Хромоникелевые стали подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением в присутствии расплавленного припоя. Это явление происходит в том случае, когда подвергаемый пайке основной металл находится в напряженном состоянии вследствие наличия остаточных напряжений или в результате воздействия на него внешней нагрузки. Жидкий припой проникает в основной металл вдоль границ выделения зерен в точках напряженных участков, сильно ослабляя паяемый металл. Поэтому паять можно только материал, предварительно подвергнутый отпуску для снятия внутренних напряжений. Сборку и поддержку паяемых деталей в процессе пайки нужно производить так, чтобы избежать возникновения напряжений в деталях при нагреве. Подробно об этом см. в гл. 2.

**Хромистые стали.** Эти стали имеют свои собственные физико-механические характеристики и в некоторых случаях могут заменять хромоникелевые стали. Стали 405, 410, 416, 420 и 440 закаляются при охлаждении с температуры выше 760°. Для пайки этих сталей следует применять низкотемпературные припои, чтобы избежать закалки сталей после пайки. Указанные типы сталей также подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением (см. гл. 2). Сталь 430 в особенности подвержена особому типу щелевой коррозии, о которой речь будет ниже.

**Разнородные металлы.** Все нержавеющие стали можно соединять пайкой с другими обычно применяемыми металлами и сплавами, за исключением алюминия и магния. При пайке разнородных металлов следует применять флюс, который оказывал бы эффективное действие на оба соединяемых металла. Указанное соображение справедливо и при использовании атмосфер. Применяемый припой должен быть также пригодным для пайки обоих металлов.

Если сборка подлежащего пайке узла происходит при нормальной температуре, то соединительный зазор устанавливается с расчетом на его изменение при температуре пайки. Коэффициенты теплового расширения различных металлов приведены в Приложении. Как и при всех способах пайки, соединяемые части должны нагреваться до температуры пайки в одно и то же время. При этом следует принимать во внимание теплопроводность и массу паяемых деталей. Так как размеры деталей при нагреве в процессе пайки увеличиваются, то получить удовлетворительное соединение становится все труднее, в особенности, если соединяемые материалы имеют различные коэффициенты расширения.

## Припои

Для пайки нержавеющих сталей применяются серебряные припои классификации ВAg-1 до ВAg-7 включительно, медные припои ВCu и медноцинковые ВCuZn-1, -2, -3, -6 и -7. Тип наиболее подходящего припоя определяется условиями работы соединения и характеристикой основного металла. Для случаев, когда коррозионная стойкость является определяющим фактором, рекомендуется применять припои ВAg-3 и ВAg-4, помимо тех припоев, которые не содержат никеля. Высокотемпературные припои типа никель—хром (ВNiCr), серебро—марганец (ВAgMn) и медь (ВCu) обеспечивают соединения высокой прочности при повышенных температурах (см. гл. 6). Эти припои обычно применяются для пайки в печи с восстановительной атмосферой высокой чистоты и исключительно низкой точкой росы.

Серебряный припой ВAg-1 образует паяные соединения с хорошими прочностными характеристиками. Относительно узкий интервал температур пайки этого припоя позволяет применять его для соединения нестабильных типов нержавеющих сталей. Припой ВAg-2 также используется для пайки, но требует несколько более



высоких температур нагрева. Он особенно подходит для тех случаев, когда допуски для соединительных зазоров не могут быть точно выдержаны, как это требуется в случае припоя ВAg-1. Припой ВAg-2 не следует применять, когда время нагрева чрезмерно велико, вследствие тенденции этого припоя к ликвации. Применение серебряного припоя ВAg-7 особенно важно при производстве изделий из нержавеющей стали; так как он имеет белый цвет и не содержит кадмия, то его используют при изготовлении оборудования для пищи. Меднофосфористые припои (BCuP) не дают удовлетворительных результатов при пайке нержавеющей сталей, так как присутствие фосфора вызывает охрупчивание этих сталей (см. гл. 2).

### Флюсы и атмосферы

В гл. 4 приведены сведения, на основании которых следует выбирать флюсы и атмосферы для пайки. При пайке нержавеющей сталей с соединяемых поверхностей следует удалить пленку окиси хрома и предотвратить дальнейшее образование пленки. Для этих материалов требуется специальный флюс.

Флюсы нужно применять в виде пасты, чтобы полностью покрыть соединяемые поверхности. Иногда путем незначительного относительного перемещения соединяемых поверхностей обеспечивают равномерное распределение флюса и полное смачивание поверхностей.

Применяемая для пайки в печи атмосфера должна предотвращать образование окислов хрома, поэтому атмосфера должна быть очень чистой и достаточно сухой.

### Техника пайки

Для получения паяного соединения из нержавеющей стали можно применить любой способ пайки. Оборудование для нагрева должно быть сконструировано так, чтобы обеспечить надлежащую скорость нагрева. Нестабильные типы нержавеющей стали следует нагревать и охлаждать быстро, чтобы свести к минимуму выделение углерода в виде карбидов. Нагрев в основном должен быть быстрым, что предотвратит испарение флюса прежде, чем будет достигнута температура пайки. Скорость нагрева не должна быть настолько большой, чтобы вызвать перегрев поверхности стали прежде, чем внутренние части соединения нагреются до температуры пайки. При этом нужно учитывать различие в массе деталей и разнородность металлов (если такие металлы применяются). В большинстве случаев нержавеющую сталь паяют горелкой, индукционным способом, методом сопротивления и в печи.

**Предварительная очистка.** Очень важное значение имеет надлежащая очистка соединяемых поверхностей перед пайкой. Очень тщательная очистка соединяемых поверхностей в случае нержавеющей сталей даже более важна, чем в случае углеродистых сталей. В случае углеродистых сталей можно полагать, что

флюсы будут растворять, по крайней мере, тонкие пленки окислов, что не будет иметь места в случае нержавеющей стали. Соответствующие флюсы вообще могут только предотвратить окисление металла во время процесса пайки. Коррозионная стойкость нержавеющей стали обусловлена наличием на ее поверхности устойчивых оксидных пленок, которые образуются при соприкосновении стали с воздухом. Эта оксидная пленка очень тугоплавкая, поэтому настоятельно рекомендуется удалять ее механической очисткой непосредственно перед пайкой.

Механическая очистка производится наждачной бумагой или полотном, а также напильником или на станке. Такие загрязнения, как жир или смазка, следует тщательно удалять перед пайкой. Операции по механической очистке и обезжириванию соединяемых поверхностей следует производить непосредственно перед сборкой соединяемых деталей для пайки. Если необходимо получить шов высокого качества при пайке ответственного соединения, то ни один из названных этапов подготовки поверхности опустить нельзя. При надлежащей предварительной очистке можно получить хорошие швы на механически обработанных нержавеющей сталях.

**Очистка после пайки.** Остатки флюса с паяных узлов из нержавеющей стали можно удалять различными стандартными способами, как, например, промывка холодной или горячей водой, химическая обработка или механическая очистка в сочетании с предшествующими способами.

Очистка паяных соединений азотной и соляной кислотами не рекомендуется, так как они воздействуют на основной металл или на припой, разъедая их. Иногда некоторые сорта нержавеющей сталей в процессе пайки покрываются пленкой окислов по всей поверхности теплового воздействия. Если это оксидное покрытие тонкое, то его удаляют пескоструйной обработкой или обдувкой металлической дробью. Стальную дробь не применяют, так как стальные частицы прилипают к нержавеющей стали, ржавеют или становятся очагами коррозии.

### **Сопротивление паяных соединений тепловому воздействию и коррозии**

Выбор нержавеющей стали в каждом отдельном случае определяется или ее жаропрочностью или устойчивостью против коррозии. Отсюда логически возникает вопрос: «Зачем же применять нержавеющую сталь, если ее нужно паять материалом, который не обладает стойкостью против теплового воздействия и коррозии?» Ответом может служить большое количество припоев, которое можно применять с нержавеющей сталью. Серебряные припои устойчивы против многих коррозионных сред, которые не воздействуют на нержавеющую сталь. Площадь, занимаемая швом, обычно мала по сравнению с общей площадью поверхности и поэтому представляет собой только маленький участок для коррозии. В отношении жаростойкости имеются несколько стандартных и специ-

альных припоев, очень стойких в отношении высоких температур. Однако некоторые соединения из нержавеющей стали, паянные серебряными припоями ВAg, имели коррозионные повреждения, когда на них воздействовала обыкновенная вода из водопровода. Наблюдалось также преждевременное разрушение паяных соединений под действием воды с растворенным в ней хлором.

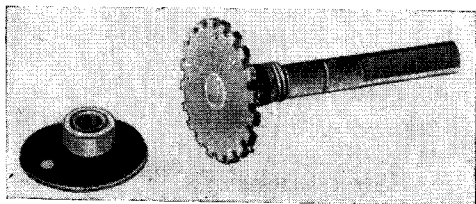
Исследования этих поврежденных соединений показали, что разрушение произошло вследствие нарушения связи между припоем и нержавеющей сталью. Полагают, что нарушение связи было вызвано электрохимическим явлением, происходящим между серебряным припоем и нержавеющей сталью. Такое явление наблюдается лишь в том случае, когда соприкасающаяся с соединением вода находится в спокойном состоянии. Движущийся поток воды предотвращает электрохимические процессы и коррозия приостанавливается. Этот тип повреждения соединения называется *щелевой коррозией*.

Некоторые исследователи указывают, что добавка небольшого количества никеля к серебряным припоям полностью предотвратит возможность возникновения щелевой коррозии, за исключением стали 430. Но даже и в случае применения этой стали скорость распространения коррозии замедляется до заметной степени. Если в качестве припоя применять специальный сплав с содержанием олова и никеля, то и в соединениях из стали 430 щелевая коррозия не возникает. Большое количество соединений из нержавеющей сталей, выполненных пайкой серебряными припоями, не имели коррозионных повреждений в условиях эксплуатации. Однако для предупреждения коррозионных разрушений следует уделять особое внимание жидкостям, которые будут находиться в контакте с паяным соединением, и выбору надлежащего припоя.

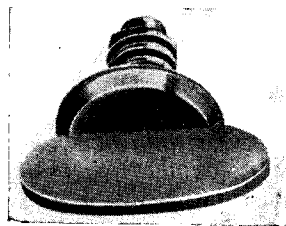
### Типичные случаи применения пайки

На фиг. 50 показаны паяные стопорное приспособление и кулачковая шайба из нержавеющей стали.

На фиг. 51 показан крепежный болт из нержавеющей стали, паянный горелкой.

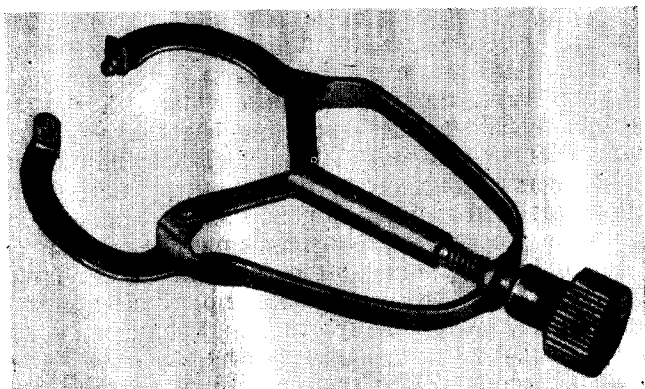


Фиг. 50. Паяные стопорное приспособление и кулачковая шайба из нержавеющей стали.



Фиг. 51. Крепежный болт из нержавеющей стали, паянный горелкой.

На фиг. 52 приведено зубчатое приспособление из нержавеющей стали, части которого соединены пайкой.



Фиг. 52. Паяное зубчатое приспособление из нержавеющей стали.

## ГЛАВА 17

### ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫЕ И БЫСТРОРЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Малоуглеродистые стали — это стали с содержанием максимум 0,30% углерода; к среднеуглеродистым сталям относят стали с содержанием от 0,30 до 0,45% углерода; высокоуглеродистые стали содержат более 0,45% углерода. Сведения по вопросу пайки малоуглеродистых и низколегированных сталей приведены в гл. 15.

Инструментальные стали с содержанием от 0,60 до 1,25% углерода известны как *углеродистые инструментальные стали*. Эти стали, за исключением тонких сечений, следует подвергать закалке, чтобы получить максимальную твердость при термической обработке. Инструментальные стали, содержащие различный процент легирующих элементов, необходимых для придания им специальных свойств, таких как малая восприимчивость к термообработке, повышенное сопротивление истиранию, большая жесткость или улучшенные свойства при высоких температурах, относятся к *легированным инструментальным сталям*. Классификации этих сталей пока не существует. Они известны под различными торговыми марками и сортами, а их свойства и металлографические характеристики в достаточной степени раскрыты в информации заводов поставщиков и в различных справочниках.

*Быстрорежущие стали* хотя по определению логически относятся к легированным инструментальным сталям, но выделены специ-

ально вследствие их широкого применения в промышленности для изготовления режущих инструментов. Быстрорежущие стали содержат вольфрам и (или) молибден, хром и ванадий как основные легирующие элементы. Обычный состав этих сталей — 18% вольфрама, 4% хрома и 1% ванадия.

Так как твердые сплавы относительно дороги и склонны к хрупкому разрушению, когда подвергаются ударным нагрузкам, то в промышленной практике принято применять на резцах относительно небольшие твердосплавные пластины. Такие пластины закрепляются на стальном стержне пайкой или механически. Подробное описание см. в гл. 22.

Для получения удовлетворительных паяных соединений указанные материалы необходимо очищать от масла, окисной пленки и других посторонних загрязнений. Обточенным и шероховатым поверхностям всегда отдается предпочтение по сравнению со шлифованными, так как хорошо отполированные поверхности затрудняют смачивание и растекание флюса и припоя.

Соединительный зазор определяют для каждого отдельного случая пайки с учетом коэффициента расширения соединяемых материалов и метода нагрева. Надежное соединение при пайке серебряными припоями ВAg получается при зазоре между паяемыми деталями в пределах 0,05—0,125 мм. При пайке медью соединение необходимо сжимать для уменьшения зазора.

При пайке припой можно подавать вручную или укладывать у места соединения (см. гл. 3 и 6). Если для снятия окисной пленки нужна соответствующая восстановительная атмосфера, то флюс не применяют. Пайка медью обычно выполняется в контролируемой атмосфере, при которой обезуглероживание стали не происходит. Как правило, в случае высокоуглеродистой инструментальной стали пайку лучше всего производить до закалки или одновременно с ней. Закалка углеродистой стали производится с температуры 760—815°. Припой с температурой пайки выше 815° применяются, когда пайку производят до термообработки, а если припой имеет температуру солидуса ниже или около 815°, то пайку и закалку производят совместно. Если соединение находится вне зоны критических температур, то деталь можно спаять после термообработки при условии, что данный участок соединения можно подвергнуть местному нагреву без нагрева остальных деталей узла выше температуры их отпуска. Если же нужно нагреть детали, находящиеся в зоне критических температур, до температуры выше их первоначального отпуска, то твердость деталей может понизиться.

Успешная пайка легированных инструментальных сталей зависит от знания индивидуальных особенностей этих сталей. Эти стали могут иметь очень разнообразный химический состав и поэтому могут вести себя по-разному при термической обработке и нагреве для пайки. Достаточно сказать, что указанные легированные стали должны быть тщательно изучены для того, чтобы определить для них режим термической обработки, род необходимой охлаждающей

среды (вода, масло или воздух), самый подходящий припой и технику сочетания режимов термической обработки и пайки, чтобы получить максимально хорошие свойства при эксплуатации.

Для пайки быстрорежущих инструментальных сталей, некоторых высокоуглеродистых и высокохромистых инструментальных сталей, которые имеют относительно высокую температуру отпуска, можно применять специальные методы пайки. Эти сплавы обычно имеют температуру отпуска в пределах 540—650°. В то же время имеются припои с температурой пайки в пределах 600—650° (см. гл. 3). Таким образом, представляется возможным сочетать отпуск и пайку указанных сталей. Паяные детали после нагрева для отпуска можно вынимать из печи, подвергать вновь пайке при помощи местного нагрева соединения и затем спаянный узел вновь загружать в печь для уравнивания температуры. Такие операции можно производить с этими материалами с относительно малой потерей твердости.

Пайка имеет очень большое значение при ремонте режущего инструмента. Каждое предприятие применяет при ремонте инструмента свои собственные приемы, которые невозможно без труда применять на других предприятиях и нельзя описать в настоящем кратком руководстве, чтобы они принесли потребителю материальную пользу.

Тип применяемой стали, природа инструмента, меры для облегчения пайки и разработка наиболее подходящей техники пайки — наиболее важные факторы. Сведения, приведенные в отношении инструментальных сталей, применимы в основном и к ремонту стальных резцов пайкой.

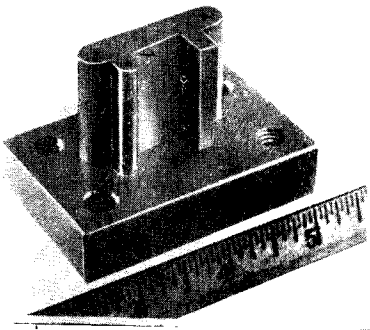
Ниже приведены несколько полезных замечаний. Резцы, подлежащие ремонту, необходимо предварительно нагревать в печи до возможно высокой температуры, при которой не происходит чрезмерного уменьшения твердости. Затем производят пайку резцов, после чего их снова загружают в печь, чтобы устранить резкие температурные градиенты, могущие вызвать напряжения, достаточные для образования трещин в основном металле и последующего разрушения резца или паяного соединения.

Для получения удовлетворительных паяных соединений необходимо знать условия их работы, а также механические и металлургические характеристики материала.

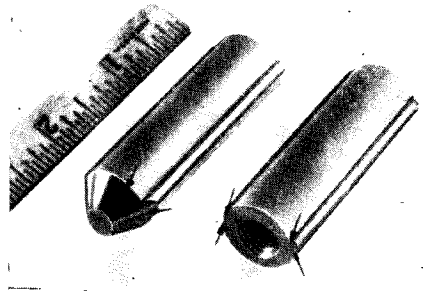
### Типичные случаи применения пайки

На фиг. 53 показан спаянный в печи стальной пуансон из стали с содержанием 1,5% углерода и 12% хрома. Детали спаяны как горизонтальными, так и вертикальными швами. Пайка производилась медным припоем в водородной атмосфере.

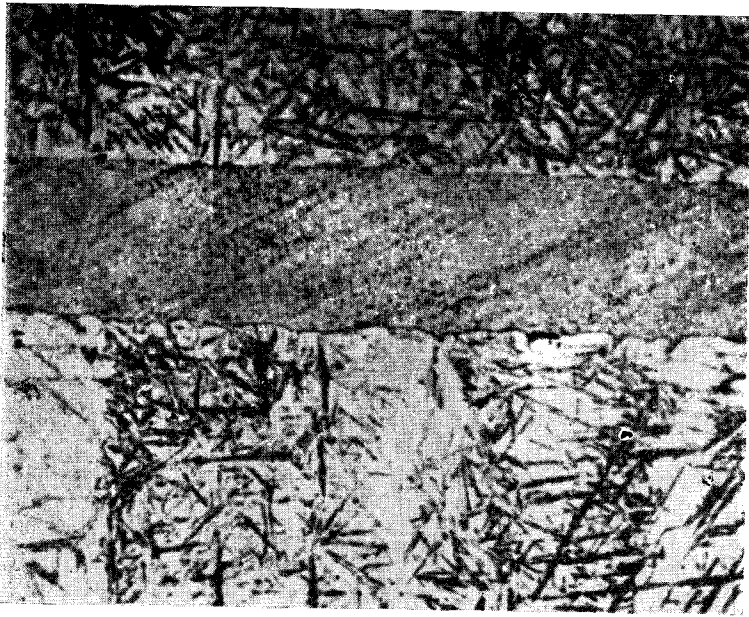
На фиг. 54 показан спаянный в печи пуансон из стали с содержанием 1% углерода, 5% хрома и 1% молибдена. Пайка производилась серебряным припоем в водородной атмосфере. Закалка производилась в сочетании с процессом пайки.



Фиг. 53. Паянный в печи стальной пуансон.

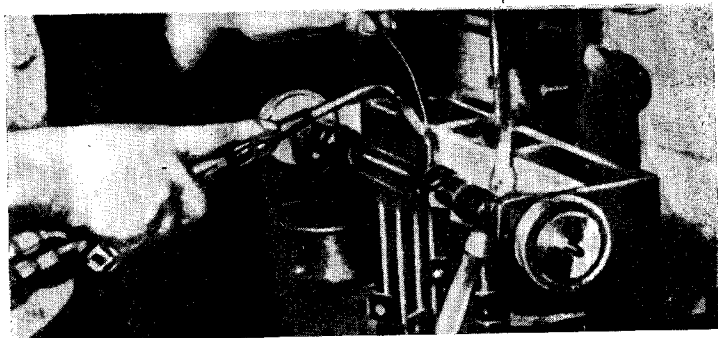


Фиг. 54. Собранный стальной пуансон.



Фиг. 55. Микрофотография паяного соединения, приведенного на фиг. 54.

На фиг. 55 приведена фотография микрошлифа паяного соединения, показанного на фиг. 54.



Фиг. 56. Пайка горелкой реза из высоколегированной стали.

На фиг. 56 показан процесс пайки горелкой реза из высоколегированной стали.

## ГЛАВА 18

### ЧУГУН

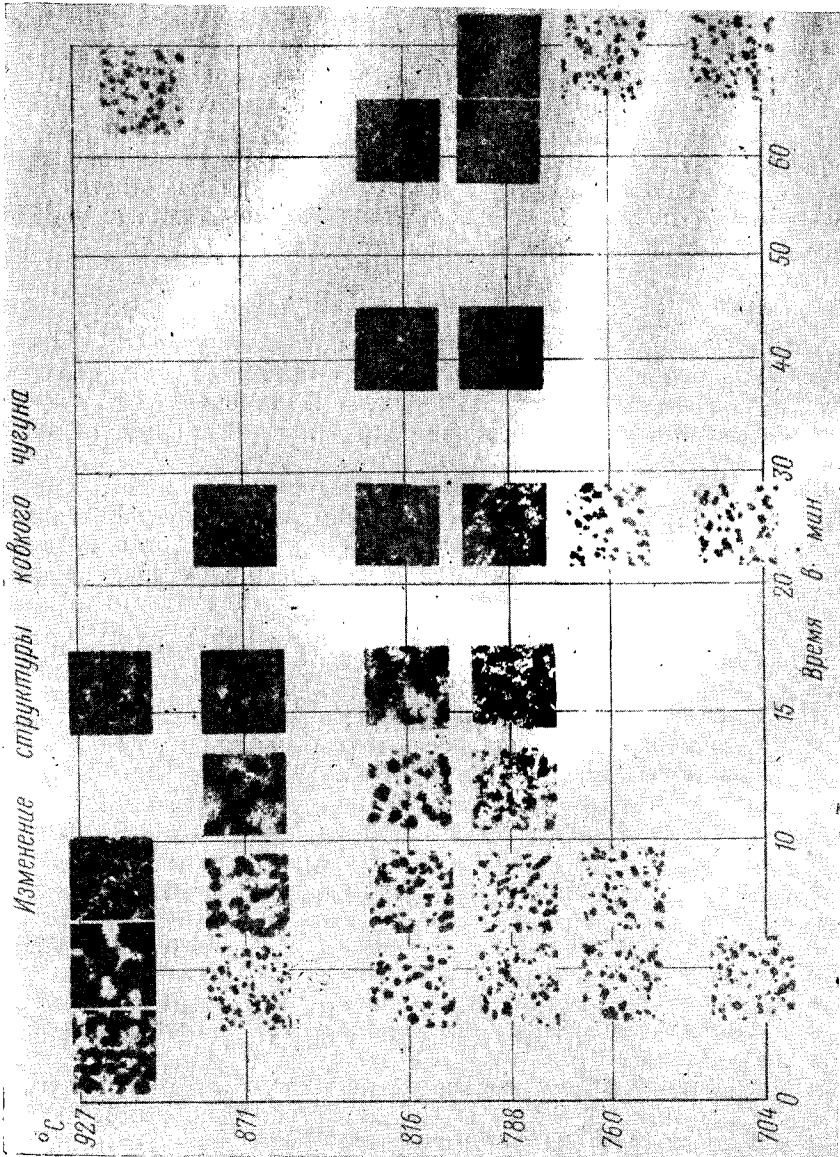
Имеются различные сорта чугуна: белый, серый, ковкий и чугун, способный деформироваться в холодном состоянии \*. Существует много областей, где желательно применять пайку для соединения деталей из различных сортов чугуна (ковкого и деформируемого) между собой или с другими разнородными металлами. Белый чугун редко подвергается пайке.

Только за последние несколько лет пайка обычного серого чугуна серебряным припоем начала внедряться в промышленную практику. Усовершенствование поверхностной обработки чугуна раскрывает много конструктивных возможностей. Сложные формы деталей можно получить отливкой или путем соединения пайкой отлитых деталей со стандартными деталями, такими как трубы, катаные профили и пр. Литейную работу можно упростить, если выполнять сложные отливки из нескольких частей, что также сократит количество изготавливаемых для отливки стержней. Серый, ковкий и деформируемый в холодном состоянии чугун можно соединять с большинством промышленных металлов и сплавов. Наиболее широко с такими отливками применяются черные металлы на основе железа.

При пайке ковкого и деформируемого чугуна следует обязательно принимать меры предосторожности, одинаковые для любого из этих чугунов. Если ковкий или деформируемый чугун нагрет

\* Типичные составы чугуна приведены в Приложении.





Фиг. 57. Изменение структуры ковкого чугуна в зависимости от температуры и времени нагрева.

выше 760°, то его структура может быть повреждена, поэтому процесс пайки следует вести при температуре ниже указанной. На фиг. 57 показано изменение структуры ковкого чугуна в зависимости от температуры и времени нагрева. Подобные изменения имеют место и у деформируемого чугуна.

### Структурные превращения

При нагреве серого или деформируемого чугуна выше критической температуры (температуры превращения) структура чугуна превращается в аустенит. При охлаждении эта новая структура превращается или в мартенсит, если скорость охлаждения большая, или в тонкую перлитную структуру с сеткой цементита. В любом случае металлургическая структура в зоне теплового воздействия ухудшается. Критическая температура изменяется в зависимости от состава чугуна и постепенно повышается с увеличением в чугуне количества кремния.

### Смачивание

Наличие в чугуне графитизированного углерода затрудняет смачивание его припоем и может предотвратить образование хорошей металлической связи. Такое явление наблюдается у серых чугунов. Небольшие затруднения в связи с указанным явлением имеют место у ковких и деформируемых чугунов.

При затруднениях смачивания применяют различные методы очистки и обработки поверхности. Одним из методов очистки поверхности чугуна является электрохимическая обработка, в результате которой с поверхности удаляются графит, песок, кремний, окислы и пр. Процесс происходит в расплавленной соляной ванне с катализатором при температуре 455—510°. Постоянный ток проходит через соляную ванну, причем деталь служит одним электродом, а стальная ванна — другим.

Направление тока периодически изменяется, чтобы вызывать восстанавливающее, окисляющее и снова восстанавливающее действие. Обработка поверхности заканчивается промывкой водой. Другими методами очистки поверхности чугуна могут быть обжиг окислительным пламенем, пескоструйная обработка и химическая очистка.

### Очистка и подготовка поверхности

Для получения равномерного зазора между соединяемыми плоскостями при очистке поверхности желательно применять механическую обработку или обточку напильником. Поверхность отливки с включениями песка трудно поддается пайке без предварительной очистки.

Подлежащие пайке поверхности должны быть свободными от грязи, масла, смазки и пр. (см. гл. 7). Если необходимо, то образовавшийся графит удаляется с поверхности электрохимическим методом или одним из методов, упомянутых выше.

## Припой и флюсы

При условии надлежащей подготовки соединяемых поверхностей для пайки чугунов можно применять любые припои, которые подходят для пайки железа и стали. Однако предпочтение отдается серебряным припоям (ВAg) с низкой температурой плавления. К таким припоям, содержащим никель, относятся серебряные припои ВAg-3 и ВAg-4, которые имеют большее сродство с чугуном и поэтому при пайке дают соединения высокой прочности. В качестве припоев можно применять медь и медноцинковые сплавы, но при этом нужно проявлять максимальную осторожность при нагреве чугуна вследствие высоких температур плавления этих припоев. Припои, содержащие фосфор (ВCuP), нельзя применять для соединения чугунных деталей, так как фосфор образует с железом хрупкие соединения. Для пайки с рекомендованными серебряными припоями применяется паяльный флюс типа 3 Американского общества сварщиков.

## Способы пайки

Для пайки чугуна применимы любые способы, описанные в гл. 1. Выбор того или другого способа пайки определяется характеристиками соединяемого металла, припоем, конструкцией соединения и относительной массой соединяемых частей. Желательно применять те способы пайки, которые допускают автоматическое регулирование температуры нагрева, так как перегрев при пайке чугуна недопустим.

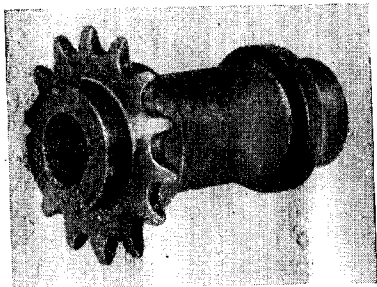
## Конструкция соединений

Основные положения, относящиеся к конструированию соединений, описаны в гл. 6.

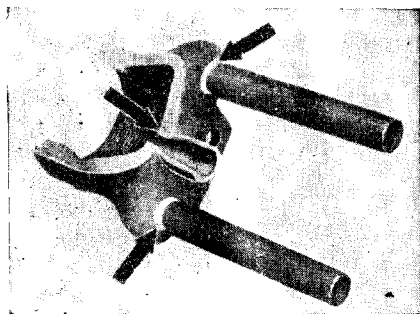
Зазор между соединяемыми деталями из чугуна следует определять исходя из назначения паяного изделия с учетом коэффициента теплового расширения металла, метода нагрева, типа припоя и других факторов. Для получения оптимальных результатов рекомендуются зазоры в пределах 0,05—0,125 мм с максимальным промежутком 0,254 мм. Изменение предела прочности на срез в зависимости от зазора между деталями в основном следует тем же закономерностям, которые показаны на фиг. 18 в гл. 6. Надлежащие допуски зазора легко выдерживаются в деталях небольших размеров, но обычно принятыми допусками приходится поступаться, так как соединяемые детали при нагреве увеличиваются в размере.

## Техника пайки

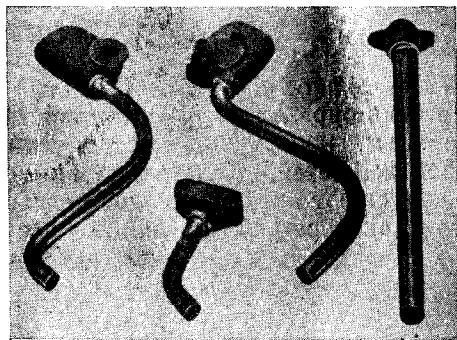
Техника пайки чугуна та же, что и для других металлов при соответствующей подготовке соединяемых плоскостей, как было указано выше (см. гл. 9). Нужно помнить, что ковкий, серый и деформируемый чугуны имеют достаточно большой коэффициент



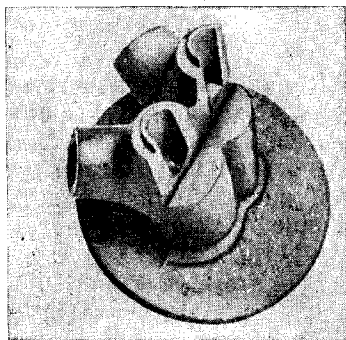
Фиг. 58. Стальная зубчатая звездочка, припаянная к чугунной втулке.



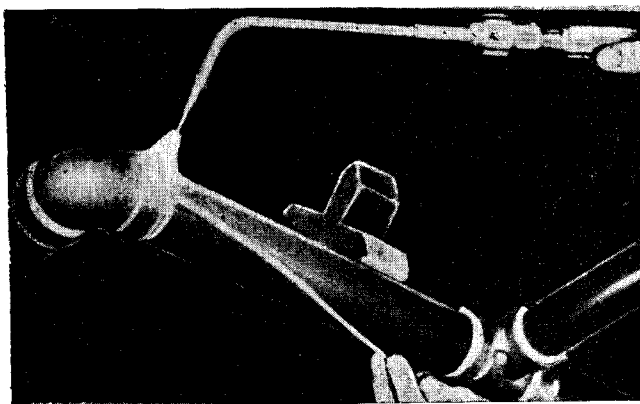
Фиг. 59. Стальные трубы, припаянные к коллектору из деформируемого чугуна.



Фиг. 60. Чугунные фитинги, припаянные к стальным трубкам.



Фиг. 61. Стальная труба, впаиваемая в чугунное основание.



Фиг. 62. Пайка горелкой колена из деформируемого чугуна к стальной трубе.

теплового расширения, а проводят тепло совсем плохо. Таким образом, процессы нагрева и охлаждения чугуна требуют особой тщательности выполнения.

### Операции после пайки

Операции, производящиеся после пайки, включая удаление остатков флюса, описаны в гл. 10. Для смывки остатков флюса, применяемого при пайке серебряными припоями, лучшие результаты дает обычно теплая вода. После промывки необходимо проверить чистоту паяного соединения.

### Типичные случаи применения пайки

На фиг. 58 показана стальная зубчатая звездочка, припаянная к чугунной втулке.

На фиг. 59 стрелками показаны места спая стальных труб с коллектором из деформируемого чугуна.

На фиг. 60 приведены различные узлы двигателя дизель, состоящие из чугунных фитингов, припаянных к стальным трубкам.

На фиг. 61 дан разрез стальной трубы, впаянной в чугунное основание.

На фиг. 62 показан процесс пайки колена из деформируемого чугуна в системе стальных труб. Пайка производится горелкой с применением серебряного припоя.

---

## ГЛАВА 19

### ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ

Термин *жаропрочные сплавы* очень широк и охватывает большую область металлов. Сюда относятся как низколегированные стали с содержанием 2% хрома, применяемые в котельных установках при рабочих температурах 540°, так и высококобальтовые сплавы, применяемые в самолетных газовых турбинах при рабочих температурах 815°. Мало- и среднелегированные стали применяются для изготовления деталей, работающих при температуре не выше 600°. Чистые хромистые стали пригодны для работы при 650°, а аустенитные сплавы и так называемые *суперсплавы* с содержанием кобальта применяются при температурах до 1090°.

### Конструкция соединений

У всех металлов по мере повышения рабочей температуры и времени выдержки при этой температуре способность выдерживать максимальную нагрузку уменьшается. Поэтому для любой конструкции весьма важным является выбор подходящего основ-

ного металла, который был бы жаропрочным и коррозионноустойчивым при высоких рабочих температурах.

Металлургия высокотемпературных сплавов так быстро развивается, что невозможно объединить все специальные данные по различным сплавам, предназначенным для работы при температуре выше 650°. Поэтому все данные и характеристики рекомендуется получать от заводов-поставщиков жаропрочных сплавов.

Конструкция паяных соединений для работы при повышенных температурах та же, что и при других процессах пайки; основная информация приведена в гл. 6. Очень важными факторами для получения удовлетворительных паяных соединений являются рабочая температура, нагрузка на соединение, состав атмосферы или коррозионной среды и срок службы изделия.

### Припой

Серебряные припои (ВAg). Серебряные припои применяются для пайки относительно малонагруженных соединений, работающих при температуре не выше 425°. Если необходимо увеличить прочность паяного соединения или обеспечить значительно больший срок его службы, максимальная рабочая температура должна быть снижена. А если максимальная рабочая температура не может быть снижена, то для данных условий работы надо подобрать более подходящий припой. Данные для выбора максимально допустимого напряжения при заданной температуре и продолжительности работы можно лучше всего получить путем проведения испытаний на разрушение от напряжений в условиях, наиболее приближающихся к эксплуатационным.

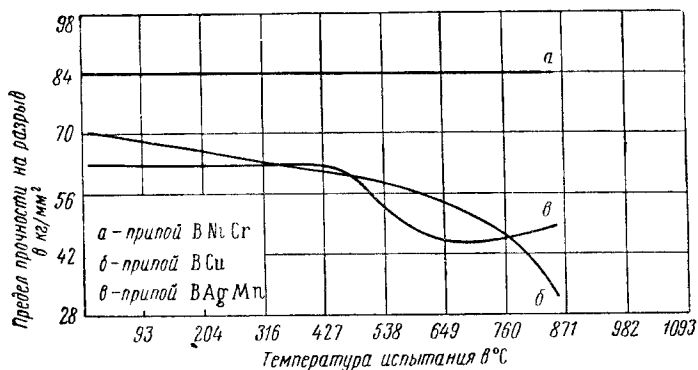
Особое внимание нужно уделять окислению припоя в соединении при нагреве, которое может иметь место как на наружной поверхности соединения, так и внутри шва.

Медь (ВCu). Чистая медь находит некоторое применение при пайке деталей, работающих при высокой температуре, но это применение ограничивается низкой стойкостью меди против окисления. Интервал рабочих температур для меди такой же, как и для серебряных припоев. Самые прочные соединения получаются при пайке бескислородной медью. Электролитическая медь в качестве припоя также дает удовлетворительные результаты. Меднофосфористые припои не рекомендуются для пайки нержавеющей сталей.

Ниже приведены значения предела прочности на разрыв при температуре 500° соединения из нержавеющей стали 403, спаянного в стык бескислородной медью и подвергнутого закалке и отпуску до твердости по Роквеллу *HRC* 30—34:

после	10 час. работы	— 16,3	кг/мм <sup>2</sup> ;
»	100 »	» — 10,6	» ;
»	1000 »	» — 5,7	» ;
»	10 000 »	» — 2,85	» .

Эти значения предела прочности относятся к случаю, когда при температуре пайки зазор между соединяемыми поверхностями был равен нулю; при увеличении зазора значения прочности соответственно будут уменьшаться. Например, при зазоре 0,075 мм значение предела прочности соединения после 100 час. работы составляет 6,4 кг/мм<sup>2</sup>. При повышении температуры испытаний паяных соединений их механические свойства также уменьшаются (фиг. 63). Приведенные данные относятся к каким-то одним условиям лабораторных испытаний какого-то одного металла и пока-



Фиг. 63. Зависимость предела прочности на разрыв паяного различными припоями соединения из нержавеющей стали 403 от температуры испытания. Образец для испытания стандартный; пайка в стык посередине образца длиной 25,4 мм.

Кривые а, в — нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин., кривая б — то же при 1120° — 15 мин. Все образцы после пайки подвергнуты старению при 760° в течение 16 час.

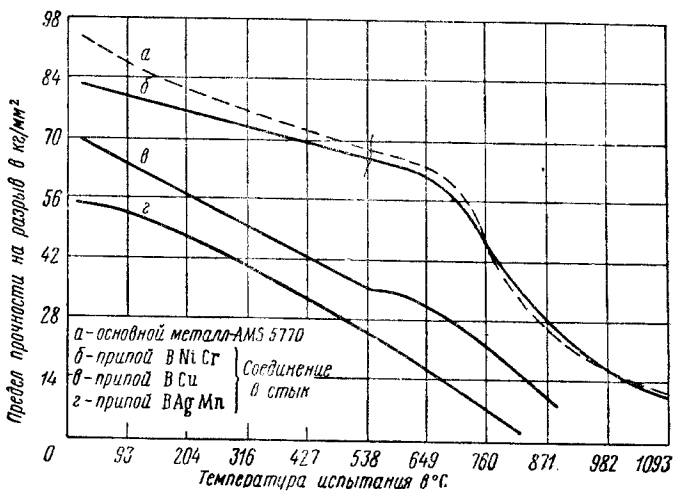
зывают только характер действия температуры и времени испытаний на соединения, паянные бескислородной медью.

На фиг. 64 показано изменение предела прочности на разрыв образцов из сплава AMS 5770 (S-590), спаянных в стык бескислородной медью в атмосфере высокоочищенного сухого водорода. Изменение предела прочности на срез показано на фиг. 65.

Серебряномарганцевый припой (В Ag Mn). Этот припой находит применение для пайки малонагруженных соединений, работающих при температурах до 650°. Однако при температурах выше 480° припой обладает слабой устойчивостью против окисления.

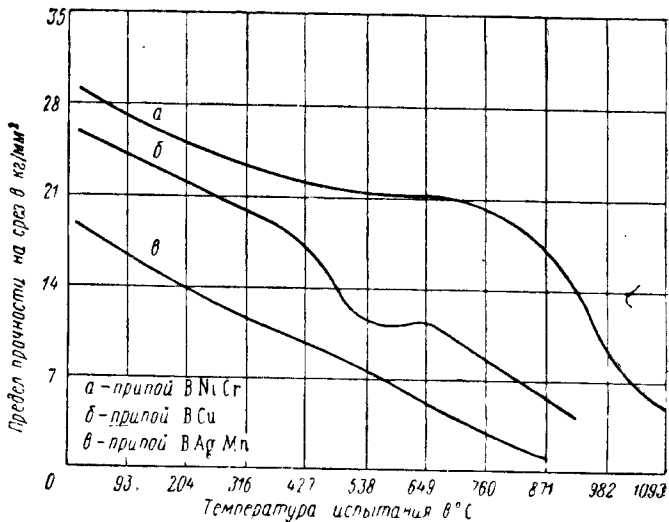
Как и во всех случаях работы соединений при высоких температурах, необходимо предварительно произвести испытания собранного узла для определения предела прочности и характеристик ползучести; а также оценку условий работы.

Пайку серебряномарганцевым припоем можно производить горелкой, в печи или индукционным методом с применением флюса. Пайку можно производить и без флюса в атмосфере диссоциированного аммиака или высокоочищенного сухого водорода, если темпе-



Фиг. 64. Зависимость предела прочности на разрыв образцов из сплава AMS 5770 от температуры испытания. Соединение в стык.

Кривые а, б, г—нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин.; кривая в—то же при 1120° — 15 мин. Все образцы после пайки подвергнуты старению при 760° в течение 16 час. HRC 20—28.



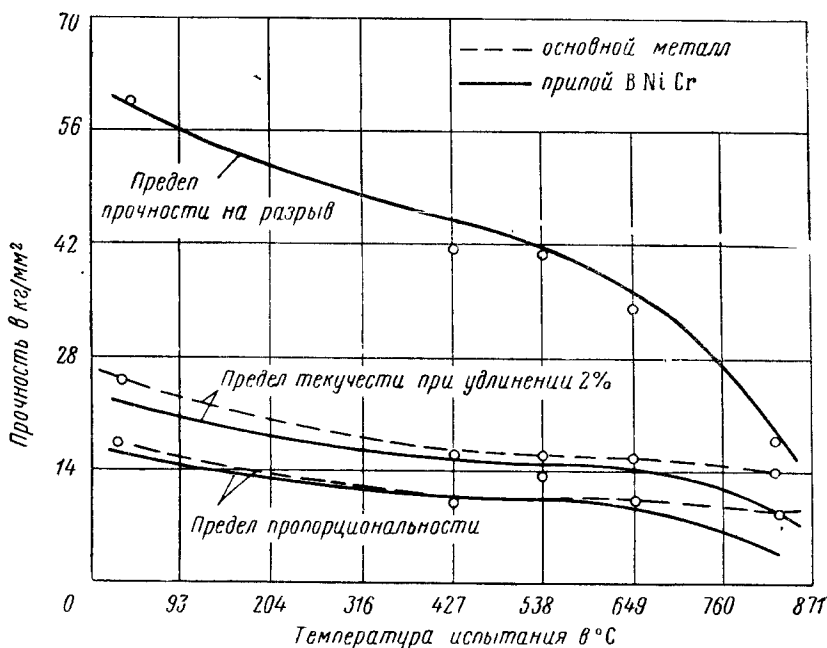
Фиг. 65. Зависимость предела прочности на срез образцов из сплава AMS 5770 от температуры испытания. Соединение двухсторонней нахлесткой.

Кривые а, в—нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин., кривая б—то же при 1120° — 15 мин. Все образцы после пайки подвергнуты старению при 760° в течение 16 час. HRC 26—28.



ратура пайки достаточно высока, а атмосфера достаточно суха. На фиг. 64 и 65 приведены данные по пределам прочности при кратковременных испытаниях паяных стыковых соединений на разрыв и срез.

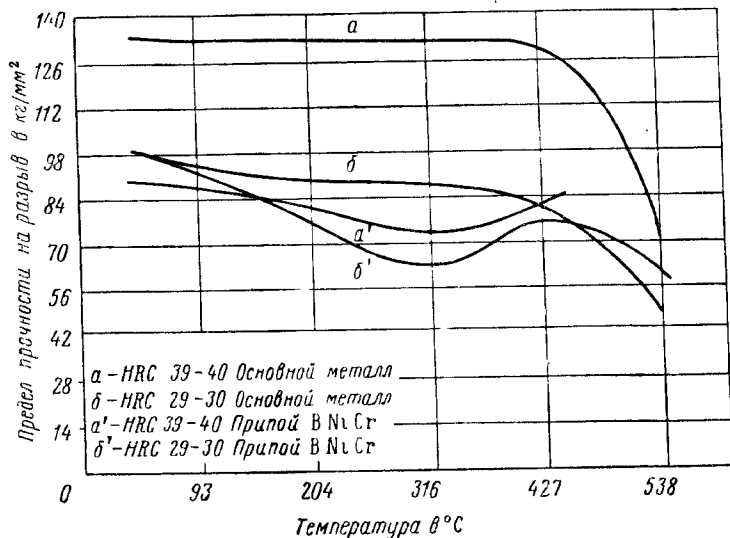
Хромоникелевые припои (B Ni Cr). Этот припой особенно хорош, так как он имеет удовлетворительные физические, механические и антикоррозионные свойства до температуры 1080°



Фиг. 66. Зависимость прочностных характеристик паяных различными припоями соединений из стали 347 от температуры испытания. Соединение в стык. Нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин. HRB 74—76.

включительно. Прежде чем определить максимальную рабочую температуру для специальных конструкций и особых условий работы необходимо иметь данные по напряжениям.

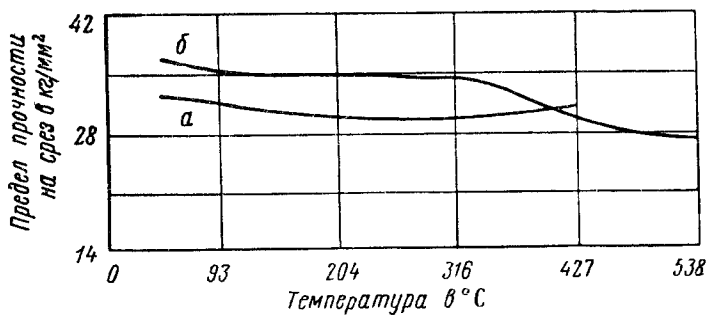
Этот класс припоев имеет высокие прочностные характеристики при нормальной и повышенной температурах, если применяется со следующими металлами: нержавеющая сталь 347 (AMS 5646) (фиг. 66), кобальтовая нержавеющая сталь S-590 (AMS 5770) (фиг. 65), а также нержавеющая сталь 431 (AMS 5628) (фиг. 67). Следует отметить, что первые две стали являются сталями аустенитного класса и прочность их соединений, паянных хромоникелевым припоем, равна или почти равна прочности основного металла. Последняя из указанных сталей (431) — мартенситного класса и допускает закалку в широком диапазоне температур. На фиг. 67 приведены прочностные характеристики образцов нержавеющей



Фиг. 67. Зависимость предела прочности на разрыв образцов из нержавеющей стали 431 с разной твердостью от температуры испытания. Соединение в стык. Кривые а, б—характеристики основного металла, кривые а', б'—характеристики паяных соединений из того же основного металла.

Термообработка:

HRC 39-40. Нагрев при 1180° — 30 мин.  
 > > 593° — 2 часа.  
 > > 1038° — 30 мин.  
 > > 316° — 2 часа.  
 HRC 29-30. Нагрев при 1180° — 30 мин.  
 > > 593° — 2 часа.

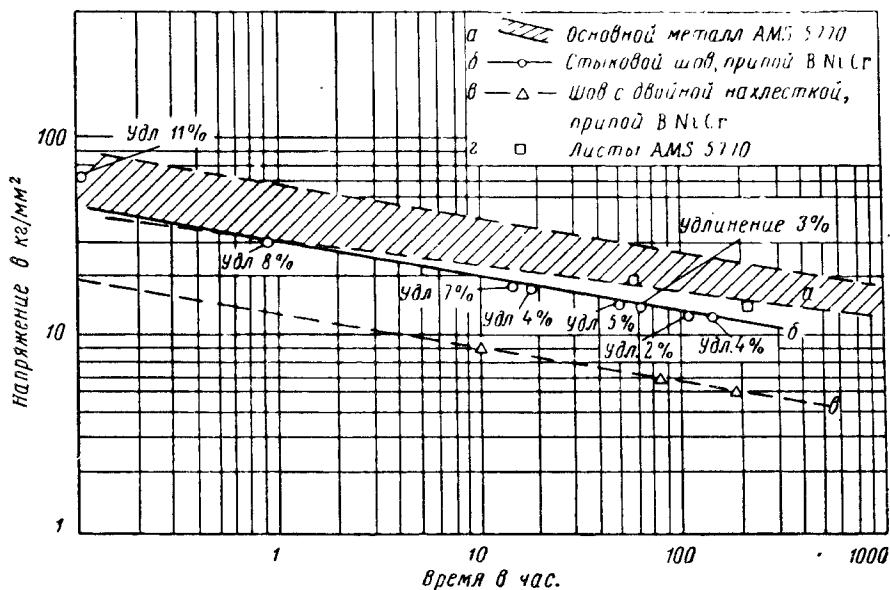


Фиг. 68. Зависимость предела прочности на срез паяных различными припоями соединений из стали 431 от температуры испытания. Соединение двусторонней нахлесткой.

Кривая а—нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин., отпуск при 316° — 2 часа. HRC 39-40. Кривая б—нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин., отпуск при 593° — 2 часа. HRC 30-31.

стали 431 разной твердости, подвергнутых ступенчатой закалке, и прочность стыковых паяных соединений из этой стали.

На фиг. 65 и 68 приведены значения предела прочности на срез соединений из сталей S-590 (AMS 5770) и 431, паянных различными припоями, причем на фиг. 68 эти данные относятся к образцам разной твердости.



Фиг. 69. Прочностные характеристики при температуре 807° соединений из стали AMS 5770, паянных припоем ВNiCr.

Кривая а — нагрев в процессе пайки при 1230° — 1 час, закалка в воду. Старение после пайки при 760° в течение 16 час.; кривые б, в, г — нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин.; охлаждение на воздухе. Старение после пайки при 760° в течение 16 час. HRC 26—28. Кривая б — соединение в стык, кривая в — соединение внахлестку.

На фиг. 69 приведены прочностные характеристики соединений, паянных припоем ВNiCr в стык (кривая б) и внахлестку (кривая в). Следует иметь в виду, что каждый металл образует паяные соединения со свойственными ему прочностными характеристиками, значение которых нельзя переносить на другие металлы или на другие условия термообработки.

Другие припои. Перечисленные выше припои имеют наиболее широкое применение. Однако имеются и разрабатываются припои для специальных целей, удовлетворяющие новым, особым требованиям.

### Процесс пайки

Очистка и подготовка поверхности для пайки. Обычно хром присутствует почти во всех жаропрочных сплавах и сталях. Поэтому для удаления тугоплавкой окиси хрома с по-

верхности соединяемых деталей перед пайкой необходимо принимать специальные меры. Обычно окисную пленку удаляют химической очисткой, шлифованием или пескоструйной обработкой. Другие методы механической очистки паяемых поверхностей, такие как очистка стальной щеткой, шабровка и пр., не рекомендуются. Пескоструйную обработку следует производить осторожно. Для механического удаления окисной пленки потоком воздуха применяются глинозем, кремнезем (песок), карбиды, окись циркония и другие неметаллические материалы, которые могут врезаться и прилипнуть к очищаемому материалу, образуя неметаллические включения, снижающие прочность паяных соединений. Некоторые очищающие материалы, например окись циркония, совершенно предотвращают смачивание и растекание припоя.

Для очистки литых деталей, изготовленных как прецизионным методом, так и отливкой в песчаные формы, применяется специальный процесс. Перед пайкой с поверхности детали следует удалить все тугоплавкие материалы, применяемые в процессе отливки. Загрязненные поверхности рекомендуется очищать механическим и химическим способом. Литые детали и спеченные твердые сплавы нередко имеют загрязненные поверхности, что препятствует затеканию припоя в соединения. Такое загрязнение поверхностей наиболее ощутимо, когда пайка производится в печи с контролируемой атмосферой и без флюса.

Методы очистки, изложены в гл. 7. Дополнительные сведения имеются также в гл. 20, где даны рецепты и рекомендации по травлению никелевых сплавов.

**Флюсы и атмосферы.** Флюсы в основном применяются при пайке горелкой, индукционным методом и методом сопротивления, когда в качестве припоя используются серебряные сплавы. Если в качестве атмосферы при пайке в печи используется сгоревший газ, то в случае пайки металлов с содержанием более чем 0,5% хрома, необходимо применять флюс для облегчения растекания припоя. Это относится практически ко всем жаропрочным сплавам, так как хром является одним из основных легирующих элементов, применяемым для придания сплавам жаропрочности.

Жаропрочные сплавы можно паять в печи и без флюса, если в качестве атмосферы применяется высокоочищенный сухой водород или диссоциированный аммиак. При надлежащем контроле влажности точки росы и достаточно высокой температуре эти атмосферы уменьшают образование окислов хрома в процессе пайки. В случае применения хромоникелевого припоя (BNiCr) требуется исключительно чистая и сухая атмосфера водорода, так как наличие в атмосфере даже небольшого количества азота приводит к образованию нитридов с последующим прекращением плавления и растекания припоя. Основные сведения по атмосферам приведены в гл. 4.

Наличие в основном металле легирующих элементов накладывает определенные ограничения на применение атмосфер диссоциированного аммиака и очищенного сухого водорода. Например,

алюминий, титан, цирконий и другие подобные элементы с высоким электрохимическим потенциалом образуют окислы, которые не удаляются даже в очень сухой атмосфере. Наличие в сплаве этих элементов в количестве менее 0,5% не вызывает затруднений при пайке. При пайке нержавеющей стали 321 медным припоем (BCu) содержащийся в ней титан реагирует с медью, образуя сплав, который быстро окисляется и не течет или не смачивает нержавеющую сталь. Припой BNiCr не реагирует с титаном, находящимся в нержавеющей стали 321, но он не течет и смачивает поверхность сплавов с содержанием 2—3% титана.

Преодоление этих трудностей осуществляется двумя путями. Самым лучшим методом считается нанесение на поверхность деталей предохранительного покрытия из никеля. Это позволяет производить пайку нержавеющей сталей в печи с контролируемой атмосферой без флюса и обеспечивает высокое качество пайки. Вторым методом является применение небольшого количества флюса в сочетании с восстановительной атмосферой, чтобы облегчить смачивание и растекание припоя.

### Операции после пайки

**Очистка.** Иногда с поверхности спаянных жаропрочных сплавов флюс не удается полностью удалить горячей водой. В таких случаях следует применять механические и химические методы очистки (см. гл. 10). К таким методам относятся обдувка сжатым воздухом с абразивным порошком, обработка в расплавленной соляной ванне или других ваннах. В любом случае после химической очистки нужно производить промывку горячей водой.

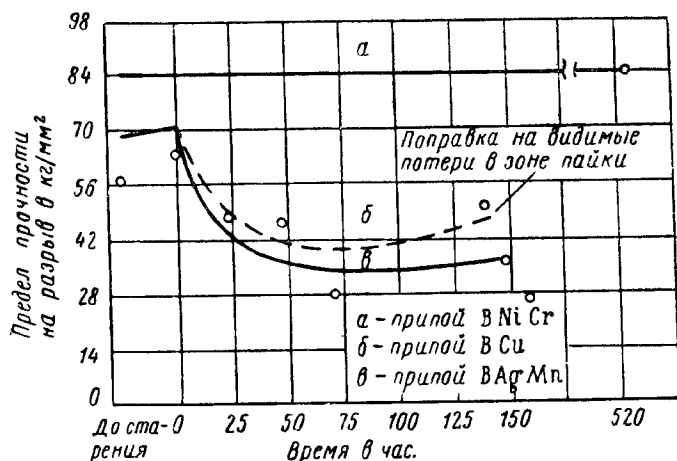
Особенно важно удалить остатки флюса с деталей, работающих в диапазоне температур плавления флюса, чтобы устранить поражение основного металла фтористыми соединениями.

Если пайка производилась в контролируемой атмосфере без флюса, то последующая очистка не требуется.

**Термообработка.** Для обеспечения требуемых механических свойств основного металла часто бывает необходимо после пайки подвергнуть собранный узел соответствующей термообработке. Низколегированные стали можно подвергать закалке и отпуску, в то время как некоторые высоколегированные сплавы приобретают нужные свойства в результате искусственного старения. Особое внимание в этих случаях нужно уделять выбору припоя, чтобы во время термообработки он не расплавлялся или сильно не окислялся и был бы способен выдерживать режим закалки. Дополнительные сведения см. в гл. 10.

В зависимости от типа применяемого оборудования и скорости охлаждения в нержавеющей стали, такой как нестабильная сталь 18-8, могут выделяться карбиды. Для предотвращения этого паяное изделие надо быстро охлаждать или подвергнуть закалке с температуры пайки. Обычно такие операции не практикуются, поэтому

необходимо производить вторичный нагрев паяного изделия под термообработку, чтобы снова перевести в раствор выделившиеся карбиды (см. гл. 2, а также гл. 16).



Фиг. 70. Зависимость предела прочности на разрыв паянных различными припоями соединений из сплава АМS 5770 от времени выдержки при 815°. Испытание при нормальной температуре. Образец для испытания стандартный. Пайка в стык по середине образца длиной 25,4 мм.

Кривые а, в — нагрев в процессе пайки при 1180° — 30 мин., кривая б — то же при 1120° — 15 мин. Все образцы после пайки подвергнуты старению при 760° в течение 16 час.

На фиг. 70 показано влияние термообработки при температуре 815° на предел прочности на разрыв паяных соединений из нержавеющей стали АМS 5770. Испытания производились при нормальной температуре.

### Типичные случаи применения пайки

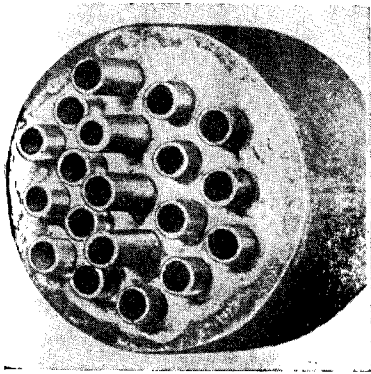
На фиг. 71 показана собранная полая лопатка газовой турбины, в которой детали из нержавеющей стали спаяны припоем ВNiCr.

На фиг. 72 приведен измерительный ртутный элемент толщиной 0,81 мм из стали 347, на котором выполнены пять паяных соединений (показаны стрелками) за одну операцию припоем ВNiCr.

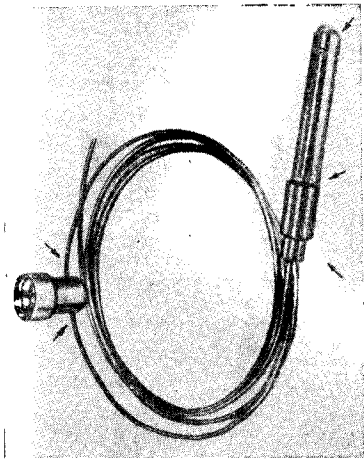
На фиг. 73 показан теплообменник из нержавеющей стали 347, изготовленный пайкой из листов и труб.

На фиг. 74 приведен пластинчатый и ребристый теплообъемник, изготовленный пайкой из сплава инконель (Inconel).

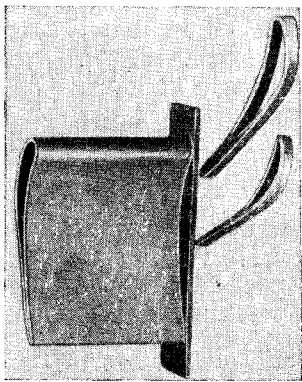
На фиг. 75 представлена часть соплового аппарата авиационного двигателя из нержавеющей стали 330 с лопатками из стали HS21, изготовленного при помощи пайки.



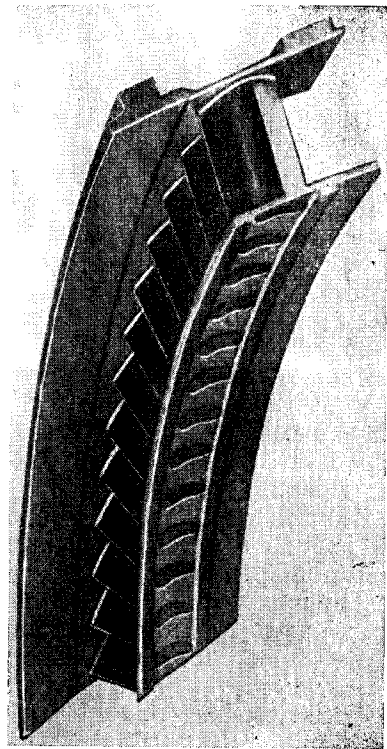
Фиг. 73. Теплообменник, спаянный из нержавеющей стали 347.



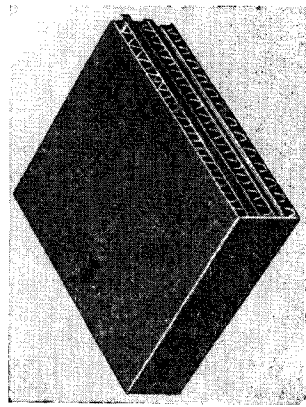
Фиг. 72. Измерительный ртутный элемент, выполненный пайкой.



Фиг. 71. Полая лаяная лопатка турбины из нержавеющей стали.



Фиг. 75. Часть собранного при помощи пайки соплового аппарата авиационного двигателя.



Фиг. 74. Пластинчатый и ребристый теплообменник, спаянный из сплава никонель.

## НИКЕЛЬ И СПЛАВЫ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ

Никель и сплавы с высоким содержанием никеля легко поддаются соединению при помощи обычных способов пайки. Однако в процессах пайки требуется вводить некоторые изменения вследствие различия химических, механических и физических свойств подвергаемых пайке сплавов.

### ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Никель и сплавы с высоким содержанием никеля находят применение главным образом в тех случаях, когда особое значение имеет устойчивость деталей против коррозии во влажных средах и ряде атмосфер при повышенных температурах. При выборе процесса пайки важно знать влияние условий эксплуатации на паяные соединения.

В отношении коррозии никелевых сплавов в водных растворах или работы в условиях повышенных температур имеется очень мало общих положений, которые могут быть действительны для всех других условий. Поэтому для конкретных условий работы подходящие сплавы следует определять путем проведения испытаний в условиях, близких к эксплуатационным.

Некоторые ограничения на эксплуатацию паяных деталей при высоких температурах указаны в следующих параграфах, где речь идет о специальных припоях.

### ПАЙКА НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Предварительная обработка соединяемых поверхностей. Общие требования по предварительной очистке и подготовке поверхностей, описанные в гл. 7, относятся и к никелевым сплавам. Однако для никелевых сплавов очистка стальной щеткой неприменима, так как образующаяся на этих сплавах окисная пленка крепкая и этим методом не удаляется. Рекомендуемые для этих сплавов процессы травления указаны в табл. 11. Очистку деталей следует производить непосредственно перед пайкой и ни в коем случае не допускать хранения очищенных деталей более 24 час. перед пайкой.

Сернистая хрупкость. Никель и сплавы с высоким содержанием никеля подвержены охрупчиванию под воздействием серы при повышенных температурах (см. гл. 2). Все материалы, которые могут содержать серу, такие как нефть, масла, краска, карандашные пометки, смазки и др., необходимо удалять с деталей перед нагревом под пайку.

Применяемые для нагрева атмосферы также не должны содержать серы. Если применяется городской газ, то содержание в нем



серы должно быть менее 0,45 мг на литр газа. Если применяется нефть, то содержание в ней серы должно быть менее 0,5% (нефтяное топливо № 1).

**Легкоплавкие металлы.** Свинец, висмут, сурьма и несколько других легкоплавких металлов действуют на сплавы с высоким содержанием никеля при высоких температурах так же, как и сера. Поэтому важно, чтобы эти металлы или детали из них, например резьбовые соединения, были полностью удалены с подлежащего пайке изделия до начала процесса пайки.

### **Коррозионное растрескивание под напряжением**

Сплавы с высоким содержанием никеля подобно другим металлам, имеющим высокую температуру отжига, подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением в присутствии расплавленного припоя. Поэтому пайке следует подвергать только отожженные материалы и собранные узлы не должны испытывать напряжений во время пайки (см. гл. 2 и следующий параграф настоящей главы).

### **Сплавы, подвергаемые упрочнению в процессе старения**

Подвергаемые старению сплавы с высоким содержанием никеля (дураникель, К монель, инконель X и инконель W) очень чувствительны к коррозионному растрескиванию под напряжением. Эти сплавы следует паять только в отожженном состоянии или обработанными на твердый раствор. Пайку следует производить припоем с относительно высокой температурой плавления предпочтительно выше 870°, который мог бы обеспечивать достаточно прочное соединение при температуре старения 590° для сплавов дураникель и К монель и 700° для сплавов инконель X и инконель W.

### **ПРИПОИ**

Никель и все сплавы с высоким содержанием никеля плавятся при температуре выше 1260°; поэтому любые из припоев, обычно применяемые для пайки черных металлов, можно применять и для пайки этих сплавов. Припои с содержанием фосфора, например фосфористую медь ВCuP, не следует применять для пайки никелевых сплавов, так как при взаимодействии припоя и основного металла образуются хрупкие фосфиды (см. гл. 2). Припои на основе алюминия и магния также не применимы, так как в этом случае (в шве) образуется хрупкий сплав.

### **Серебряные припои (BAg)**

При помощи серебряных припоев можно соединять пайкой никель и сплавы с высоким содержанием никеля между собой, а также со многими другими металлами и сплавами, за исключением

Таблица 11  
Составы, рекомендуемые для травления никеля и его сплавов\*  
Приведенные составы применяются для следующих типов окислов

Основной металл	Легкое потускнение	Слабые окислы				Сильное окисление
		3	4	5	6	
Никель	3	4	5*** и 3**			
Дураникель	3	4	5*** и 3**			
Монель	1 и 2**	4	5			
К монель	1 и 2**	4	5			
Инконель	—	—	7			
Инконель X	—	—	7 или 7A			

Состав	Номера составов						
	1	2	3	4	5	6	7
Вода в л	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	13,5
Азотная кислота (38° Вé) в л	4,5	4,5	10,0	—	—	—	4,5
Серная кислота (66° Вé) *	—	—	6,8	0,5	—	0,5	—
Серная кислота (20° Вé) *	—	—	—	—	2,3	—	—
Плавиковая кислота (40%) *	—	—	—	—	—	—	0,7
Натрий хлористый в г	225—340	—	115****	450	—	—	—
Натрий азотнокислый в г (неочищенный)	—	—	—	225	—	—	—
Натрий двухромовокислый в г	—	—	—	—	115	—	—
Медь хлористая в г	20—40	20—40	20—40	80—90	20—40	20—40	40—60
Температура в °С	Не более 5 сек.	Не более 5 сек.	5—20 сек.	30—90 сек.	20—40 мин.	5—10 мин.	15—90 мин.
Время выдержи	Глина, стекло, керамика	Нержавеющая сталь типа 18-8, стекло, керамика	Глина, стекло, керамика	Глина, стекло, керамика	Глина, стекло, керамика, кирпич	Глина, стекло, керамика, резина	Графит, кирпич

\* Перед травлением все детали следует обезжирить, а после травления промыть для нейтрализации в 1—2%-ном (по объему) растворе аммиака.  
\*\* Между операциями промывать в горячей воде (97° С).  
\*\*\* Требуется выдержка от 1 до 2 час.  
\*\*\*\* Дать остыть перед добавлением соли.

**ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ.** Испарения от этих травителей вызывают сильное раздражение дыхательных путей; необходима хорошая вентиляция (см. гл. 23).

алюминия, магния и их сплавов. При правильном применении **этих** припоев паяное соединение будет иметь прочность, равную прочности отожженного основного металла.

**Выбор припоев.** Обычно применяют припой ВAg-1 и ВAg-2, имеющие более низкую температуру плавления. Однако в условиях коррозионных сред необходимо применять припой с содержанием по крайней мере 50% серебра. Припой ВAg-7 полезен в том случае, когда может иметь место коррозионное растрескивание под напряжением. Припой ВAg-9 имеет хороший цвет, подходящий к таким белым материалам, как никель, монель и инконель. Однако в условиях эксплуатации этот припой окисляется несколько по-другому, чем основной металл, и при окислении заметно отличается по цвету от основного металла.

**Процесс пайки.** В основном применяются процессы пайки, описанные в гл. 1—11. В случае применения флюса зазор между соединяемыми деталями должен быть в пределах 0,05—0,125 мм. При пайке в контролируемой атмосфере зазор должен быть не более 0,0125 мм. При больших зазорах прочность соединения более низкая. Флюс AWS тип 3 подходит для пайки большинства никелевых сплавов, не содержащих алюминия. Флюс AWS тип 4 можно применять для пайки сплавов с содержанием алюминия, таких как К монель, дураникель и инконель X (см. гл. 4).

*Применение боратов в качестве флюса при пайке сплавов с высоким содержанием никеля серебряными припоями не рекомендуется.* Бораты не плавятся при достаточно низких температурах и имеют другие нежелательные характеристики.

Пайку никелевых сплавов можно производить любым способом. При пайке горелкой предпочтительно большое мягкое восстановительное пламя. Можно применять также и пайку погружением в соляную ванну, но для никеля и его сплавов этот способ пайки применяется редко. Пайка погружением в расплавленный припой находит ограниченное применение и используется только для пайки тонкой проволоки и небольших деталей.

Если во время пайки детали окислились, то для очистки можно применить травление кислотой. Иногда для очистки деталей после пайки полезно применять анодную обработку в 25%-ном растворе серной кислоты.

### **Медный припой (BCu)**

Сплавы с высоким содержанием никеля можно паять медным припоем (BCu) на том же оборудовании, что и стали, лишь с незначительными изменениями процесса пайки, вызванными различием характеристик этих сплавов.

Медь как припой значительно быстрее сплавляется с никелевыми сплавами, чем со сталью. Поэтому медь растекается недостаточно, так как растворяет никель, что повышает температуру ее ликвидуса и уменьшает ее текучесть. Припой следует помещать как можно ближе к соединению и в количестве, обеспечивающем заполнение шва. Если положено слишком много меди и избыток ее растекается

по тонким деталям, это может привести к разъеданию поверхности металла подобно эрозии почвы, производимой водой.

Наличие в никелевых сплавах таких элементов, как хром, алюминий и титан, приводит к образованию тугоплавких окислов, которые не восстанавливаются в обычной печной атмосфере. Поэтому сплавы К монель, инконель и инконель X паять труднее, чем монель и никель. В таких случаях нужно проводить специальные мероприятия для предотвращения образования окислов указанных элементов или применять флюс для удаления всех окислов в процессе нагрева под пайку. Для преодоления указанных затруднений имеются три метода.

1. Детали покрывают медью, чтобы предотвратить образование вредных окислов. Процедура покрытия является специальной. Наличие окислов на поверхности детали под слоем меди не допускается. Детали перед покрытием очищают путем погружения в никельхлоридную ванну и пропускания через нее обратного тока. Эту операцию производят непосредственно перед меднением, которое выполняется обычным путем. Толщина слоя покрытия должна быть около 0,0075 мм. Медь предотвращает образование окислов на паяемой поверхности и одновременно является составной частью припоя.

2. Для растворения окислов можно применять флюсы. Для этой цели можно применять флюсы, которые используются для сварки никелевых сплавов. Вследствие повышенных температур любой флюс при охлаждении после пайки приобретает стекловидные свойства и относительно нерастворим в любой жидкой среде. При закалке с промежуточной температуры большое количество флюса удаляется вследствие различных температурных расширений основного металла и флюса (см. гл. 10). Лучшими способами удаления флюса считается пескоструйная обработка и обтачивание.

3. Очень сухая печная атмосфера диссоциированного аммиака или водорода (точка росы  $-40^{\circ}$  или ниже) предотвращает образование окислов хрома и восстанавливает то небольшое их количество, которое осталось после чистки.

**Печные атмосферы.** Пайка медным припоем (BCu) обычно ограничивается только печью, так как необходима соответствующая атмосфера. Нагрев печи электрическим током, газом или нефтью продолжается до тех пор, пока атмосфера в печи не установится в необходимых пределах. Для пайки никеля или сплава монель применяются стандартные восстановительные атмосферы сгоревшего городского газа (атмосфера AWS тип 1 или 2), диссоциированного аммиака (атмосфера AWS тип 5) или водородная атмосфера (атмосфера AWS тип 6). Сухой водород (атмосфера AWS тип 7) или сухой диссоциированный аммиак применяется для восстановления окислов хрома при температурах, необходимых для пайки медью сплава инконель. Пайка сплавов инконель X и инконель W затруднительна даже в атмосфере сухого водорода вследствие образования окислов алюминия и титана. Для пайки этих сплавов вместе с восстановительной атмосферой применяются флюсы.

Специальная обработка поверхностей. Немного шероховатые или слегка протравленные поверхности создают лучшие условия для капиллярного течения расплавленной меди. Такие поверхности смачиваются припоем лучше, чем полированные поверхности.

**Техника пайки.** Конструирование соединений из никелевых сплавов для пайки медью во многих отношениях подобно конструированию соединений из стали. Максимальный зазор между соединяемыми деталями должен быть в пределах от легкой прессовой посадки до 0,05 мм. Прочность шва изменяется обратно пропорционально зазору, как указано в гл. 6. Если установить надлежащий зазор между соединяемыми деталями, то прочность паянного в стык соединения будет равна прочности отожженного основного металла.

Большинство деталей из никелевых сплавов, паяемых медью (ВСи) в печи, не требует очистки после пайки, так как они обычно выходят из печи совершенно светлыми. Избыток меди (если необходимо) можно удалить путем погружения в холодную ванну, состоящую из 20 частей нашатырного спирта и 1 части перекиси водорода, или в раствор, состоящий из 68 л воды, 4,55 л серной кислоты и 36,3 кг хромовой кислоты, тщательно перемешанный и применяемый при нормальной температуре. Время погружения зависит от толщины меди, подлежащей удалению.

### Жаропрочный припой

Хромоникелевый припой (ВNiCr) применяется для пайки соединений, стойких против коррозии и воздействия тепла. Превосходная коррозионная стойкость этого припоя может быть сравнима со стойкостью сплава инконель, а его прочность при повышенных температурах намного превосходит прочность таких припоев, как серебряно-марганцевый (ВAgMn) или чистая медь. Припой ВNiCr содержит бор, который при температуре пайки диффундирует в основной металл, а основной металл в свою очередь диффундирует в припой. Эта взаимная диффузия повышает температуру солидуса припоя, в результате чего паяные швы не плавятся при высоких температурах, что допускает эксплуатацию их в условиях выше первоначальной температуры солидуса припоя ВNiCr.

Хромоникелевым припоем (ВNiCr) можно паять никель, монель, инконель и другие разновидности этих сплавов, подвергающиеся искусственному старению.

**Печная атмосфера.** Атмосферой в печи, рекомендуемой для пайки припоем ВNiCr, должен быть сухой водород с точкой росы ниже  $-45^{\circ}$ , предпочтительно с точкой росы около  $-70^{\circ}$ . Сухой водород при  $1150^{\circ}$  восстанавливает окислы большинства металлов, за исключением алюминия и титана. При пайке сплавов с содержанием сравнительно большого количества алюминия или титана, таких как инконель X, следует применять флюс для удаления этих окислов. Эффективным способом предотвращения образования

окислов является покрытие паяемых поверхностей слоем никеля толщиной по крайней мере 0,0125 мм.

**Процесс пайки.** Вследствие жестких требований, предъявляемых к печным атмосферам, процесс пайки обычно ведется в печах колоколообразного типа. Для нагрева можно применять обычные печи, если будет построена специальная реторта, в которую помещают изделие и в которой создается атмосфера водорода с низкой точкой росы. В этом случае необходимо, чтобы рабочее пространство печи было заполнено атмосферой сгоревшего городского газа или диссоциированного аммиака, которая окружает реторту и защищает нагреватели. Но эта атмосфера не должна соприкасаться с подлежащими пайке соединениями.

Конструктивное устройство реторты требует особого внимания. В реторте должно поддерживаться небольшое избыточное давление, чтобы предотвратить смешивание воздуха или печной атмосферы с сухим водородом, находящимся в реторте. В качестве заделки вместо кремнезема (песка) успешно применяется глинозем. Кремнезем способен восстанавливаться сухим водородом, в результате чего атмосфера увлажняется. Применение механических затворов также дает удовлетворительные результаты.

*Прежде чем помещать реторту в печь, из нее нужно тщательно и полностью удалить весь воздух во избежание взрыва.*

**Техника пайки.** К конструированию паяных соединений для пайки припоем ВNiСг предъявляются те же требования, что и к соединениям, паяемым серебряными припоями (ВAg). Зазор между соединяемыми поверхностями следует поддерживать в пределах 0,05—0,125 мм. Припой нужно подавать в достаточном количестве, чтобы он мог полностью заполнить зазор и образовать галтель; избытка припоя следует избегать, так как под действием силы тяжести он может разлиться по поверхности деталей, что вызовет разъедание основного металла. Температура пайки должна быть в пределах 1040—1180°.

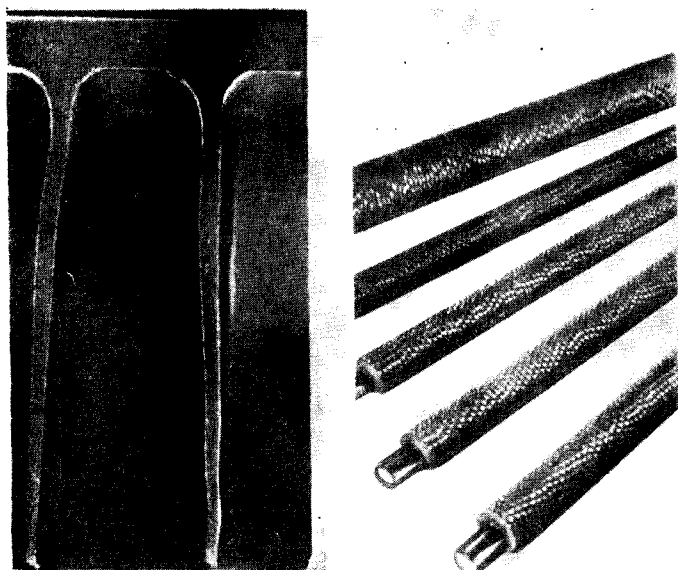
Припой ВNiСг обычно применяется в виде порошка. В таком виде этот припой можно засыпать непосредственно в отверстия или углубления, имеющиеся около соединений, или же его можно применять в смеси со связующим веществом; в последнем случае припой наносит кистью, разбрызгиванием или выдавливанием. Специальное связующее вещество во время нагрева должно совершенно исчезать, не оставляя остатка, вредного для пайки. Припой ВNiСг можно применять также в виде проволоки или ленты, полученных металлокерамическим способом с пластической связкой.

В большинстве случаев после пайки в печи детали не требуют последующей обработки. Однако в случае применения флюса его остатки необходимо с деталей удалить. Это лучше всего выполнить механическим путем: опилкой, отбивкой молотком или пескоструйной обработкой (см. гл. 10).

При контроле к материалу, работающему в условиях высоких температур, предъявляются более жесткие требования, так как качество паяных швов должно быть высоким.

## Типичные случаи применения пайки

На фиг. 76 приведены образцы ребристых труб из инконеля, применяемых для теплообменников. Ребра выполнены из ленты инконеля, обернутой по спирали вокруг трубы и припаянной к трубе в печи припоем ВNiCr. Такие трубы удовлетворительно работают при  $650^\circ$  более 5000 час. Слева показан разрез паяного соединения, образуемого стенками трубы и кромками ребер.



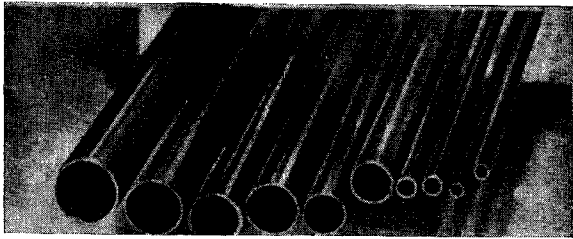
Фиг. 76. Паяные ребристые трубы из инконеля для теплообменников.

Справа—общий вид; слева—разъем по стенкам трубы и ребрам.

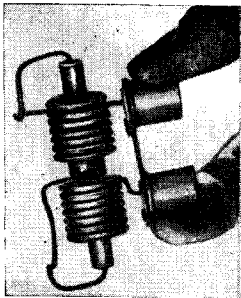
На фиг. 77 показаны выполненные из ленты монеля, спаянной внахлестку, трубы различного размера, спаянные в печи. Ленту покрывали медью, свертывали спиралью и затем пропускали через печь с водородной атмосферой. На верхнем снимке показана микроструктура сечения трубы по месту спая.

На фиг. 78 показан выполненный из инконеля сильфон манометра. Узел имеет 30 соединений, паянных серебряным припоем, и должен выдерживать при испытании давление до 530 ат.

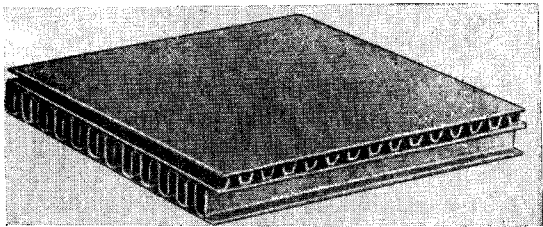
На фиг. 79 показана секция воздухо-воздушного радиатора из листового инконеля толщиной 0,38 мм, спаянная хромоникелевым припоем (ВNiCr).



Фиг. 77. Трубы из ленты монеля, паянные в печи.  
Сверху—сечение трубы по месту спая внахлестку, снизу—  
спаянные в печи трубы.



Фиг. 78. Сильфон манометра из инконеля с 30 паяными соединениями.



Фиг. 79. Секция выполненного из инконеля паяного воздухо-воздушного радиатора.



## ПАЙКА КОНТАКТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Драгоценные металлы находят применение в различных областях промышленности, но наиболее широко применяются для изготовления электрических контактных деталей.

Ежегодно для всех типов электрической аппаратуры требуются миллионы контактных деталей, используемых для включения электрических контуров в цепь и отключения их. Обычно это небольшие детали, которые присоединяются к оборудованию различными способами; общепринятым считается присоединение контактов пайкой.

Разнообразные условия, при которых работают электрические контакты, требуют, чтобы материалы, из которых выполнены эти детали, имели широкий диапазон физических характеристик. Для удовлетворения этих требований создано большое количество различных сплавов драгоценных металлов. Серебро, золото и платина применяются для изготовления контактных деталей отдельно или в комбинации с различными сплавами. Серебряные сплавы, в частности, получают или непосредственным сплавлением серебра с другими металлами или, в случае применения тугоплавких элементов, путем порошковой металлургии.

В качестве легирующих добавок к серебру наиболее часто используют медь, цинк, кадмий, никель, молибден, вольфрам и железо, а также различные неметаллические материалы, такие как углерод и тугоплавкие окислы. Эти неметаллические материалы предотвращают прилипание и расплавление контактов при эксплуатации, но ухудшают растекание припоя на паяемых контактах, что может усложнить процесс пайки. Серебро также подвергается водородному охрупчиванию (см. гл. 2).

Для пайки контактов можно применять любые стандартные серебряные припои (ВAg). Эти припои обычно предварительно размещают в виде тонкой полоски, вырезанной в форме, соответствующей форме контакта. Удобно также наносить на соединяемые поверхности пасту, сделанную из порошкообразного припоя или опилок, смешанных с флюсом. Такие материалы для изготовления контактов, как чистое серебро или сплавы серебра с медью, также покрывают тонким слоем припоя с одной стороны. Нанесение припоя в такой форме значительно облегчает труд при сборке большого количества мелких контактов.

В большинстве случаев электрические контакты бывают малых размеров и их нужно припаивать к различным держателям из черных и цветных металлов. Контакты обычно припаивают на плоскую поверхность или на поверхность, имеющую углубления, соответствующие форме припаиваемого контакта. Таким образом, вопросы соединительных зазоров, различия в коэффициентах теплового расширения и конструирования соединений имеют в данном случае относительно небольшое значение.

Наиболее широко применяются пайка в печи и пайка сопротивлением. Пайка сопротивлением осуществляется на точечных сварочных машинах или спаренными угольными электродами на портативном аппарате. Так как электрические контакты обычно имеют относительно высокую электропроводность, то предпочтительно применять на точечных сварочных машинах угольные или вольфрамовые электроды, чтобы необходимое тепло накапливалось непосредственно в электродах, а подлежащий пайке узел нагревался за счет теплопроводности. Время нагрева при этом процессе пайки очень короткое и соединяемые поверхности не подвергаются интенсивному окислению. Поэтому применяемый флюс наносят в виде тонкой пленки и в жидком состоянии. Сухой флюс или флюс в виде пасты является плохим проводником тепла и создает помехи при течении тока через соединение. Это приводит к образованию окисной пленки на соединяемых поверхностях, отчего растекание припоя ухудшается.

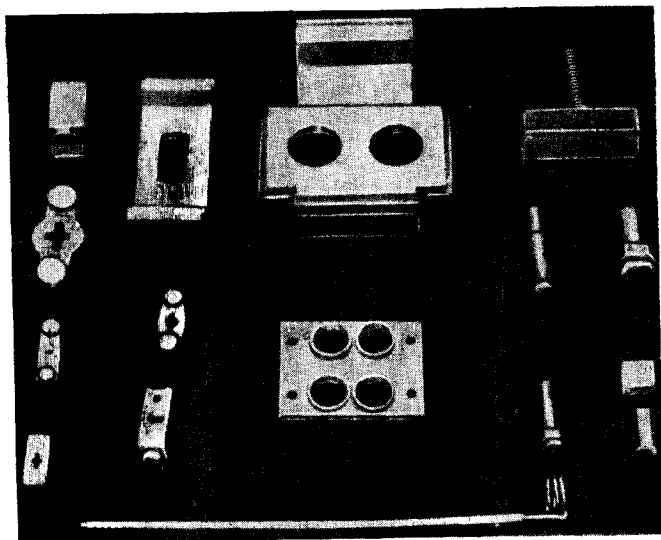
Пайка в печи производится всегда с контролируемой атмосферой. Хотя флюс рекомендуется применять даже при пайке в сильно восстановительной атмосфере, большинство соединений описываемого типа выполняется без флюса, так как размещение флюса на большом количестве мелких узлов удлиняет процесс пайки; кроме того, флюс быстро разрушает углубления, предусмотренные для удерживания и фиксации контактов. Так как температура пайки ниже температуры восстановления любых образовавшихся окисных пленок, то для успешной пайки контактов без флюса требуется сильно восстановительная атмосфера с низким содержанием влажности, которая предотвращала бы окисление припоя. Подлежащие пайке поверхности следует особо тщательно предварительно очищать от грязи и окисной пленки.

Большинство материалов, применяемых для изготовления контактов, легко поддается пайке обычными способами, но в некоторых случаях требуется специальная подготовка поверхностей. Присутствие графита в смеси с серебром может сильно ухудшить процесс пайки. Иногда прибегают к выжиганию графита путем нагрева соединяемых поверхностей в условиях окисления перед пайкой. Окись кадмия перед пайкой удаляют с соединяемых поверхностей химическим путем. Так как материалы для контактов изготавливаются обычно методом порошковой металлургии, то присоединение контактов можно производить при помощи пайки чистым серебром, которым покрыты соединяемые поверхности. Для пайки контактов с высоким содержанием молибдена требуется специальный припой. В этом случае к припою добавляют фосфор, который обеспечивает удовлетворительное смачивание припоем поверхностей основного металла.

В кратком обзоре нельзя описать все возможные случаи пайки, поэтому для определения наилучшего метода присоединения контактов при помощи пайки в специальных случаях необходимо пользоваться консультацией заводов-поставщиков.

## Типичные случаи применения пайки

На фиг. 80 показана группа паяных контактов.



Фиг. 80. Паяные электрические контакты.

## ГЛАВА 22

### ДРУГИЕ МЕТАЛЛЫ

Кроме обычно применяемых металлов, описанных в предыдущих главах, имеются другие металлы, такие как твердые сплавы, вольфрам, тантал, молибден, титан, цирконий и др., которые имеют специальное применение или являются относительно новыми в промышленности. За исключением сведений о твердых сплавах, опубликованные данные о пайке этих материалов встречаются довольно редко. В случае использования какого-либо из названных металлов может оказаться необходимым разработать специальные процессы пайки на основе металлургических свойств материала и условий эксплуатации паяных соединений. В этом случае могут оказаться полезными данные заводов-поставщиков.

Твердые сплавы широко используются в качестве режущих материалов, которые в виде пластин относительно небольших размеров прикрепляются к державкам из другого материала. Крепление этих пластин осуществляется механическим способом, но предпочтительно крепление при помощи пайки.

Вольфрам, молибден, тантал и другие тугоплавкие металлы применяются для изготовления электрических контактов и различных деталей электронно-лучевых трубок. Титан находит широкое применение в различных областях техники и во многих случаях пайка титана является выгодной.

### Твердые сплавы

Твердые сплавы имеют очень разнообразный состав и могут содержать различные тугоплавкие металлы. Хотя для пайки твердых сплавов можно применять любые серебряные припои марок -от ВAg-1 до ВAg-7, предпочитают обычно припои с содержанием никеля (ВAg-3, ВAg-4), которые улучшают смачиваемость. Припои ВCuZn-6 и ВCuZn-7 также особенно рекомендуются для тех основных металлов, которые необходимо подвергать термообработке после пайки. Твердые сплавы паяются также медью (ВCu) и припоем ВAgMn, в особенности, если после пайки требуется термообработка изделия.

Основные правила пайки, описанные в предыдущих главах, действительны и для пайки твердых сплавов. Особое значение при пайке карбидов имеет чистота соединяемых поверхностей. Механическая очистка поверхностей алмазными кругами или кругами из тугоплавких материалов эффективнее химической очистки. Для пайки рекомендуется применять флюс типа 3 (см. гл. 4). Обычно пайку твердых сплавов производят в печи горелкой или индукционным способом. Пайка в печи особенно рекомендуется в случае использования медного припоя ВCu. Припой можно применять в любой обычной форме, но предпочтительно в форме тонких листовых вставок, помещаемых между соединяемыми деталями. Некоторые твердые сплавы плохо смачиваются припоем, поэтому поверхность их необходимо предварительно облуживать расплавленным припоем при помощи стального стержня или покрывать медью или никелем, которые улучшают смачиваемость. Во всех случаях, когда это возможно, полезно способствовать лучшему смачиванию поверхностей твердых сплавов и устранять пустоты в соединении, подвигая паяемые детали относительно друг друга в плоскости их соединения во время плавления припоя.

После пайки при охлаждении твердые сплавы иногда трескаются вследствие большого различия коэффициентов термического расширения твердых сплавов и материала, к которому они присоединены. Это явление можно устранить путем применения прокладки из мягкого металла, которая припаявается одной стороной к пластине из твердого сплава, а другой — к основному металлу. Во время охлаждения мягкий металл будет ползти и уменьшит напряжение в шве. Для этой цели подходят медь или никель. Для пайки таких соединений с прослойкой применяется специальный припой в виде листов, состоящих из медной сердцевины, плакированной с обеих сторон тонким слоем серебряного припоя ВAg с содержанием никеля.

## Вольфрам

Непосредственно перед пайкой паяемые поверхности необходимо тщательно очищать, что можно осуществить механическим путем или погружением деталей на несколько секунд в теплый раствор из 50% азотной кислоты и 50% фтористоводородной кислоты с последующей промывкой в горячей воде и в спирте. Для очистки применяются также натриево-гидридные ванны (370°) с последующей стандартной обработкой, заключающейся в погружении и промывке в воде, затем в погружении в кислоту и повторной промывке в воде. Для очистки вольфрама можно применять горячий раствор гидроокиси натрия или электролитический способ. В качестве электролита (при переменном токе) можно применять разбавленный раствор азотнокислого натрия.

Припоями для пайки вольфрама могут служить: никель, золото, медь и сплавы никель—медь, медь—никель, золото—медь, золото—серебро—платина или им подобные. Эти же припой применимы и для пайки электровакуумных приборов (см. гл. 2, разд. «Давление испарения»).

В тех случаях, когда соединение из вольфрама в условиях эксплуатации нагревается добела, пайку таких соединений производить нельзя, так как сплавление золота или никеля с вольфрамом понижает температуру солидуса сплава вольфрама с припоем и шов может разрушиться.

## Молибден

Для пайки молибдена в печи с контролируемой атмосферой можно применять серебряный припой ВAg-8 и все припой, перечисленные для вольфрама. Разработаны модификации серебряных припоев с небольшой добавкой фосфора, которые успешно применяются для пайки молибдена горелкой. В отношении этих припоев рекомендуется пользоваться указаниями поставщиков.

Для пайки молибдена применяется также родий и смесь порошков кобальта и никеля; другим удобным методом является покрытие деталей пастой из тонкого никелевого порошка и спекание никеля с молибденом перед пайкой. При пайке молибдена горелкой применяют кислородо-водородное пламя и никель в качестве припоя.

## Тантал

Для вакуумной пайки или для пайки сопротивлением под водой тантал покрывают толстым слоем никеля или платины. Тантал образует с никелем однородный твердый раствор до концентрации тантала в количестве 36%<sup>1</sup>, при этом температура ликвидуса плавного снижается от 1450 до 1350°. Если рабочая температура превышает 1000°, то сцепление никеля с танталом места не имеет. При сплавлении никеля с танталом образуются хрупкие интерметаллические соединения, такие как Ni<sub>3</sub>Ta, за чем нужно тщательно следить.

В качестве припоев рекомендуется применять сплавы медь—золото, содержащие золота менее 40% (как, например, ВCuAu-2). Сплавы медь—золото с содержанием золота в пределах от 40 до 90% подвержены старению, в результате которого образуются хрупкие компоненты.

Тантал можно паять и серебряными припоями ВAg с применением флюса AWS тип 7, но эти припои не рекомендуются, так как они охрупчивают тантал.

### Титан

Титан можно паять горелкой, в печи, индукционным методом и методом сопротивления. При пайке горелкой применяется флюс AWS тип 6. Для других методов пайки рекомендуется применять инертные газы, такие как гелий или аргон. В состоянии поставки



Фиг. 81. Соединение из титана, паянное чистым серебром.  
×500.

эти газы могут содержать водяной пар, поэтому их нужно подвергать тщательной осушке. При достаточно низком давлении (порядка 500 мк или менее) титан можно паять в вакууме чистым серебром.

Для пайки титана используются чистое серебро (фиг. 81) или серебряные припои (фиг. 82). Время соприкосновения основного металла с расплавленным припоем должно быть минимальным. В противном случае чистое серебро полностью диффундирует в титан, не образуя паяного соединения, а серебряные припои образуют хрупкие компоненты между соединяемыми поверхностями. Соединения внахлестку, паянные чистым серебром и имеющие максимальное напряжение сдвига порядка  $21,2 \text{ кг/мм}^2$ , дают пластичные швы.

Путем тщательного регулирования процесса пайки можно получить швы, паянные серебряными припоями, с более высоким пределом прочности на разрыв ( $28 \text{ кг/мм}^2$ ), но эти соединения имеют пониженную пластичность.



Фиг. 82. Соединение из титана, паянное припоем BAg-1a (травление 20%  $\text{HNO}_3 + 20\% \text{ HF} + 60\% \text{ глицерина}$ ).  $\times 500$ .

Пайка в вакууме применима только для ограниченного типа деталей, а для остальных деталей необходимо применять индукционную пайку или пайку в печи. При пайке в печи требуется вакуум порядка  $10^{-5}$  или  $10^{-6}$  мм рт. ст. Если нагрев производится продолжительное время, то при вакууме порядка  $10^{-4}$  мм рт. ст. титан слегка окисляется и изменяет цвет.

### Цирконий

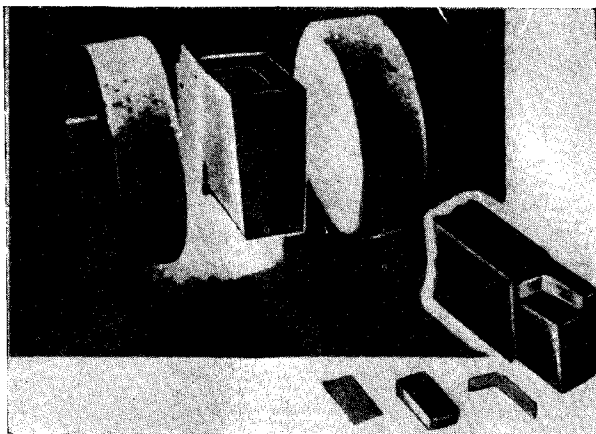
Цирконий трудно поддается пайке. Ввиду отсутствия подходящего флюса, способного удалять окисную пленку, пайка циркония обычными способами затруднительна. При надлежащей очистке соединяемых поверхностей можно получить прочные соединения при пайке циркония серебряными припоями, но вследствие образования в паяном шве интерметаллических соединений шов обычно получается хрупким.

Удовлетворительная пайка циркония получается после покрытия соединяемых поверхностей другими металлами. Одним из способов подготовки циркония к пайке является обработка его в ванне с расплавленным хлористым цинком.

Коррозионные характеристики паяных соединений циркония обычно очень низкие по сравнению с основным металлом.

## Типичные случаи применения пайки

На фиг. 83 показаны пластины из твердого сплава, припаянные к стальному стержню. Пайка производилась воздушно-газовой горелкой с применением серебряного припоя.



Фиг. 83. Пластины из твердого сплава, припаянные к стальному стержню.

---

## ГЛАВА 23

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И САНИТАРНАЯ ЗАЩИТА

Большинство процессов пайки не являются более опасными, чем процессы сварки. При установке и использовании оборудования и материалов следует принимать обычные меры предосторожности, указанные в Американском стандарте Z49 «Безопасность при электрической и газовой сварке и операциях резания», опубликованном Американским обществом сварщиков.

За исключением специальной защиты при применении определенных материалов, как будет указано ниже, согласно Американскому стандарту Z49 можно применять обычную вентиляцию.

При работе с горячими объектами нужно применять защитные мероприятия. Паяльщики должны носить одежду и обувь, которые обеспечат необходимую защиту от несчастных случаев при нагреве и падении деталей. В случае необходимости нужно применять защитные или простые очки.



В состав некоторых припоев входят ядовитые материалы, такие как кадмий и бериллий, а некоторые флюсы содержат фториды и их производные. Поэтому при применении таких припоев или флюсов нужно предусматривать специальную защиту. Такие же меры предосторожности следует принимать при сварке или проведении других горячих работ на уже спаянных швах.

### **Кадмий**

Кадмий входит в состав некоторых припоев и является также покрытием для основного металла. При работе с кадмием нужно особо остерегаться от вдыхания его паров, которые в большом количестве образуются при пайке материалов, покрытых кадмием.

При работе с материалами, покрытыми кадмием, необходима местная вытяжная вентиляция или индивидуальные противогазы. Пайку таких материалов следует производить в изолированных местах, а весь обслуживающий персонал, присутствующий при операциях пайки, должен быть снабжен противогазами. При пайке припоями с содержанием кадмия для удаления паров кадмия необходима механическая вентиляция. При небольших периодических операциях пайки припоем с содержанием кадмия достаточно естественная вентиляция. В тех случаях, когда пайка припоями с содержанием кадмия ведется в изолированном месте даже периодически, необходимо предусматривать местную вытяжную вентиляцию или пользование противогазами.

### **Фториды и другие фтористые соединения**

Эти соединения входят в состав паяльных флюсов, в особенности тех, которые применяются для пайки серебряными, магниевыми и кремнийалюминиевыми припоями. Отравляющее действие фторидов и их соединений опасно при вдыхании их паров или при работе паяльными флюсами, содержащими фтор. Этой опасности можно избежать, если применять соответствующую вентиляцию и соблюдать правила гигиены, чтобы предотвратить попадание этих компонентов в организм человека через рот или через поврежденный кожный покров (через порезы).

Все обычно применяемые промышленные флюсы, содержащие фториды или фтористые соединения, имеют наклейки с указанием стандартных мер предосторожности, сформулированных Американским обществом сварщиков, примерно в следующем виде:

#### **БЕРЕГИСЬ!**

Этот флюс содержит фториды и при нагреве выделяет пары, которые могут раздражать глаза, нос и горло.

Берегитесь паров — пользуйтесь только хорошо вентилируемыми помещениями.

Остерегайтесь попадания флюса на кожу, в глаза и внутрь организма.

Правила эти необходимо точно выполнять.

При пайке в печи флюсами с содержанием фторидов надо регулярно откачивать образующиеся пары, что предотвратит их вредное воздействие на основной металл; воздухообмен необходим также с точки зрения предохранения здоровья.

Пайку погружением деталей, покрытых флюсом, содержащим фториды, следует производить в ваннах, снабженных вытяжной вентиляцией.

### **Бериллий**

Бериллий иногда применяется в магниевом припое для пайки в печи и в меньших дозах добавляется к припою для пайки алюминия. Можно также подвергать пайке сплав меди с бериллием. Присутствие бериллия в любом виде требует соответствующей вентиляции и соблюдения чистоты, чтобы предотвратить проникание его частиц через поры кожного покрова или через дыхательные пути.

### **Цинк**

Цинк, применяемый в качестве покрытия, или как основной металл, или как элемент, входящий в состав припоев, может испаряться или окисляться и образовать дым, который вызывает «цинковый озноб» или «цинковую лихорадку». Хотя влияние паров цинка на здоровье человека менее опасно, чем влияние упомянутых выше элементов, все же при использовании цинка следует обеспечивать местную вытяжную вентиляцию.

### **Составы для очистки**

Обеспечение надлежащей вентиляции в помещениях, где производится очистка деталей, является обязательным условием. Применять для очистки четыреххлористый углерод не рекомендуется, так как его присутствие даже в небольших количествах и при любой температуре вызывает серьезное поражение организма человека. Пары трихлорэтилена и тетрахлорэтилена при соприкосновении с горячими объектами или вблизи от электрической дуги диссоциируют с образованием ядовитых свободных галогенов и фосгена. Пары этих очищающих растворителей тяжелее воздуха и могут распространяться на большие расстояния от места очистки.

Некоторые растворители, например бензол и газолин, огнеопасны и ядовиты, поэтому применяются редко. Но в случае использования этих растворителей необходимо применять надлежащую защиту от возможного их воспламенения.

Перед применением химических очистителей необходимо определить, имеются ли в их составе огнеопасные вещества или вещества, выделяющие ядовитые пары, и принять затем соответствующие меры предосторожности. Колпак, установленный сверху над очистителем,

тельной или кислотной ванной и соединенный с вытяжной системой, вполне обеспечивает удаление образующихся паров.

Меры предосторожности необходимы также при обращении с кислотами и щелочами.

### Атмосферы для пайки

Смеси некоторых печных атмосфер с воздухом чрезвычайно взрывоопасны.

Перед нагревом реторту или печь с такой атмосферой при температуре ниже 700° следует продуть чистым воздухом. Окись углерода и пары металлов, присутствующие в атмосфере для пайки, ядовиты. Если отработанные газы и пары не удаляются через дренажную трубу и не сгорают, то необходимо обеспечивать надлежащую вентиляцию.

---

В приведенном в конце книги Приложении указаны химический состав, механические свойства и физические константы подвергаемых пайке промышленных материалов. Приведенные сведения очень кратки и могут служить только в качестве справок к тексту книги. Данными, приведенными в Приложении, нельзя руководствоваться в случае ответственных конструкций или пользоваться ими в качестве спецификаций.

Материалы и сплавы сгруппированы соответственно их основным составляющим элементам. Наименования металлам и сплавам присвоены те, которые наиболее широко приняты в промышленности. Химический состав показывает среднее значение или предельное содержание основных элементов.

Механические свойства представлены в виде средних значений, полученных на образцах, выполненных из данных материалов, и выражены в единицах измерения, обычно принятых для этих материалов.

---

*ПРИЛОЖЕНИЕ*

**СВОЙСТВА ПАЯЕМЫХ МЕТАЛЛОВ  
И СПЛАВОВ**

Примечание. Значения предела текучести приведены для удлинения 0,2%, если не имеется других указаний. Значения, снабженные буквами *UP*, *PL* или цифрами 0,5%, обозначают соответственно предел текучести, предел пропорциональности или напряжение при удлинении 0,5%.

Значения твердости указаны по Бринеллю, если не имеется обозначений *RB* или *RF* (Роквелл шкала *B* или Роквелл шкала *F*).

Марка металлов и сплавов*	Номинальный состав %	Состояние и обработка***	Предел текучести кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности при растяжении в кг/мм <sup>2</sup>	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°С) в кал/г град	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) × 10 <sup>6</sup>	Теплопроводность (при нормативной температуре) в кал/см·сек·град	Электросопротивление (20°С) в ом·см/см × 10 <sup>6</sup>	Модуль упругости кг/мм <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup>
Алюминий 2S (АД, АД1)	А1—99	Отжиг О Холодная обработка давлением** Н145	3,28	8,3	45	23	2,71	640—665	0,22	23,4	0,53	2,94	6,3
			10,20	11,0	20	32					0,52	3,09	
			14,0	15,3	15	44							
Алюминий 3S (АМц)	А1 — основа Mn — 1,2	Отжиг О Холодная обработка давлением Н145	3,82	10,2	40	28	2,73	640—652	0,22	23,3	0,46	3,50	6,4
			12,1	13,7	16	40					0,38	4,30	
			16,6	18,5	10	55					0,37	4,40	

\* В скобках указаны марки применяемых в Советском Союзе металлов и сплавов, близко соответствующие по составу и свойствам материалам, приведенным в таблице (Прим. ред.).

\*\* Н14 и др. — условное обозначение видов холодной обработки, принятое в США. (Прим. ред.)

\*\*\* Пояснение цифровых сносок см. в конце таблицы (Прим. ред.).

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	$\Delta$ удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в $^{\circ}C$	Удельная теплоемкость ( $0-100^{\circ}C$ ) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения ( $0-100^{\circ}C$ ) $\times 10^6$	Темперопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление ( $20^{\circ}C$ ) в $ом \cdot см/cm \times 10^6$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
Алюминий 4S (Д12)	Al — основа Mn — 1,2	Отжиг O Холодная обработка давлением H345	6,36	16,6	25	45	2,72	625—650	0,22	23,7	0,39	4,20	6,4
			17,3	20,2	12	63							
	Mg — 1,0	21,7	25,5	6	77								
Алюминий B50S	Al — основа Mg — 1,2	Отжиг O Холодная обработка давлением H345	5,10	13,4	24	36	2,69	625—650	0,22	23,6	0,46	3,52	6,4
			15,3	17,5	8	50							
			17,8	19,7	6	57							
Алюминий 52S (АМг)	Al — основа Mg — 2,5	Отжиг O Холодная обработка давлением H345	8,5	17,2	30	45	2,68	590—615	0,22	23,6	0,33	5,04	6,45
			19,8	23,6	14	67							
	Cr — 0,25	22,9	25,1	8	85								

Алюминий 53S	Al — основа	Отжиг О	5,10	10,2	35	26	2,69	578—650	0,22	23,5	0,41	3,9
	Si — 0,7	Термообра- ботка Т46	12,7	19,1	21	62					0,37	4,4
	Mg — 1,3	Термообра- ботка Т57	13,4	17,2	15	60	0,41	3,9				
	Cr — 0,25	Термообра- ботка Т68	20,4	23,6	13	80	0,37	4,4				
Алюминий 61S	Al — основа	Отжиг О	5,10	11,5	30	30	2,70	580—650	0,22	23,5	0,41	3,9
	Cu — 0,25	Термообра- ботка Т46	13,4	22,2	25	65					0,37	4,4
	Mg — 1,0	Термообра- ботка Т68	25,4	28,7	17	95	0,37	4,4				
Алюминий 62S	Al — основа	Отжиг О	4,2	10,8	30	28	2,70	580—650	0,22	22,4	0,41	—
	Cu — 0,25	Термообра- ботка Т46	13,4	22,2	25	65					0,37	3,9
	Si — 0,6 Mg — 1,0	Термообра- ботка Т68	25,4	28,7	17	95	0,37	3,9				
Алюминий 63S	Al — основа	Термообра- ботка Т426	8,3	14,0	20	42	2,70	610—650	0,22	23,4	0,456	3,52
	Si — 0,4	Термообра- ботка Т57	13,4	17,2	12	60					0,50	3,2
	Mg — 0,7	Термообра- ботка Т68	19,7	22,2	12	73	0,50	3,2				
Алюминий 43 (АК)	Al — основа	Литье в землю <sup>2</sup>	5,10	12,2	8	40	2,69	575—630	0,22	22,0	0,35	4,75
	Si — 5,0	Литье в кокиль	5,8	14,6	10	45					0,35	4,75

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности при растяжении в кг/мм <sup>2</sup>	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°С) в кал/г·град	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) × 10 <sup>6</sup>	Теплопроводность (при нормальной температуре) в кал/см·сек·град	Электрическое сопротивление (20°С) в ом·см <sup>2</sup> /см × 10 <sup>6</sup>	Модуль упругости кг/мм <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup>
Алюминий А612	Al — основа Cu — 0,5 Mg — 0,7 Zn — 6,5	Литье в землю <sup>2</sup>	15,9	22,3	5	75	2,81	595—645	0,22	23,8	0,33	5,04	6,6
Алюминий С612	Al — основа Cu — 0,5 Mg — 0,35 Zn — 6,5	Литье в кокиль	11,4	22,2	8	70	2,84	605—640	0,22	23,5	0,38	4,4	6,6
Медь бескислородная OF (MO)	Cu — 99,92 min	Фольга 0,05 мм	6,36 (0,5%)	20,4	45	40RF	8,89—8,94	1083	0,092	17,6	0,95	1,75	10,8
		Холоднокатаная, нагартованная	98,6 (0,5%)	31,8	6	90RF							
		Горячекатаная	6,36 (0,5%)	21,6	45	45RF							
Медь электролитическая упрочненная ЕТР (М1)	Cu — 99,9+ O — 0,04	Фольга 0,05 мм	6,36 (0,5%)	20,4	45	40RF	8,89—8,94	1058—1083	0,092	17,6	0,94	1,75	10,8
		Холоднокатаная, нагартованная	98,6 (0,5%)	31,8	6	90RF							



Медь электротехническая упроченная ЕТР (М1)	Горячекатаная	6,36 (0,5%)	21,6	45	45RF							
Медь бескислородная DLP (М3С)	Фольга 0,05 мм отожженная	6,36 (0,5%)	20,4	45	40RF	8,94	1083	0,092	17,6	0,81	2,78	10,8
Бронза промышленная, 90% (Латунь Л190)	Фольга 0,035 мм отожженная Полунагартованная Горячекатаная	7,6 (0,5%)	24,2	50	57RF	8,80	1015—1035	0,09	18,4	0,45	4,0	10,8
		28,6 (0,5%)	33,1	15	58RB							
Томпак, 85% (Латунь Л185)	Фольга 0,035 мм отожженная Полунагартованная	6,36 (0,5%)	23,6	45	53RF	8,75	978—1035	0,09	18,7	0,37	4,75	10,8
		31,2 (0,5%)	36,3	12	65RB							
Бронза, 80% (Латунь Л180)	Фольга 0,035 мм отожженная Полунагартованная	9,6 (0,5%)	29,3	48	66RF	8,67	962—995	0,09	19,1	0,335	5,44	10,3
		31,8 (0,5%)	38,8	18	70RB							
Бронза патронная, 70% (Латунь Л170)	Фольга 0,025 мм отожженная Слабонагартованная 25% Полунагартованная	12,2 (0,5%)	32,5	55	72RF	8,53	910—950	0,09	20,0	0,29	6,28	10,20
		25,4 (0,5%)	34,4	43	55RB							
		33,1 (0,5%)	39,4	23	70RB							

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °C	Удельная теплоемкость (0—100°С) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) $\times 10^6$	Темперопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°С) в $ом \cdot см^2/см \times 10^8$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
Бронза желтая (Латуль Л66)	Cu — 65 Zn — 35	Фольга 0,025 мм отожженная Полунагартованная Нагартованная	12,2 (0,5%)	32,5	55	72RF	8,47	900—928	0,09	20,3	0,277	6,45	9,55
			31,8 (0,5%)	38,8	23	23RB							
			38,2 (0,5%)	47,0	8	80RB							
Мунц-металл (Латуль Л62)	Cu — 60 Zn — 40	Горячекатаный Холоднокатаный (полунагартованный)	13,4 (0,5%)	34,4	45	85RF	8,39	895—900	0,09	20,9	0,294	6,28	9,55
			31,8 (0,5%)	44,5	10	75RB							
Бронза малосвинцовистая	Cu — 65 Pb — 0,5 Zn — 34,5	Полунагартованная	31,8 (0,5%)	38,8	23	70RB	8,47	895—920	0,09	20,3	0,277	6,80	9,55
			31,8 (0,5%)	38,8	21	70RB							
Бронза средне-свинцовистая	Cu — 65 Pb — 1,0 Zn — 34	Полунагартованная	31,8 (0,5%)	38,8	21	70RB	8,47	885—920	0,09	20,3	0,277	6,8	9,55

Бронза высоко-свинцовая (Латунь ЛС64-2)	Сu — 65 Pb — 2,0 Zn — 33	Полунагартованная	31,8 (0,5%)	38,8	20	70RB	8,47	885—905	0,09	20,3	0,277	6,80	9,55
Муниц-металл свинцовый (Латунь ЛС60-1)	Сu — 60 Pb — 0,6 Zn — 39,4	Горячекатаный	12,7 (0,5%)	34,4	45	80RF	8,41	885—895	0,09	20,9	0,294	6,45	9,55
Бронза морская ингибиторная (Латунь ЛО70-1)	Сu — 71 Zn — 28 Sn — 1	Горячекатаная	11,4 (0,5%)	30,5	65	70RF	8,53	890—955	0,09	20,0	0,265	7,12	10,2
Бронза алюминиевая (Латунь ЛА77-2)	Сu — 76 Zn — 22 Al — 2	Фольга 0,025 мм отожженная	17,3 (0,5%)	38,2	55	77RF	8,33	930 - 967	0,09	18,6	0,24	7,64	10,2
Бронза морская (Латунь ЛО60-1)	Сu — 60 Zn — 39,25 Sn — 0,75	Отожженная при низкой температуре Полунагартованная Горячекатаная	19,2 (0,5%)	44,0	40	60RB	8,41	885—895	0,09	21,2	0,277	6,80	9,55
			33,8 (0,5%)	47,7	20	82RB							
			15,8 (0,5%)	35,0	50	55RB							
Бронза легкообрабатываемая	Сu — 61,5 Zn — 35,5 Pb — 3	Слабонагартованная 11%	28,6 (0,5%)	35,6	20	62RB	8,50	885—895	0,09	20,5	0,277	6,80	8,92

Продолжение

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $кг/мм^2$	Предел прочности при растяжении в $кг/мм^2$	$\Delta$ удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в $^{\circ}C$	Удельная теплоемкость ( $0-100^{\circ}C$ ) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения ( $0-100^{\circ}C$ ) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление ( $20^{\circ}C$ ) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $кг/мм^2 \times 10^{-3}$
Бронза оловянистая, 5%, А (БрО5)	Cu — 95	Полунагартованная Нагартованная	35,0 (0,5%)	43,4	28	78RB	8,86	950—1045	0,09	17,8	0,194	9,85	10,2
	Sn — 5		47,7 (0,5%)	51,5	10	87RB							
Бронза оловянистая, 8%, С (БрО8)	Cu — 92	Полунагартованная Нагартованная	35,0 (0,5%)	48,4	32	84RB	8,80	880—1020	0,09	18,2	0,149	13,6	10,2
	Sn — 8		45,8 (0,5%)	58,2	10	93RB							
Бронза оловянистая, 10%, D (БрО10)	Cu — 90	Полунагартованная Нагартованная	—	52,8	32	92RB	8,78	840—995	0,09	18,4	0,12	16,0	10,2
	Sn — 10		—	63,6	13	97RB							
Бронза фосфористая, 1,25%, Е	Cu — 98,75	Полунагартованная Нагартованная	28,6 (0,5%)	35,0	16	64RB	8,89	1030—1070	0,09	17,8	0,495	3,74	10,8
	Sn — 1,25 P — следы		31,8 (0,5%)	41,4	8	75RB							

Сплав медно-келевый 30%	Сп — 70 Ni — 30	Горячекатаный	12,7 (0,5%)	35,0	45	35RB	8,94	1165—1230	0,09	16,2	0,07	38,2	14,0	
Сплав медно-келевый 10%	Сп — 89	Фольга 0,25 мм отожженная Отпуск при низкой температуре	9,6 (0,5%)	28,6	40	65RF	} 8,94	1092—1135	0,09	16,7	0,108	15,3	11,50	
	Ni — 10 Fe — 1		36,3 (0,5%)	38,2	12	72RB						0,108		15,3
Серебро никелевое, 65-18	Сп — 65	Фольга 0,035 мм отожженная Полунагартованное Нагартованное	15,8 (0,5%)	37,0	40	85RF	} 8,73	1065—1105	0,09	16,2	0,079	28,9	11,5	
	Zn — 17		39,5 (0,5%)	47,0	8	83RB						0,079		28,9
	Ni — 18		47,0 (0,5%)	54,0	3	87RB								
Серебро никелевое 55-18	Сп — 55 Zn — 27 Ni — 18	Нагартованное	54,0 (0,5%)	63,6	3	91RB	8,70	1050	0,09	16,7	0,07	34,6	11,5	
	Серебро никелевое, 65-15 (нейзильбер МНц15-20)	Сп — 65	Фольга 0,05 мм отожженная Полунагартованное Нагартованное	12,2 (0,5%)	35,0	42	73RF	} 8,70	1073	0,09	16,2	0,088	25,5	11,50
Zn — 20		39,5 (0,5%)		47,0	10	80RB	0,088						25,5	
Ni — 15		47,7 (0,5%)		54,0	3	87RB								
Серебро никелевое, 65-12	Сп — 65 Zn — 23 Ni — 12	Фольга 0,05 мм отожженная Полунагартованное Нагартованное	12,2 (0,5%)	34,4	45	73RF	} 8,69	1035	0,09	16,2	0,095	22,1	11,5	
		38,2 (0,5%)	46,5	11	80RB	0,095						22,1		
		Нагартованное	47,7 (0,5%)	54,0	4	89RB								

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности при растяжении в кг/мм <sup>2</sup>	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температур плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°С) в кал/г град	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) × 10 <sup>6</sup>	Темпероупругость (при нормальной температуре) в кал/см·сек·град	Электросопротивление (20°С) в ом·см <sup>2</sup> /см × 10 <sup>6</sup>	Модуль упругости кг/мм <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup>
Серебро никелевое, 65-10	Cu — 65	Фольга 0,05 мм	12,2 (0,5%)	32,5	46	71RF	} 8,69	1015	0,09	16,4	0,108	19,5	11,2
	Zn — 25	Полунагартованное	38,2 (0,5%)	46,5	12	80RB							
	Ni — 10	Нагартованное	47,7 (0,5%)	54,6	4	89RB							
Бронза высококремнистая А	Cu — 94,8 min	Фольга 0,035 мм	15,8 (0,5%)	38,2	60	62RB	} 8,53	970—1020	0,09	18,0	0,088	25,5	9,55
	Si — 3	Полунагартованная	28,6 (0,5%)	49,6	17	87RB							
		Нагартованная Горячекатаная	37,0 (0,5%) 15,8 (0,5%)	60,0 40,8	8 60	93RB 72RB							
Бронза никельлюминиевая, Ni 5%	Cu — 81,5 Al — 10 Ni — 5 Fe — 2,5 Mn — 1	Штампованная и калиброванная	32,8 (0,5%)	70,0	9	98RB	7,54	1025—1037	—	15,3	0,190	—	10,8

Бронза алюминие- вая, 9,5% (БрАЖ 9-4)	Си — 87,5 Аl — 9,5 Fe — 3	Штампованная и калибро- ванная	25,4	54,0	15	87RB	7,65	1025—1037	—	16,2	0,190	—	10,8
Бронза алюминие- вая, 8%	Си — 90,5 Аl — 7 Fe — 2,5	Катаная	20,4 (0,5%)	45,8	35	80RB	7,73	1035—1055	—	16,2	0,21	—	11,5
Никель чистый (Н000)	Ni — 99,9	Отожженный	5,4	29,3	28	85RB	8,91	1450	0,11	13,3	0,198	6,28	19,1
Никель обработанный (НТ)	Ni — 99,0 min	Отожженный Горячеката- ный Холоднога- нутый Холоднока- танный	12,7	44,5	40	100	} 8,89	1425—1435	0,11	13,0	0,145	9,70	19,1
			15,9	47,7	40	110							
			44,5	60,5	25	170							
			60,5	67,0	5,0	210							
Никель малоугле- родистый	Ni — 99,0 min C — 0,02 max	Отожженный	9,6	38,2	50	90	8,89	1425—1435	0,11	13,0	0,145	8,5	19,1
Никель литый	Ni — основа Si — 2,0 Fe — 1,25	Литье в землю	15,8	31,8	25	100	8,34	1385—1415	0,11	13,0	0,141	21,2	13,70
D никель (НМц5)	Ni — 95 Mn — 4,5	Отожженный Горячекатанный Холоднога- нутый	22,2 31,8 51,0	48,7 57,4 63,6	40 35 25	140 150 190	} 8,78	1365—1415	0,11	13,3	0,115	18,7	19,1

Продолжение

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температур плавления в °C	Удельная теплоемкость (0—100°C) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°C) $\times 10^6$	Темперопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°C) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
Е никель (НМц 2,5)	Ni — 98 Mn — 2	Отоженный Горячекатаный Холоднотянутый	22,2	48,7	40	140	} 8,86	1400—1415	0,11	13,3	0,115	14,45	19,1
			31,8	57,4	35	150							
			51,0	63,6	25	190							
Дурапикель	Ni — 94 Al — 4,4	Горячекатаный Горячекатаный <sup>3</sup> Холоднотянутый Холоднотянутый <sup>3</sup>	31,8	67,0	35	180	} 8,26	1425—1435	0,104	12,8	0,045	47,5	19,1
			83,0	108,0	15	320							
			57,4	76,6	25	220							
			112	134,0	15,0	340							
Монель-металл <sup>9</sup>	Ni — 67 Cu — 30	Отоженный Горячекатаный Холоднотянутый Холоднотянутый <sup>1</sup>	22,2	48,7	40	125	} 8,84	1285—1340	0,13	14,0	0,062	48,2	16,5
			31,8	57,4	35	150							
			51,0	63,6	25	190							
			63,6	70,0	5	240							



Монель-металл литейный	Ni — 63 Cu — 32 Si — 1,25	Литье в землю	22,2	51,0	35	135	8,63	1305—1345	0,13	12,2	0,062	54,4	12,1
R монель-металл	Ni — 67 Cu — 30 S — 0,035	Горячекатаный Холоднокатаный	28,6 47,7	54,0 57,2	35 25	145 180	8,84	1285—1340	0,13	14,0	0,062	48,2	16,3
K монель-металл	Ni — 66 Cu — 29 Al — 2,75	Горячекатаный Горячекатаный <sup>3</sup> Холоднокатаный Холоднокатаный <sup>3</sup>	28,6 70,0 54,0 83,0	63,6 96,0 73,0 108,0	40 25 25 20	160 280 210 290	8,47	1305—1340	0,13	14,0	0,045	59,5	12,8
H монель-металл	Ni — 65 Cu — 29,5 Si — 3,0	Литье в землю	38,2	63,6	15	210	8,48	1280—1305	0,13	12,2	0,062	62,8	12,8
S монель-металл	Ni — 63 Cu — 30 Si — 4	Литье в землю <sup>4</sup> Литье в землю <sup>2</sup> Литье в землю <sup>3</sup>	45,5 63,6 63,6	57,4 91,0 91,0	3 2 2	275 320 350	8,36	1250—1280	0,13	12,2	0,062	64,6	13,4
Инконель	Ni — 77,5 Cr — 15 Fe — 7,5	Отожженный Горячекатаный Холоднокатаный Холоднокатаный	22,2 38,2 57,4 70,0	54,0 63,6 73,0 86,0	45 35 20 5	150 180 200 260	8,51	1385—1415	0,11	11,5	0,036	100	19,7

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	% Удлинение (на 50,8 мм)	Твердость	Удельный вес	Пределы температур плавления в °C	Удельная теплоемкость (0—100°C) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°C) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°C) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
Инконель литой	Ni — 78,0 Fe — 6 Cr — 13,5 Si — 2,0	Литье в землю <sup>2</sup>	25,4	64,0	20	175	8,50	1360—1385	0,11	11,5	—	—	14,6
Инконель X	Ni — 73,0 Cr — 15,0 Fe — 7,0 Ti — 2,5 Al — 0,7 Nb — 1,0	Отожженный Горячекатаный <sup>3</sup>	31,8 76,6	73,0 114,5	50 25	200 360	8,30	1380—1415	0,105	13,7	0,035	127,3	19,7
Инконель W	Ni — 73,0 Cr — 15,5 Fe — 7,0 Al — 0,7 Ti — 2,5	Отожженный Отожженный <sup>3</sup>	28,6 63,6	67,0 106,2	55 27	180 260	8,31	1380—1415	0,105	13,7	0,035	127,3	19,7
Сплав 80Ni, 20 Cr (Нихром X20H80)	Ni — 78 Cr — 19	Холоднокатаный <sup>4</sup> Холоднокатаный <sup>1</sup>	38,2 —	60,5 105,0	30 1	90RB 102RB	8,40	1405	0,107	13,1	0,036	111,2	19,7

Слав 60Ni, 15Cr (X15H60)	Ni — 61,0 Cr — 15,5 Fe — ост.	Горьчекатаный Холодногяну- тый <sup>4</sup> Холодногяну- тый <sup>1</sup>	— 38,2	70,0 60,5 102,0	35,0	200	8,4	1380—1385	0,107	13,7	0,032	114,6	19,7							
														8,4	1380—1385	0,107	13,7	0,032	114,6	19,7
														8,4	1325—1385	0,136	11,1	0,033	114,6	19,4
Слав 60Ni, 15Cr литой (X15H60)	Ni — 60,0 Cr — 14,0 Fe — ост.	Литой <sup>2</sup>	28,6	41,4	2,0	180	8,4	1325—1385	0,136	11,1	0,033	114,6	19,4							
														8,4	1325—1385	0,136	11,1	0,033	114,6	19,4
														8,4	1290—1315	0,094	11,0	0,040	129,6	15,3 17,2
Хастеллой* Слав А	Ni — основа Mo — 21,0 Fe — 19,0	Литье в землю <sup>4</sup> Горьчеката- ный <sup>4</sup> Точное литье <sup>2</sup>	30,6 28,0 28,6	46,5 70,0 48,4	12 50 21	168 175 173	8,80	1290—1315	0,094	11,0	0,040	129,6	15,3 17,2							
														8,80	1290—1315	0,094	11,0	0,040	129,6	15,3 17,2
														8,80	1290—1315	0,094	11,0	0,040	129,6	15,3 17,2
Хастеллой* Слав В	Ni — основа Mo — 21 Fe — 19	Литье в землю <sup>4</sup> Горьчеката- ный <sup>4</sup> Точное литье <sup>2</sup>	37,0 38,2 38,8	51,0 86,0 54,0	8 50 14	207 201 216	9,24	1310—1330	0,091	10,1	0,028	138,0	16,8 20,2 18,1							
														9,24	1310—1330	0,091	10,1	0,028	138,0	16,8 20,2 18,1
														9,24	1310—1330	0,091	10,1	0,028	138,0	16,8 20,2 18,1
Хастеллой* Слав С	Ni — основа Mo — 16 Cr — 16 Fe — 5 W — 4	Точное литье <sup>2</sup> Литье в землю <sup>4</sup> Горьчеката- ный	38,2 37,0 35,0	51,0 49,6 82,6	7 8 45	225 218 211	8,94	1265—1295	0,092	11,3	0,030	136,0	15,6 16,5							
														8,94	1265—1295	0,092	11,3	0,030	136,0	15,6 16,5
														8,94	1265—1295	0,092	11,3	0,030	136,0	15,6 16,5
Хастеллой* Слав D	Ni — основа Si — 10 Cu — 3	Литье в землю <sup>4</sup>	75,0	75,0	0—2 (на 25,4 мм)	390	7,80	1105—1115	0,108	11,0	0,050	115,5	18,4							

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $кг/мм^2$	Предел прочности при растяжении в $кг/мм^2$	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°С) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электрическое сопротивление (20°С) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $кг/мм^2 \times 10^{-3}$	Продолжение	
														Модуль упругости $кг/мм^2 \times 10^{-3}$	Электрическое сопротивление (20°С) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$
„Иллиум“ G	Ni — основа Cr — 22 Fe — 6 Cu — 6 Mn — 1,25 Si — 0,65	Литой <sup>2</sup>	36,2	43,4	7	185	8,58	1295	0,105	13,5	0,029	125,0	17,0		
Вольфрам	W	Спеченный Отпуск 15 мин.	—	11,8 18,2	— 1—4	225 375	19,3	3400 ± 20	0,034	3,96	0,40	5,50	31,8		
Молибден	Mo	Отпуск 14 мин.	36—54	137— 153	2—5	155—250	10,3	2605	0,065	5,4	0,350	5,27	26,8		
М1А „Ду-металл“ М (МА1)	Mg — основа Mn — 1,2	Горячекатаный Холоднокатаный Отожженный	— 17,8 11,5	21,0 23,6 21,0	12 7 16	— 56 48	1,76	645—650	0,25	26,0	0,30	5,10	4,14		
Серебро чистое	Ag — 99,9	Отожженное Холоднокатаное <sup>1</sup>	7,65 24,2	14,6 27,4	45 6	30 90	10,5	960	0,056	19,7	1,0	1,63	7,0		

Золото чистое	Au — 99,99	Отожженное Холоднокатаное <sup>1</sup>	10,8 20,4	45 4	25 60	19,32	1060	0,031	14,0	0,69	2,38	7,65
Платина чистая	Pt — 99,99	Отожженная Холоднокатаная <sup>1</sup>	15,3 23,0	24,0 2,5	40 100	21,4	1765	0,032	8,8	0,165	10,9	13,8
Платина промышленная	Pt — 99+	Отожженная Холоднокатаная <sup>1</sup>	14,6 23,6	29 3,5	57 113	21,4	1765	0,032	8,8	0,165	12,2	14,4
Сплав платино-иридиевый, 10%	Pt — основа Ti — 10	Отожженный Холоднокатаный <sup>1</sup>	33,8 52,2	27 2,5	110 170	21,53	1760—1785	—	8,85	—	25,5	—
Сплав платино-родневый, 10%	Pt — основа Rh — 10	Отожженный Холоднокатаный <sup>1</sup>	30,0 53,5	37 3	65 160	20,55	1830	—	—	—	19,4	—
Палладит промышленный	Pd — 99,5	Отожженный Холоднокатаный <sup>1</sup>	19,2 30,0	40 1,5	44 106	11,98	1548	0,058	11,7	0,17	10,2	10,8
Палладит твердый	Pd — основа Ru — 4	Отожженный Холоднокатаный <sup>1</sup>	32,6 45,8	23 3	— —	11,98	1565	—	—	—	—	—

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности при растяжении в кг/мм <sup>2</sup>	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°С) в кал/г·град	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) × 10 <sup>6</sup>	Теплопроводность (при нормальной температуре) в кал/см·сек·град	Электросопротивление (20°С) в ом·см/см <sup>2</sup> × 10 <sup>6</sup>	Модуль упругости кг/мм <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup>
Тантал	Ta — 99,9 +	Отоженный илн неотожженный, листовой	—	27—112	45—25 (на 25,4 мм)	55—125	16,6	2960	0,036	6,45	0,13	15,32	17,2
Железо сварочное	Fe — основа Примеси — 2,5	Горячекатаное	19,2	30,6	30 (на 203,2 мм)	100	7,70	1495	0,11	12,0	0,144	11,90	18,5
Железо в ушках	Fe — 99,9	Горячекатаное Отоженное	18,4 12,2	28,6 24,2	26 45	90 67	7,86	1530	0,108	11,7	0,17	9,66	19,1
Чугун серый	C — 3,1 Si — 1,8 Mn — 0,7 Fe — ост.	Литой <sup>2</sup>	—	20,4	0,5 max	180	7,20	1130	—	10,8	0,107	68,0	8,3 ± 1,0
Чугун ковкий	C — 2,5 Si — 1,0 Mn — 0,55 Fe — ост.	Литой <sup>2</sup>	23,2УР	35,0	20	130	7,32	1225	0,122	11,8	0,15	30,6	15,9

Чугун никелевый высокопрочный	С — 2,7	19,2PL	25,4	—	220	} 7,20	1167	—	11,7	0,11	—	12,7±1,0
	Si — 1,5 Mn — 0,8 Ni — 2,3 Cr — 0,3 Mo — 0,4 Fe — ост.	25,4PL	63,8	—	350							
Чугун никелевый коррозионноустойчивый Тип 1	С — 28	—	19,2	2	150	} 7,48	1167	—	19,0	0,095	178,5	9,3
	Si — 1,5 Mn — 1,0 Ni — 14,0 Cr — 2,0 Cu — 7,0 Fe — ост.											
Чугун никелевый коррозионноустойчивый Тип 2	С — 2,8	—	19,2	2	150	} 7,48	1167	—	18,5	0,095	178,5	9,3±1,0
	Si — 1,8 Mn — 1,3 Ni — 20,0 Cr — 2,5 Fe — ост.											
Чугун ковкий (содержанием магния)	С — 3,4	44,5	63,6	3	245	} 7,2	1140	—	13,5	—	61,2	15,9
	Si — 2,5 Mn — 0,7 P — 0,1max Ni — 1,5 Mg — 0,06 Fe — ост.	35,0	44,5	20	160							

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $кг/мм^2$	Предел прочности при растяжении в $кг/мм^2$	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температур плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°C) в $кал/г \text{ град}$	Коэффициент линейного расширения (0—100°C) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°C) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $кг/мм^2 \times 10^{-3}$
Чугун ковкий никелевый коррозионно-устойчивый (с содержанием магния)	C — 2,8	Литой <sup>4</sup>	22,3	38,2	10	175	7,4	1235	—	18,7	—	100,7	11,8
	Si — 2,5 Mn — 1,0 P — 0,01 макс Ni — 20 Cr — 2,0 Mg — 0,1 Fe — ост.												
Чугун малоуглеродистый твердый никелевый	C — 2,7	Литье в землю <sup>1</sup> Литье в кокиль <sup>2</sup>	—	35	—	550	7,70	1167	—	8,65	—	—	—
	Si — 0,6 Mn — 0,5 Ni — 4,5 Cr — 1,5 Fe — ост.			47,8									
Чугун высокоуглеродистый твердый никелевый	C — 3,0	Литье в землю <sup>2</sup> Литье в кокиль <sup>2</sup>	—	19,2	—	600	7,70	1167	—	8,65	—	—	—
	Si — 0,6 Mn — 0,5 Ni — 4,0 Cr — 1,5 Fe — ост.			51									



Сталь углероди- стая SAE-1020 (Сталь 20)	Fe — основа	Отожженная Горячекатаная Закаленная 11 Закаленная 12	25,4	38,2	35	130	} 7,86	1510	0,116	11,7	0,123	17,2	19,1
	Mn — 0,45		28,6	44,0	31	146							
	Si — 0,25		51,0	66,3	6	205							
	C — 0,20		39,4	57,4	22	175							
Сталь литая углероди- стая (Сталь 30)	Fe — основа	Литье <sup>4</sup> Литье <sup>13</sup> Литье <sup>14</sup>	25,4	56,0	26	140	} 7,84	1500	0,107	12,0	0,138	15,3	19,1
	Mn — 0,70		28,6	51,0	30	160							
	Si — 0,40		38,2	57,4	25	185							
	C — 0,30												
Сталь литая легирован- ная	Fe — основа	Литье <sup>4</sup> Литье <sup>15</sup> Литье <sup>16</sup>	38,2	67,0	20	225	} 7,87	1500	0,107	12,0	—	—	19,1
	Ni — 1,75		60,5	71,4	17	260							
	Mn — 0,80		86,0	95,6	13,5	325							
	Cr — 0,75												
C — 0,30													
Mo — 0,25													
Сталь нержавею- щая Тип 301	Fe — основа	Отожженная Холодное обжатие 52%	22,2	63,6	65	160	} 8,02	1385—1415	0,12	14,4	0,039	74,0	18,5
	Cr — 17		104,0	122,0	3,2	385							
	Ni — 7												
	C — 0,11												
Сталь нержавею- щая Тип 302	Fe — основа	Отожженная Холодное обжатие 51%	19,2	57,4	55	160	} 8,02	1385—1415	0,12	14,4	0,039	74,0	17,8
	Cr — 18		100	111,5	5,5								
	Ni — 9												
	C — 0,10												
Сталь нержавею- щая Тип 304 (0X18N9)	Fe — основа	Отожженная Холодное обжатие 50%	19,2	54,0	50	160	} 8,02	1385—1440	0,12	14,4	0,039	74,0	17,8
	Cr — 19		97	106	8								
	Ni — 9,0												
	C — 0,08												

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка***	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	% удлинение (на 50,8 мм)	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °C	Удельная теплоемкость (0—100°C) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°C) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°C) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
Сталь нержавеющая литейная Тип 304 (1X18H9)	Fe — основа Cr — 19 Ni — 9,0 C — 0,1	Литье <sup>4</sup>	22,2	50,4	54	131	7,92	1385—1415	0,12	14,4	0,036	71,4	18,5
Сталь нержавеющая Тип 309 (X23H13)	Fe — основа Cr — 23 Ni — 13 C — 0,20	Отожженная Холодное обжатие 45%	19,2 84,0	52,2 92	50 6	165	8,02	1385—1440	0,12	14,4	0,036	80,0	18,5
Сталь нержавеющая Тип 310 (X25H20C2)	Fe — основа Cr — 25 Ni — 20 C — 0,25	Отожженная Холодное обжатие 50%	25,4 86,0	63,6 92,3	50 3	165	8,02	1385—1440	0,12	14,4	0,033	80,0	19,1
Сталь нержавеющая Тип 316	Fe — основа Cr — 17 Ni — 12 Mo — 2,5 C — 0,10	Отожженная Холодное обжатие 49%	25,4 86,6	57,4 94,2	50 6	165 275	7,94	1360—1385	0,12	15,8	0,039	75,5	18,5

Сталь нержавею- щая литая Тип 316	Литье	22,2	53,0	60	161	7,92	1385—1415	0,12	14,4	0,036	81,5	18,5
Сталь нержавею- щая Тип 321 (X18H9T)	Отожженная Холодное обжатие 50%	22,2	54,0	50	160	} 7,94	1385—1415	0,12	14,9	0,039	74,0	17,8
		90	102,0	4,0	300			0,039	74,0	17,8		
Сталь нержавею- щая Тип 347 (X18H11B)	Отожженная Холодное обжатие 52%	25,4	57,4	50	} 160	7,94	1385—1415	0,12	14,9	0,039	74,0	17,8
		92	108	4,0				0,039	74,0	17,8		
Сталь нержавею- щая Армо 17-7PH (S12)	Отожженная Холоднока- таная Холоднотя- нутая	25,4	83,0	30	170	} 7,65	—	—	11,0	—	85,8	18,8
		140	150	3	440						85,8	18,8
		185	192	5	515						85,8	18,8
Сталь нержавею- щая Тип 410 (1X13)	Отожженная Термообра- ботанная	25,4	47,8	30	150	} 7,75	1470—1520	0,11	9,2	0,06	67,7	18,5
		73,2	95,6	15	300			0,06	67,7	18,5		
Сталь нержавею- щая Тип 414	Отожженная Термообра- ботанная	51,0	63,6	22	217	} 7,75	1415—1470	0,11	9,9	0,06	71,5	18,5
		95,6	127,0	17	387			0,06	71,5	18,5		

Продолжение													
Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	Удлинение (на 50,8 мм) %	Твердость	Удельный вес	Пределы температуры плавления в °C	Удельная теплоемкость (0—100°C) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°C) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°C) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
Сталь нержавеющая Тип 420 (3X13)	Fe — основа Cr — 13 C — 0,30	Отожженная Термообработанная	38,2 127,0	62,5 159	28 8	180 480	7,75	1440—1495	0,11	9,9	0,06	56,0	18,5
Сталь нержавеющая Тип 430 (X17)	Fe — основа Cr — 16 C — 0,12	Отожженная Холодное обжатие 45%	28,6 71,0	44,6 73,2	30 2,5	150 217	7,75	1415—1450	0,11	9,2	0,057	61,2	18,5
Сталь нержавеющая Тип 446	Fe — основа Cr — 25,0 C — 0,35	Отожженная	31,8	51,0	30	165	7,45	1415—1470	0,12	10,3	0,050	68,8	18,5
Инвар	Fe — основа Ni — 36	Отожженный Горячекатаный	26,8 31,8	44,6 47,8	41 37	130 140	8,09	1415	0,123	1,08	0,025	81,5	13,4
Сталь нержавеющая. Тип 312	Fe — основа Cr — 29 Ni — 9	Горячекатаная	28,6	57,4	30	170	—	—	—	—	—	—	—

Слав литейный 28Cr, 10Ni АСІ Тип НЕ	Fe — основа Cr — 29 Ni — 9	Литье <sup>2</sup>	28,6 (0,5%)	54,0	10	200	7,67	—	0,14	19,9	—	—	14,0
Сталь нержавеющая Тип 330	Fe — основа	Горячекатаная Холоднотянутая <sup>1</sup> Холоднотянутая <sup>4</sup>	} 35	63,6	} 35	200	7,86	1370	0,11	11,3	0,031	100,4	—
	Ni — 36			51,0									
Слав литейный 35Ni, 15Cr АСІ Тип НТ	Fe — основа Ni — 36 Cr — 16	Литье <sup>2</sup>	24,2 (0,5%)	44,0	10	192	8,04	—	0,135	17,4	—	—	14,7
Железокремнистый сплав	Fe — основа Si — 14,5 C — 0,8 Mn — 0,35	Литье <sup>2</sup>	10,8	10,8	0	500	7,0	1250	0,12	6,5	0,124	64,5	—
„Дуригдор“	Fe — основа Si — 14,5 Mo — 3,0 C — 0,8	Литье <sup>2</sup>	10,8	10,8	0	500	7,04	1275	0,12	6,5	0,124	64,5	—

Марка металлов и сплавов	Номинальный состав %	Состояние и обработка	Предел текучести $kg/mm^2$	Предел прочности при растяжении в $kg/mm^2$	% удлинение (на 50,8 мм)	Твердость	Удельный вес	Пределы температур плавления в °С	Удельная теплоемкость (0—100°С) в $кал/г \cdot град$	Коэффициент линейного расширения (0—100°С) $\times 10^6$	Теплопроводность (при нормальной температуре) в $кал/см \cdot сек \cdot град$	Электросопротивление (20°С) в $ом \cdot см^2/см \times 10^6$	Модуль упругости $kg/mm^2 \times 10^{-3}$
"Дуримет Т"	Fe — основа Ni — 22 Cr — 19 Mo — 2,5 Si — 1,0 Cu — 1,0	Литой <sup>1</sup> Горячекатаный <sup>4</sup>	22,2 28,6	44,6 54,0	40 50	140 140	7,85	1440	0,12	14,0	0,048	98,5	{ 14,5 17,7

1 Нагартованный (твердый)

2 Отливки

3 Состаренный

4 Отожженный

5 Полунагартованный

6 Закалка на твердый раствор

7 Только искусственное старение

8 Закалка на твердый раствор с последующим искусственным старением

9 326 Монель-металл подобен обычному монель-металлу, но содержит 55—60% никеля

10 Термообработанный

11 Закалка в воде, отпуск при 93° С

12 Закалка в воде, отпуск при 535° С

13 Нормализация при 645° С

14 Закалка в воде, отпуск при 675° С

15 Нормализация при 620° С

16 Закалка в воде, отпуск при 620° С

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие к русскому изданию . . . . .	7
Введение . . . . .	9
<i>Главы</i>	
1. Способы пайки, оборудование и технология . . . . .	11
2. Свойства основных металлов . . . . .	23
3. Припой . . . . .	29
4. Флюсы и атмосферы . . . . .	42
5. Проектирование соединений под пайку . . . . .	59
6. Конструкция соединений . . . . .	59
7. Очистка и подготовка поверхности . . . . .	71
8. Сборка деталей под пайку . . . . .	72
9. Техника пайки твердыми припоями . . . . .	75
10. Операции, производимые после пайки . . . . .	86
11. Контроль . . . . .	87
12. Алюминий и алюминиевые сплавы . . . . .	93
13. Магний . . . . .	104
14. Медь и медные сплавы . . . . .	109
15. Малоуглеродистые и низколегированные стали . . . . .	115
16. Нержавеющие стали . . . . .	118
17. Высокоуглеродистые и быстрорежущие инструментальные стали . . . . .	124
18. Чугун . . . . .	128
19. Жаропрочные сплавы . . . . .	133
20. Никель и сплавы с высоким содержанием никеля . . . . .	144
21. Пайка контактных деталей из драгоценных металлов . . . . .	153
22. Другие металлы . . . . .	155
23. Техника безопасности и санитарная защита . . . . .	160
<i>Приложение</i> . . . . .	161

РУКОВОДСТВО ПО ПАЙКЕ МЕТАЛЛОВ

Обложка худ. Ю. А. Королёва

Издательский ред. Л. И. Шейнфайн

Техн. ред. Н. А. Пухликова

T-11113 Подписаю в печать 9/VIII 1960 г. Учетно-изд. л. 10,06

Формат бумаги 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. 6 бум. л.— 12 печ. л.

Цена 9 руб. 70 коп., с 1 января 1961 г. цена 97 к.

Тираж 6000 экз.

Заказ 445/1737

Типография Оборонгиза



**Замеченная опечатка**

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
141	9 сверху	и смачивает	и не смачивает

Заказ 445/1737